

WAVELETS AND ITS APPLICATIONS OF POWER SYSTEM PROTECTION

Okan ÖZGÖNENEL*, Güven ÖNBİLGİN, Çağrı KOCAMAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Elektrik Tesisleri A.B.D., 55139, Kurupelit , Samsun,TÜRKİYE e-mail: okanoz@omu.edu.tr

ABSTRACT

In this work, a new digital protection algorithm is developed for the power transformer which is the most important and expensive element in a power system. Due to their different sizes and varieties, relaying for power transformers differs from situation to situation. Transformer protection algorithms, that have been developed so far, have proved their efficiency and computational ability. Using several windowing techniques cause significant delay for relay operation. Due to increasing power quality standards such as IEEE 519, new high performance algorithms are needed. For this purpose, the wavelet technique is introduced and used for analyzing magnetizing inrush currents and faults current. Wavelets introduce new classes of basis functions for time – frequency signal analysis and have properties particularly suited to the transient components and discontinuities evident in power system disturbances.

For this reason, the wavelet technique and transformation were used and very accurate and satisfactory results were obtained in the time domain. As it is stated in Section 3, it is observed that magnetizing inrush, rated condition and fault conditions are easily distinguished by using high frequency components.

Keywords: Wavelet Technique, Transformer Protection, Digital Protection

DALGACIKLAR VE TRANSFORMATÖR KORUMA UYGULAMALARI

ÖZET

Bu çalışmada güç sistemlerinin en pahalı ve en vazgeçilmez bir elemanı olan güç transformatörlerinin sayısal yolla korunması amacıyla yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Farklı güçlerde ve tiplerde olmalarından dolayı, güç transformatörü korunması da farklılık göstermektedir. Şimdiye kadar güç sistemleri uygulamalarında kullanılan tüm algoritmalar güç sistemleri uygulamalarında güvenilirliklerini kanıtlamış ve birim koruma amacıyla yıllardır kullanılmaktadır. Yüksek frekanslı harmonik bileşenlerin tamamı ihmal edilerek sadece gerilim ve akım sinyallerindeki temel harmonik bileşenler üzerine kurulu yöntemlerdir. Ayrıca fazör hesaplamalarında pencere algoritmaları kullanılmakta ve önemli bir zaman gecikmesi ortaya çıkmaktadır. Bu işlemler sonucunda doğruluk da tam olarak garanti edilememektedir. IEEE 519 gibi (güç sistemlerinde harmonik standardı) enerji kalitesindeki standartların artması nedeniyle başarıyı yüksek algoritmalara ihtiyaç vardır.

Bu amaçla dalgacık tekniği ve dönüşümü kullanılmış ve zaman düzleminde yapılan çözümlemelerde oldukça güvenilir ve hassas sonuçlar elde edilmiştir. Bölüm 3’de de belirtildiği gibi, dalgacık tekniği ile yapılan çözümlemeler irdelendiğinde normal çalışma, enerjilenme anı ve arıza durumlarının yüksek frekanslı bileşen katsayıları yardımıyla kolayca ayırt edilebileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dalgacık Tekniği, Transformatör Koruma, Sayısal Koruma

1.GİRİŞ

Bu çalışmada; enerji sistemlerinin en pahalı ve en önemli elemanlarından biri olan güç transformatörlerinin

1. INTRODUCTION

In this paper, a discreet protection method is introduced for the power transformer which is the most considerable

