

Clasificación de faltas en líneas de doble circuito mediante Transformadas Wavelet y Redes Neuronales

Francisco Martín, José A. Aguado, José Muñoz, Manuel Medina.

Departamento de Ingeniería Eléctrica. E.T.S.I.I. Universidad de Málaga.
e-mail: {fimartin,jaguado,jmunozg,mmt}@uma.es

Resumen. Se presenta en este trabajo un nuevo diseño de relé digital para la protección de líneas de doble circuito. El esquema propuesto consiste en un módulo de pre-procesamiento basado en Transformadas Wavelet, cuya misión es la extracción de rasgos distintivos de las señales de intensidad. La salida de este módulo constituye el vector de entrada a un segundo módulo basado en redes neuronales artificiales, cuya tarea es la clasificación del transitorio. La simplificación de la información en el preprocesador hace que las redes neuronales sean más sencillas, eficientes y rápidas.

Palabras clave: Protección de líneas de doble circuito, Transformadas Wavelet, Redes neuronales artificiales.

1 Introduction

La mayor parte de las faltas en Sistemas eléctricos de potencia (SEP) se producen en las líneas de transporte y distribución. Los métodos actuales de clasificación y localización de faltas se basan en el método de la estimación fasorial, usando la teoría de las componentes simétricas [1,2]. Este método se combina con otros, como el de sobreintensidad o el diferencial.

Los relés digitales usan filtros que extraen la componente fundamental de las señales de tensión e intensidad, eliminando toda la información de alta frecuencia de las señales transitorias. Este hecho conlleva la pérdida de una gran cantidad de información correspondiente al espectro de alta frecuencia de las señales transitorias, información que puede ser muy útil en la clasificación del transitorio.

Las líneas de doble circuito tienen importantes ventajas en el transporte de energía, relacionadas principalmente con el coste de la instalación y los derechos de paso. Sin embargo, causan complicaciones en los esquemas de protección, pues el número de faltas posibles (monofásicas a tierra, bifásicas, bifásicas a tierra, trifásicas, etc) totalizan un número de 110, frente a las 11 existentes en las líneas de un solo circuito; otro problema es el producido por el acoplamiento electromagnético de secuencia homopolar.

Las técnicas de inteligencia artificial se han aplicado a la protección de líneas de transporte en SEP desde los años 90 [3,4]. Se introducen cambios en la estructura de los relés, y se usa la información de las señales originales de tensión e intensidad, sin extraer fasores. De esa forma, se incrementa la velocidad del relé respecto de los relés tradicionales, debido al hecho de que las ventanas de datos que se utilizan son más cortas.

La aparición de las Transformadas Wavelet data de los años 80. Su uso en el análisis de señales en SEP se ha extendido en la última década, en campos como las protecciones y calidad del suministro. La aplicación de estas transformadas tiempo-frecuencia constituye una potente herramienta para el análisis de señales transitorias en SEP. Su principal ventaja respecto a la Transformada de Fourier es su buena resolución en el tiempo y en la frecuencia.

Esquemáticamente, la protección que se propone en este trabajo consta de los siguientes módulos:

El módulo de preprocesamiento, que consiste en una Transformada Wavelet Discreta.

Las redes neuronales artificiales detectora, clasificadora y localizadora de falta. Sus vectores de entrada son las transformadas Wavelet de las señales.

El módulo de salida, cuya misión es la elaboración de las señales de disparo de los interruptores a partir de las salidas de las redes neuronales.

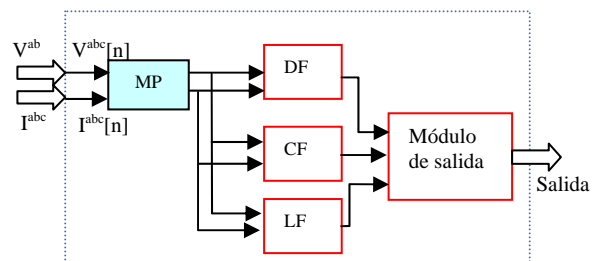


Figure 1. Esquema del relé

La información que se ha utilizado es la correspondiente a un cuarto de ciclo a partir de la ocurrencia de una falta.