sayısal olarak korunması gerçekleştirilmiştir. Transformator arızalarında sistemin sürekliliği kesilmiş olmaktadır. Bu yüzden arıza en kısa sürede giderilmeli ve transformator devreye alınarak enerjinin akışı sağlanmalıdır. Transformator koruma ilkelerinin başındaki en önemli unsur ani mıknatıslanma akımının varlığıdır. Ani mıknatıslanma akımı, çekirdekdeki kalıcı akımın büyüklüğüne bağlıdır ve polaritesi demir çekirdeği doymaya getirecek yönde ise çok ciddi hasarlara yol açabilir. Enerjilenme esnasında kalıcı akı ile birincil sargıdan geçen akım arasındaki ilişki doğrusal olmadığından, ani mıknatıslanma akımının şiddeti önceden bilinmez. Bu yüzden ani mıknatıslanma ile arızayı birbirinden ayırmak gerekmektedir. Ani mıknatıslanma akımı esnasında yüzde diferansiyel koruma rölesinin açma sinyali göndermemesi için en etkili yol ani mıknatıslanma akımındaki ikinci harmonik bileşenini kullanmaktır. Sayısal rölelerde ani mıknatıslanma akımlarının varlığı geleneksel olarak hızlı Fourier dönüşümü ile gerçekleştirilmektedir (1-4).

Fourier dönüşümü (FD) bir sinyalin harmonik bileşenleri hakkında bilgi verirken herhangi bir zaman bilgisi içermemektedir. Dolayısıyla herhangi bir anda meydana gelen özel olayları gözlemlemek mümkün değildir. Bu temel sorun yüzünden durağan olmayan sinyaller için Fourier dönüşümleri uygun değildir. Durağan sinyaller için bu önemli bir sorun değildir. Dalgacık dönüşümleri ile bu sorun giderilmiştir.

Dalgacık dönüşümü yaklaşık 10 – 15 sene önce matematikçiler tarafından ortaya atılmış bir sinyal işleme tekniğidir. Tarihsel gelişim yönünden dalgacık analizi yeni kullanılmaya başlanmış bir yöntem olup, temeli Joseph Fourier'e kadar uzanmaktadır. Fourier dönüşümünün tersine, dalgacık dönüşümü ile her bir zaman aralığında sinyalin hem alçak (A) hem de yüksek frekans bileşenlerini (D) hesaplamak mümkündür. Bu yöntemle frekans zamanla değişen sistemlerin analizi ve geçici durum analizleri oldukça hassas bir şekilde yapılmaktadır. Dalgacık serileri bir çok farklı alana uygulanabilen bir yöntem olup, bunlar arasında uygulamalı matematik, sinyal işleme teknikleri, ses ve görüntü sıkıştırma teknikleri başta gelmektedir. Şekil 2.1'de dalgacıkların kullanım alanları görülmektedir. Bu üç alanda yapılan çalışmalarda dalgacık serileri ve dönüşümleri oldukça hassas sonuçlar vermiştir.

Bölüm 2'de dalgacık dönüşümleri ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

and expensive element in power system. In case of a breakdown of the transformer, continuity of the overall system is cut. Therefore, the failure should be cleared as soon as possible and the transformer should be taken in service for the continuity of the system. The loss of such equipment through catastrophic failure can be very costly. The phenomenon of magnetizing inrush current is the most important factor for power transformer protection. Magnetizing inrush current depends on remnant flux and its polarity in the core, if it causes the saturation, its effects can have serious damages. Due to nonlinear relationship between inrush current and flux in the steel core, the magnitude of inrush can not be estimated before. Hence it is necessary to discriminate between fault current and inrush current. To avoid the needless trip by magnetizing inrush current, the second harmonic component is commonly used for blocking differential relay in power transformers. Fast Fourier Transform is traditionally used for analyzing inrush current in digital relays (1-4).

Fourier Transform gives only frequency information of the signal while time information is lost. Thus, it is impossible to observe special events that occur at any time. For this particular reason, Fourier Transform is not an ideal method for non-stationary signals such as transient events. This is not a valid condition for stationary signals. This problem is solved by applying wavelet transform.

Wavelet transform, which was put forward by the mathematicians at first, is a signal processing technique. Its technique is simply based on Fourier transform, which was first introduced by Joseph Fourier. In contrast to of Fourier transform, it is possible to calculate either low frequency (Approximation) or high frequency (Detail) components of a given signal. The analysis of the signals, whose frequency varies considerably with respect to time, can be done sensitively by using this method. The Wavelet technique can be applied to various fields such as applied mathematics, signal processing, sound and picture compressing techniques. In Section 2, detailed explanations of this proposed technique can be found. Figure 1. shows the general application areas of the Wavelets.