La frecuencia de muestreo es de 32 muestras por ciclo, y la frecuencia fundamental es de 50 Hz.

El algoritmo diseñado necesita solamente ocho muestras desde el instante de ocurrencia de una falta para su clasificación. Esto supone una notable reducción del tiempo que transcurre entre la falta y el disparo de los interruptores.

2 Transformadas Wavelet

La transformada Wavelet de una función del tiempo $f(t)$ consiste en la representación de esta como combinación

lineal de una familia de funciones, que conforman la base de un espacio vectorial.

Se definen la *función de escalado* $\varphi(t)$ y la *función wavelet* $\psi(t)$ mediante las ecuaciones en diferencias:

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h(k) \varphi(2t - k) \quad (1)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g(k) \varphi(2t - k)$$

La función $\varphi(t)$ debe cumplir ciertos requerimientos matemáticos. Las secuencias $h(k)$ y $g(k)$ son filtros discretos que definen la transformada wavelet.

Mediante traslaciones y contracciones de las funciones de escalado y wavelet se obtienen las familias de funciones

$$\varphi_{jk}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z} \quad (2)$$

$$\psi_{jk}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad j, k \in \mathbb{Z}$$

Donde el primer subíndice j indica la contracción de la función o el nivel de frecuencia, y el segundo, k , la localización en el tiempo [4].

Una vez creado el sistema, la función $f(t)$ puede expresarse de manera única como combinación lineal de la forma:

$$f(t) = \sum_{l \in \mathbb{Z}} c_l \varphi_l(t) + \sum_j \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (3)$$

Al conjunto de coeficientes c_l y $d_{j,k}$ se le llama *transformada wavelet* de $f(t)$. En el caso de que las funciones base sean ortogonales, estos coeficientes se calculan como productos interiores según las ecuaciones:

$$c_l = \langle \varphi_l, f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_l(t) f(t) dt \quad (4)$$

$$d_{j,k} = \langle \psi_{j,k}, f \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_{j,k}(t) f(t) dt$$

Los coeficientes c_l representan la aproximación de la señal $f(t)$. Los coeficientes $d_{j,k}$ representan los *detalles* de la función a diferentes niveles de resolución.

Los coeficientes c_l y $d_{j,k}$ pueden calcularse por convolución de las muestras de la función original con las secuencias $h(k)$ y $g(k)$.

La transformada Wavelet se puede implementar con una pareja de filtros de respuesta finita (FIR) llamados filtros espejo en cuadratura (QMF). Estos filtros separan las componentes de alta y baja frecuencia de la señal $f(t)$. La frecuencia de corte es la mitad de la frecuencia de Nyquist.

Las salidas de los dos filtros en cuadratura se deciman por un factor 2. Entonces la parte de baja frecuencia se usa como entrada de otro par de filtros QMF idénticos, operación que se repite de forma recursiva, dando como salida las diferentes bandas de frecuencia de la señal.

En la figura 2 se muestra esquemáticamente este procedimiento piramidal, llamado algoritmo multiresolución

o algoritmo de Mallat. Las salidas de los filtros pasa-bajos se llaman aproximaciones y las salidas de los filtros pasa-altos se llaman *detalles*.

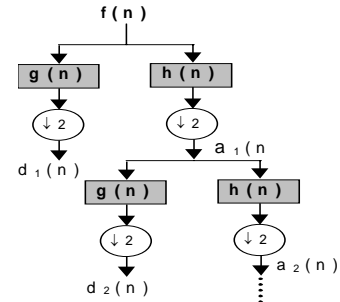


Figura 2. Algoritmo de Mallat

3. Sistema de Prueba

El sistema de potencia considerado como ejemplo de prueba en este trabajo se muestra en la figura 3. Consiste en dos generadores en los nudos A y F, en serie cada uno con una impedancia que representan los equivalentes Thevenin de la parte del sistema situada a cada lado de la línea. Entre los nudos C y D se ha representado la línea de doble circuito objeto de este estudio, de 120 km de longitud. El relé de protección está situado en el extremo C.

Dos líneas de circuito simple, de 120 km de longitud cada una, se encuentran entre los nudos BC y DE respectivamente. Se han simulado faltas que afectan a cualquier número de fases y tierra. En una línea de doble circuito pueden ocurrir un total de 120 faltas diferentes:

- Seis faltas fase-tierra
- 15 faltas bifásicas
- 15 faltas bifásicas-tierra
- 20 faltas trifásicas
- 20 faltas trifásicas-tierra
- 15 faltas tetrafásicas
- 15 faltas tetrafásicas-tierra
- 6 faltas pentafásicas
- 6 faltas pentafásicas-tierra
- Una falta exafásica
- Una falta exafásica-tierra

Se han considerado faltas en diferentes puntos de la línea protegida: a 20, 40, 60, 80 y 100 km del extremo C.

Las faltas se han producido en instantes diferentes: con ángulos de 0° , 20° , 40° , 60° y 80° a partir del paso por cero de la tensión en la fase A.

La resistencia de falta ha tomado los valores de 0, 5 y 10 Ω .

Si se simularan todas las combinaciones, el resultado sería de 9000 casos diferentes. De entre ellos se han elegido 300 casos representativos de todas las situaciones que se han enumerado.

En las dos líneas no protegidas se han simulado diferentes faltas en tres localizaciones diferentes y en distintos instantes.

También se han simulado oscilaciones de potencia, pérdidas de sincronismo, y apertura y cierre de interruptores.

Se ha usado para las simulaciones el programa MICROTRAN. Se han tenido en cuenta el acoplamiento capacitivo e inductivo entre las seis fases. Para las líneas se ha usado el modelo de parámetros distribuidos. Para cada falta, se ha considerado la línea en falta dividida en dos líneas con un nudo ficticio en el punto de falta.

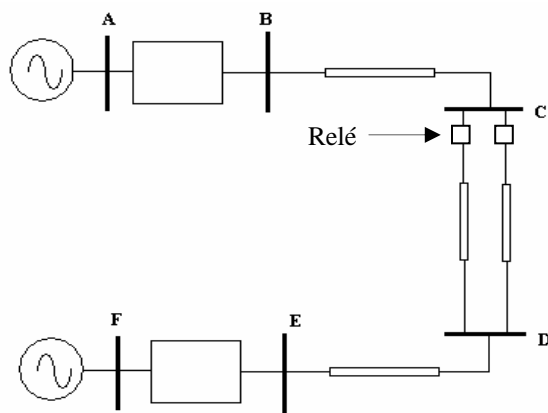


Figure 3. Sistema de prueba simulado.

4. El Módulo de Preprocesamiento

El objetivo del módulo de preprocesamiento es la extracción de rasgos distintivos de las señales de tensión e intensidad, a fin de simplificarlas y hacerlas más fácilmente reconocibles por las redes neuronales artificiales.

Se ha elegido para este propósito la Transformada Wavelet Daubechies de 6 coeficientes. Las razones de esta elección están relacionadas con la rapidez que se requiere en esta aplicación, en la que es fundamental una gran velocidad. La Wavelet elegida tiene la ventaja de que opera sobre ventanas de datos de seis coeficientes, con lo que detecta un transitorio de falta con gran rapidez, y debe realizar solo seis productos y seis sumas para calcular un coeficiente Wavelet. Los valores de las secuencias h y g se muestran en la tabla I.

Tabla I. Secuencias Wavelet

h(0)	h(1)	h(2)	h(3)	h(4)	h(5)
0.3327	0.8069	0.4599	-0.1350	-0.0854	0.0352
g(0)	g(1)	g(2)	g(3)	g(4)	g(5)
-0.0352	-0.0854	0.1350	0.4599	-0.8069	0.3327

La implementación de la DWT se ha realizado mediante el algoritmo de Mallat. Para ello se ha usado una ventana deslizante de datos de seis muestras. Solo se han usado los coeficientes Wavelet de la primera descomposición. Como la

frecuencia de muestreo es $f_s=1600Hz$, la frecuencia de Nyquist es $f_n=800Hz$, y la banda de frecuencias que corresponde al primer nivel de detalles es de 400 a 800 Hz.