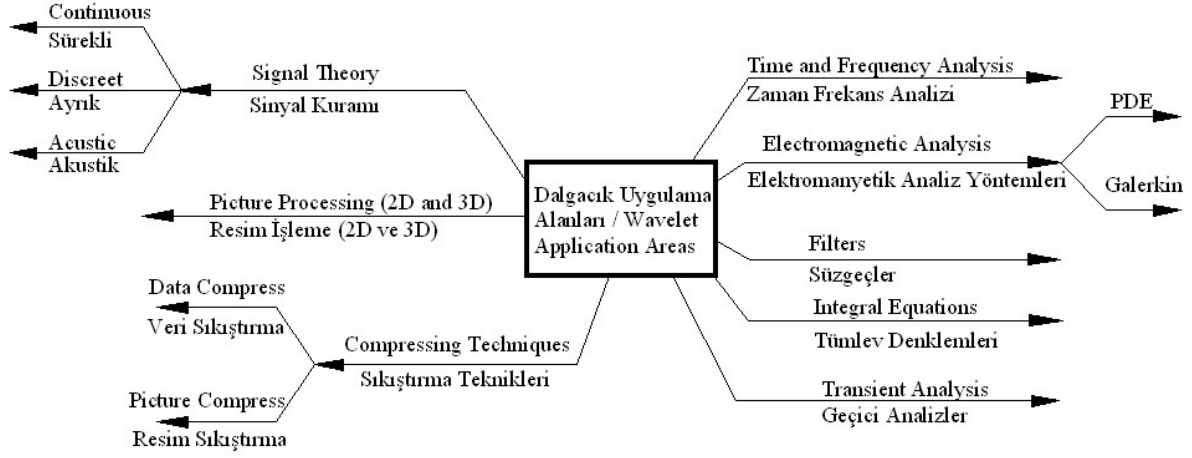


Figure 1. Application areas of wavelets
Şekil 1. Dalgacıklar ve Uygulama Alanları

2. KURAMSAL ESASLAR

2.1 Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Yukarıdaki eşitlikte sürekli dalgacık dönüşümü, $W_{(a,b)}$, görülmektedir. $\varphi(t)$ ana dalgacık fonksiyonu (eşleniği), a ölçek (frekans) parametresi ve b de zaman (konum) parametresidir. $1/\sqrt{2}$ değeri enerjinin korunumu ile ilgili bir parametredir. Sürekli dalgacık dönüşümü sonsuz sayıda girişe ihtiyaç duyduğundan bilgisayar analizi için uygun değildir. Bilgisayar analizleri için Eş. [2.2]'de görülen ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) kullanılır (5,6).

Yukarıdaki eşitlikte; m parametresi frekansı belirler ve n parametresi ise konumu (zamanı) belirler.

Pratik uygulamalarda dalgacık serileri aşağıdaki gibidir:

$$Wf(m,n) = 2^{-m/2} \int f(t) \varphi(2^{-m}t - n) dt \quad [2.2.]$$

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k \varphi(t-k) + \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} d_{j,k} \varphi(2^j t - k) \quad [2.3]$$

Eşitlik [2.3]'de $\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_n h_0 \varphi(2x - n)$ ölçek fonksiyonu, $\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_n h_1 \varphi(2x - n)$ ise dalgacık fonksiyonudur. h_0 ve h_1 ise sırasıyla alçak ve yüksek geçiren süzgeç katsayılarıdır.

Bu çalışmada Daubechies ana dalgacık ve ölçek fonksiyonları ani miktatsızlanma akımının ve arıza akımlarının çözümlenmesinde kullanılmıştır.