Los vectores de entrada a las redes neuronales se han construido de la siguiente forma: Se han elegido cuatro coeficientes de detalles consecutivos por cada señal de intensidad, lo que da como resultado vectores de 24 elementos.

5. Topología de las Redes Neuronales

En este trabajo se han usado redes neuronales artificiales perceptrón multicapa. El algoritmo de entrenamiento ha sido el método de retropropagación del error. En la figura 4 se muestra el esquema de una red neuronal con una capa de entrada, dos capas ocultas, y una capa de salida. Esta estructura ha sido usada previamente en relés de protección. Una neurona se representa por la ecuación:

$$v = \sum_{k=1}^M w_k X_k + bias \quad (5)$$

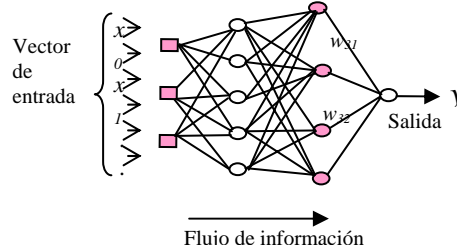


Figura 4. Estructura de una red neuronal artificial.

En el entrenamiento de las redes neuronales se han usado vectores de entrada de respuesta conocida. Mediante un algoritmo, se han ajustado los pesos $w_{k,j}$. Una vez entrenada, la red puede generalizar y reconocer otros vectores de entrada con respuesta desconocida.

Se han construido redes neuronales con dos capas ocultas. Se ha usado un método de optimización para la determinación del número de neuronas de cada capa oculta.

Tres redes independientes se han diseñado para la detección, clasificación y localización de faltas. Las tres tienen 24 neuronas en la capa de entrada, pues los vectores de entrada tienen 24 elementos.

La red detectora de falta (DF) (Figura 1) tiene una neurona en la capa de salida. Un valor 1 significa que ha ocurrido una falta en el sistema, y un valor -1 indica que el sistema opera en condiciones normales.

La red clasificadora de falta (CF) tiene siete neuronas en la capa de salida, que están relacionadas con cada una de las fases y tierra según el esquema (A B C D E F T). Un valor 1 en una de las salidas indica que la fase correspondiente está

en falta, y un valor -1 indica que la falta no afecta a esa fase. Por ejemplo, una salida $(1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1)$ indicaría que se ha producido una falta entre las fases B, C y tierra.

La misión de la red localizadora es decidir si la falta ha ocurrido en la línea protegida CD. Si su neurona de salida toma el valor 1, esto indicaría que la falta es en la línea protegida, y si el valor es -1 , la línea protegida no estaría en falta.

6. Resultados

Se muestra un ejemplo de una falta entre las fases A, B y E para demostrar la validez del método propuesto. La falta se ha producido a una distancia del relé de 80 km. La resistencia de falta ha sido de $5 \ \Omega$. En las figuras 5 y 6 se muestran las intensidades de falta de las fases A, B, C, D, E y F.

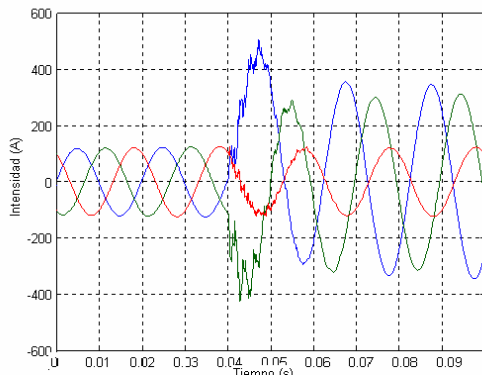


Figura 5. Señales de intensidad de las fases A, B y C.

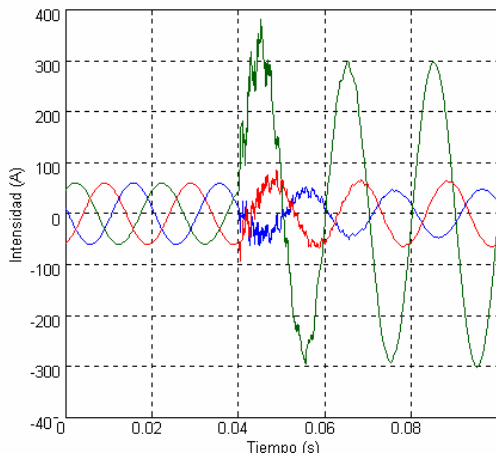


Figura 6. Señales de intensidad de las fases D, E y F.

Se ha aplicado la transformada Wavelet discreta Daubechies de 6 coeficientes a las señales de intensidad. En la figura 6 se muestran las señales de detalles obtenidas para las seis fases A, B y C.

Se observa en las fases en falta, A, B y E unos picos muy pronunciados en las señales de detalles. Por el contrario, en las fases sanas C, D y F, las señales de detalles presentan un rizado mucho menos pronunciado. Este hecho permite que las redes neuronales sean más sencillas y exactas en la clasificación de los transitorios cuando los vectores de entrada se construyen con las señales de detalles, en lugar de hacerlo con las señales originales. Se demuestra así la superioridad del relé con extractor de rasgos distintivos basado en Transformada Wavelet Discreta.

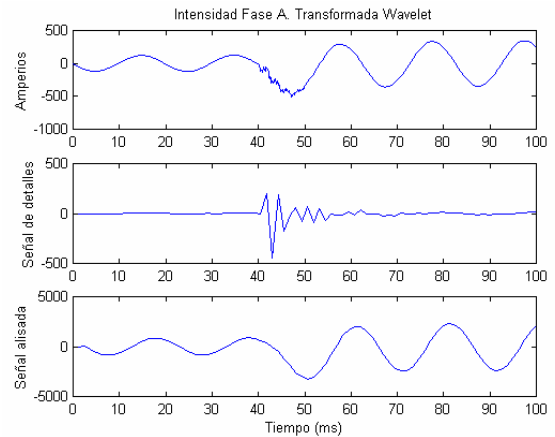


Figura 8. Intensidad de la fase A y su transformada Wavelet.

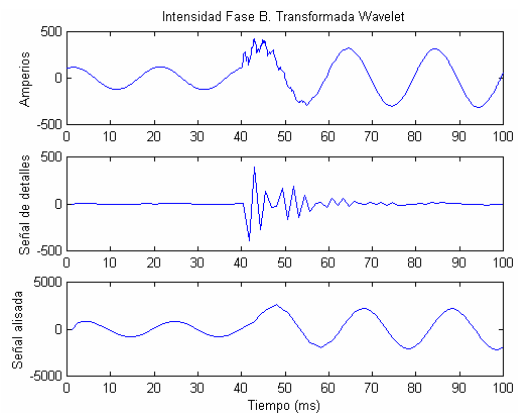


Figura 9. Intensidad de la fase B y su transformada Wavelet.

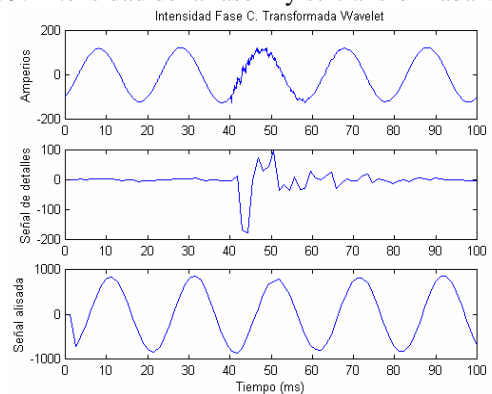


Figura 10. Intensidad de la fase C y su transformada Wavelet.