2. THEORICAL PRINCIPLES

2.1 Continuous Wavelet Transform

Continuous wavelet transform, $W_{(a,b)}$, is seen in Equation 2. $\varphi(t)$ is the complex form of the mother wavelet where a is the scaling (frequency) and b is the time (translation) parameter. The value of $1/\sqrt{2}$ is related with conservation of the energy. Since continuous wavelet transform requires infinite samples, it is not suitable for computer simulations. For computer simulations, the following Eq. [2.2], discrete wavelet transform, is used (5,6).

where the parameter of m indicates frequency while n indicates time.

For practical purposes, the following equation for wavelet based expansion is used.

In Equation [2.3], $\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_n h_0 \varphi(2x - n)$ is the scaling function and $\varphi(x) = \sqrt{2} \sum_n h_1 \varphi(2x - n)$ is the mother wavelet function. h_0 and h_1 are the filter coefficients of low frequency and high frequency components respectively.

In this work, Daubechies mother wavelet and scaling functions are used for analyzing inrush currents and fault currents.

2.2 Ayrık Daubechies Dalgacık Dönüşümü

Daubechies dalgacık dönüşümü (DDD), Haar Dalgacık dönüşümü ile aynıdır. Tek fark dalgacık ve ölçek fonksiyonlarının içeriğindedir. Çok çeşitli DDD fonksiyonları türetilmiştir (7,8). Bu çalışmada kullanılan Daubechies 4 ölçek ve dalgacık fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Daubechies dalgacıkları sonucunda elde edilen ayrışım dik olup, sinyalin yeniden yapılandırılmasına da olanak sağlamaktadır. Ölçek vektörleri:

$$\begin{aligned}
 V_1^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, 0, \dots) \\
 V_2^1 &= (0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots) \\
 V_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots) \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 V_{\frac{N}{2}-1}^1 &= (0, 0, 0, \dots, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\
 V_{\frac{N}{2}}^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, 0, 0, 0, \dots, 0, 0, \alpha_3, \alpha_4)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Yukarıdaki denklemde;

$$\alpha_1 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_2 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_3 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_4 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \text{ dir.}$$

Eşitlik (3.1) genelleştirildiğinde Eşitlik (3.2) elde edilir.

$$V_m^1 = \alpha_1 V_{2m-1}^0 + \alpha_2 V_{2m}^0 + \alpha_3 V_{2m+1}^0 + \alpha_4 V_{2m+2}^0 \tag{3.2}$$

İkinci dereceden Daubechies (4) ölçekleme vektörü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_m^2 = \alpha_1 V_{2m-1}^1 + \alpha_2 V_{2m}^1 + \alpha_3 V_{2m+1}^1 + \alpha_4 V_{2m+2}^1 \tag{3.3}$$

Dalgacık vektörleri:

$$\begin{aligned}
 W_1^1 &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, 0, \dots) \\
 W_2^1 &= (0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots) \\
 W_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots) \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 W_{\frac{N}{2}-1}^1 &= (0, 0, 0, \dots, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) \\
 W_{\frac{N}{2}}^1 &= (\beta_1, \beta_2, 0, 0, 0, \dots, 0, 0, \beta_3, \beta_4)
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Yukarıdaki eşitlikte;

$$\beta_1 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \beta_2 = \frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}}, \beta_3 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \beta_4 = \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \text{ dir. } N \text{ ise}$$

örnek sayısıdır.

β ve α arasında şöyle bir ilişki vardır: $\beta_1 = \alpha_4$,

2.2 Discreet Daubechies Wavelet Transform

Daubechies wavelet transform is mainly the same as Haar transform. The only difference is the content of the mother wavelet and scaling function. Different kinds of Daubechies wavelets are derived (7,8). Daubechies 4 mother wavelet and scaling functions, used in this work, are described as follows. Decomposition of a signal resulting discreet wavelet transform is orthogonal and it enables the reconstructing of the original signal.

Scale vectors are seen below:

$$\text{where } \alpha_1 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_2 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_3 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \alpha_4 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}.$$

If Equation [3.1] is generalized, Equation [3.2] is obtained.

Scale vector of second level Daubechies 4 is expressed below.

In the above equation;

$$\beta_1 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \beta_2 = \frac{\sqrt{3}-3}{4\sqrt{2}}, \beta_3 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \beta_4 = \frac{-1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \text{ and } N \text{ is}$$

the number of the samples. The relationship α and β is

as; $\beta_1 = \alpha_4$, $\beta_2 = -\alpha_3$, $\beta_3 = \alpha_2$ ve $\beta_4 = -\alpha_1$.

$\beta_2 = -\alpha_3$, $\beta_3 = \alpha_2$ ve $\beta_4 = -\alpha_1$.

$$W_m^1 = \beta_1 V_{2m-1}^0 + \beta_2 V_{2m}^0 + \beta_3 V_{2m+1}^0 + \beta_4 V_{2m+2}^0 \quad [3.5]$$

İkinci dereceden Daubechies (4) dalgacık vektörü

The mother wavelet vector of the second level Daubechies 4 is defined below.

$$W_m^2 = \beta_1 V_{2m-1}^1 + \beta_2 V_{2m}^1 + \beta_3 V_{2m+1}^1 + \beta_4 V_{2m+2}^1 \quad [3.6]$$

Daubechies (4) ters dalgacık dönüşümü aşağıdaki gibi yazılır:

For a first level decomposition, inverse Daubechies 4 wavelet transform is expressed as below.

$$S = A^1 + D^1 \quad [3.7]$$

Denklem (3.7)'de S ayrık sinyal, A yaklaşım katsayıları (alçak geçiren süzgeç katsayıları) ve D ise detay katsayıları (yüksek geçiren süzgeç katsayıları) olarak adlandırılır.

where S is the discrete signal, A is approximation (low frequency components) and D is detail (high frequency components).

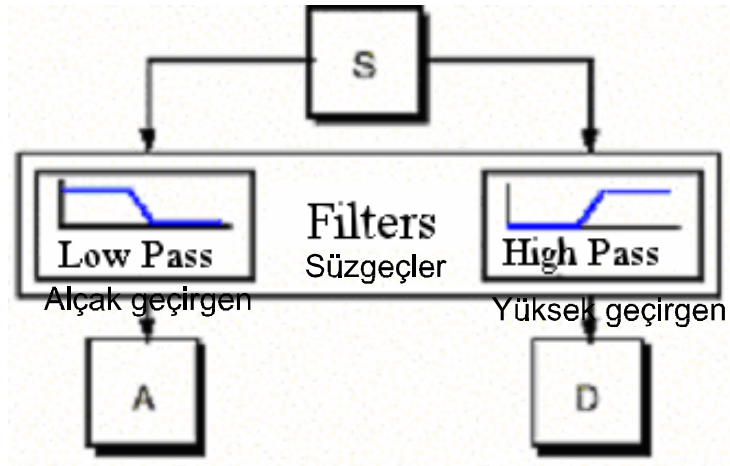


Figure 2. Approximation and detail coefficients of the S discrete signal.

Şekil 2. S sinyalinin alçak (A) ve yüksek dereceden (D) süzgeç katsayıları

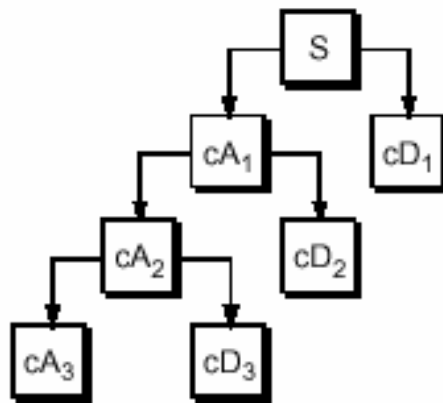


Figure 3. Wavelet decomposition tree (Mallat's wavelet tree)

Şekil 3. Dalgacık ayrıştırma ağacı (Mallat'ın dalgacık ağacı)

Şekil 2’de ayrık S sinyalinin alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılması, Şekil 3’de ise Mallat tarafından ortaya atılan ayrık dalgacık dönüşümü tekniği görülmektedir.