La exactitud en la detección y clasificación de faltas ha sido del 100% en los casos analizados.

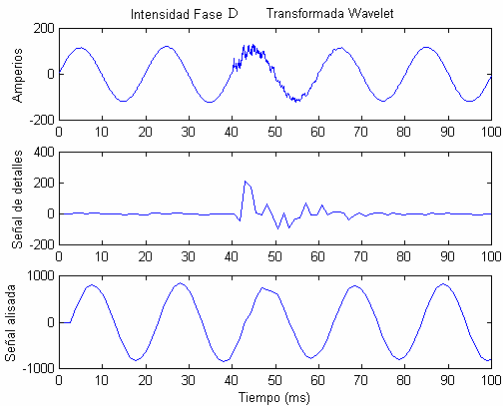


Figura 11. Intensidad de la fase D y su transformada Wavelet.

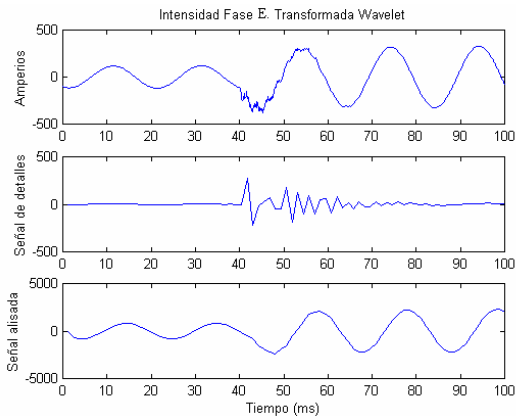


Figura 12. Intensidad de la fase E y su transformada Wavelet.

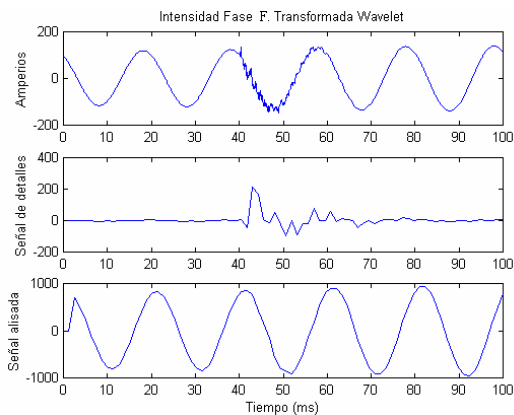


Figura 13. Intensidad de la fase F y su transformada Wavelet.

7. Conclusiones

Los resultados de las simulaciones han demostrado que el esquema propuesto ha mejorado significativamente la velocidad y exactitud de las protecciones digitales existentes. El uso de ventanas de datos más cortas, junto con la introducción de un preprocesador basado en transformadas wavelet ha disminuido el tiempo necesario para la clasificación de transitorios hasta un cuarto de ciclo.

La protección propuesta resuelve el problema relacionado con las faltas intercircuito y con el acoplamiento electromagnético de secuencia homopolar entre los dos circuitos.

REFERENCIAS

- [1] P. M. Anderson, *Power System Protection*, IEEE Press, 1999.
- [2] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, John Wiley and Sons, 1988.
- [3] Mladen Kezunovic, Igor Rikalo. *Detect and Classify Faults using Neural Nets*. IEEE Computer Application in Power, October 1996.
- [4] Heydt, A.W. Galli. *Transient Power Transient Power Quality Problems Analyzed using Wavelets*. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, N°2, April 1996.
- [5] S.J.Huang,Ch.T.Hsieh,Ch.L.Huan: *Application of Morlet Wavelets to Supervise Power System Disturbances*. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, N°1,pp. 235-243. January 1999
- [8] S. Mallat, *A theory for multi-resolution signal decomposition: the wavelet representation*. IEEE on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.11,pp. 674-693, July 96.
- [9] F. Martin, J. A. Aguado. *Wavelet-Based ANN Approach for Transmission Line Protection*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 5. Oct. 2003.