DDD sonucunda elde edilen A (yaklaşım) ve D (detay) sinyallerinin toplamı ana sinyali vermektedir. Birinci seviyeden yaklaşım katsayıları, A, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A^1 = (F.V_1^1)V_1^1 + (F.V_2^1)V_2^1 + \dots + (F.V_{N/2}^1)V_{N/2}^1 \quad [3.8]$$

Birinci seviyeden detay katsayıları, D, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D^1 = (F.W_1^1)W_1^1 + (F.W_2^1)W_2^1 + \dots + (F.W_{N/2}^1)W_{N/2}^1 \quad [3.9]$$

İkinci dereceden Daubechies (4) ters dalgacık dönüşümü Eşitlik [3.10]’de görülmektedir.

$$F = A^2 + D^2 + D^1 \quad [3.10]$$

İkinci seviyeden yaklaşım katsayıları, A, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$A^2 = (F.V_1^2)V_1^2 + \dots + (F.V_{N/4}^2)V_{N/4}^2 \quad [3.11]$$

İkinci seviyeden detay katsayıları, D, aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D^2 = (F.W_1^2)W_1^2 + \dots + (F.W_{N/4}^2)W_{N/4}^2 \quad [3.12]$$

Bölüm 3’de laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları görülmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Güç Sistemi Uygulaması

Bu çalışma iki bölümden meydana gelmiştir. Bunlardan ilki bir dizi laboratuvar çalışmalarını kapsamaktadır. Yapılan bu çalışmalar, deneysel üç fazlı üç sargılı transformatörün enerjilenme anlarını ve kararlı durum çözümlerini kapsamaktadır. Bu çözümlerinin ışığında ATP-EMTP yardımıyla doymalı benzeşim modeli kurulmuş ve normal şartlarda mümkün olmayan gerçeğe çok yakın benzeşimler yapılmıştır. Bunlar arasında, her iki yanda da gerçekleştirilen faz – toprak arızaları, faz – faz arızaları ve simetrik üç faz kısa devre arızaları yer almaktadır. Benzeşim sonuçlarından elde edilen veriler converter isimli bir dosya çeviricisi yardımıyla PL4 formatından MATLAB ortamında veri dosyası (MAT uzantılı) haline dönüştürüldükten sonra dalgacık tekniğinin bilgisayar ortamında benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Dalgacık tekniği ile yapılan çözümler irdelendiğinde normal çalışma, enerjilenme anı ve arıza durumlarının yüksek frekanslı bileşen katsayıları yardımıyla kolayca ayırt edilebileceği

In Figure 2. decomposition of A and D coefficients of a discreet S signal and in Figure 3. Mallat’s wavelet tree is shown.

The summing up A (approximation) and D (detail) coefficients gives the main signal.

For level 1, A approximation coefficients is calculated as below.

For level 1, D detail coefficients is calculated as below.

For level 2, inverse Daubechies wavelet transform is seen in Equation [3.10].

For level 2, A approximation coefficients is calculated below.

For level 2, D detail coefficients is calculated below.

In Section 3. the results of experimental studies in laboratory environment can be seen.

3. EXPERIMENTAL STUDIES

3.1. A Power System Application

This work consists of two main sections. The first part of the study covers laboratory experiments. For this purpose, a three phase – three windings laboratory transformer is used to get an idea of the magnetizing inrush condition and steady state solutions. By means of laboratory experiment, an ATP-EMTP model taking into account the saturation problem is set up and a number of simulations which are impossible to perform in real life are produced. Among these simulations, phase to ground, phase to phase and symmetrical three phase short circuit faults are generated in both sides of the transformer. The data obtained from simulations are converted from PL4 to MATLAB MAT file by converter and discreet wavelet transforms of each datum set is performed in MATLAB environment. When the analyzed data are examined, it is clearly shown that magnetizing inrush and fault currents are easily distinguished with the help of detail coefficients.

A laboratory transformer (2100 VA, 220/55/55V, $N_1=213$, $N_2=53$, $B=1T$, $S=30cm^2$, 50Hz) is used for

gözlemlenmiştir.

Laboratuvar şartlarında bulunan (2100VA, 220/55/55V, $N_1=213$, $N_2=53$, $B=1T$, $S=30 \text{ cm}^2$, 50Hz) transformatorün değişik bağlantı gruplarında hem deneysel hem de sayısal benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 150 adet ani mıknatıslanma akımının benzeşimi üzerine çalışılmıştır. Bu sayede daha genel ve gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. ATP-EMTP yardımıyla yapılan benzeşimler sırasıyla boşta, yarı yükte ve tam yük koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak elde edilen I_{etkin} ve V_{etkin} değerleri benzeşimde doyma eğrisi olarak kullanılmıştır. Anahtarlama anlarında sayısal osilasyonlardan kaçınmak için devre anahtarlarına seri bağlı 10Ω direnç değeri eklenmiştir. Üçgen bağlantı durumlarında ise devre geriliminin ölçülmesi amacıyla (Şekil 4’de transformatorün her iki yanında) çok düşük değerlikli sığaç kullanılarak hayali toprak noktaları oluşturuldu.

laboratory and computer simulations with different winding connections. 150 different types of inrush current condition are studied and very accurate solutions are obtained. The computer simulations with ATP-EMTP are performed in no load, rated load and over load conditions. The values of I_{rms} and V_{rms} are used for saturation curve. A 10Ω resistance is added in order to avoid numerical oscillations in computer simulations. For the case of delta connections, for instance Δ/Δ , two capacitances are added for both sides to form imaginary ground link.

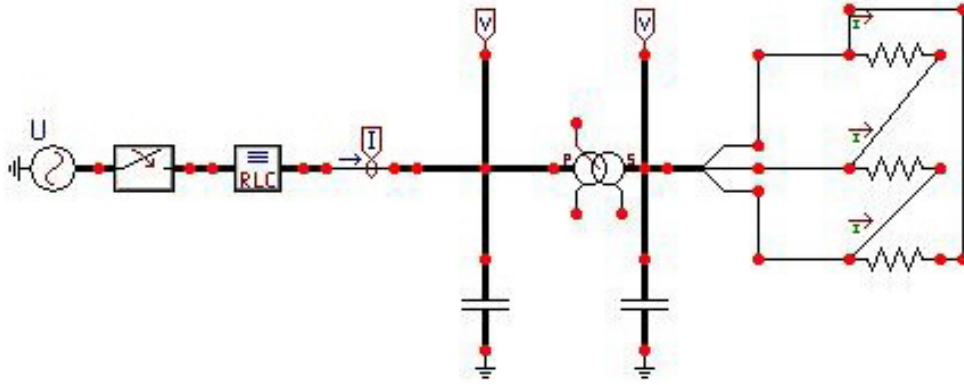


Figure 4. ATP-EMTP simulation for a three phase transformer.

Şekil 4. Üç fazlı deneysel transformatorün ATP-EMTP benzeşimi

Şekil 4’teki benzeşim şemasından da görüldüğü gibi, üç fazlı ideal gerilim kaynağı 3 fazlı bir anahtar yardımıyla istenilen zaman aralığında etkin hale getirilebilmektedir. İkincil yanda kullanılan üçgen bağlı direnç yükleri ise 500Ω olup, sistemin boşta çalıştığını simgelemektedir.

3.2. Ani Mıknatıslanma Akımı

Ani mıknatıslanma akımı geçici bir durumdur ve yalnızca transformator enerjilendiğinde birincil yanda görülür. Arıza durumu olmadığı için, koruma işlevine gerek duyulmaz ve koruyucu eleman (röle) bu zaman süresince sınırlandırılmalıdır. Bu temel kavram transformator korumasının en basit ve önemli bir adımdır.

As it is seen from Figure 4, A three phase voltage source can be triggered at any time with the help of a three phase switch. A 500Ω resistive load on the secondary side symbolizes that the transformer is working on no load.

3.2. Magnetizing Inrush Current

Magnetizing inrush current is a transient situation and seen only on the primary side. As it is not a fault condition, the protection relay does not need to send a trip signal. This basic principle is a fundamental concept of transformer protection.

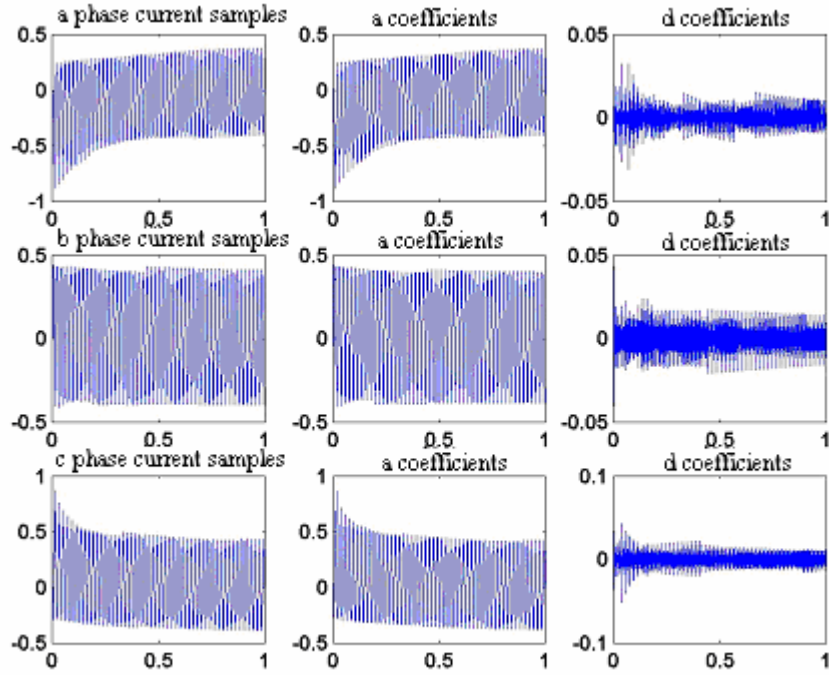


Figure 5. For the case of connection type YY0 and $\delta = 0^\circ$, decomposition of inrush currents

Şekil 5. Bağlantı grubu YY0, $\delta = 0^\circ$ iken ani mıknatıslanma akımının çözümlemesi

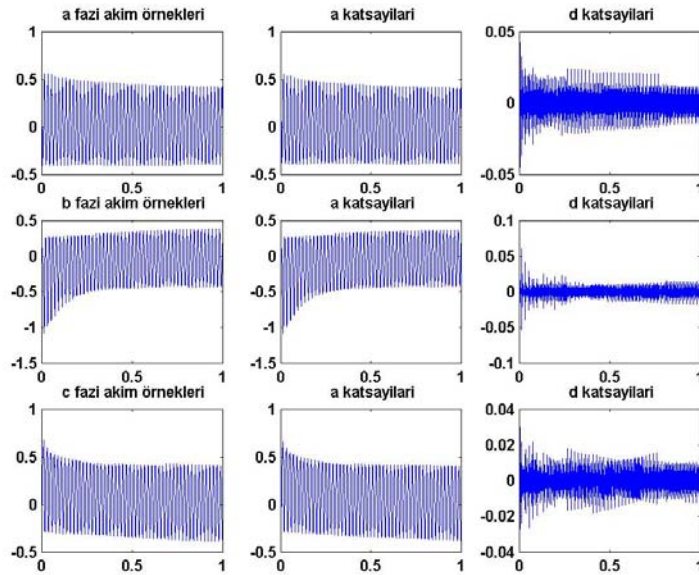


Figure 6. For the case of connection type YY0 and $\delta = 90^\circ$, decomposition of inrush currents

Şekil 6. Bağlantı grubu YY0, $\delta = 90^\circ$ iken ani mıknatıslanma akımının çözümlemesi

Şekil 5 ve Şekil 6'daki grafiklerde yatay eksen zamanı, dikey eksen ise genlik değerlerini vermektedir. İlk sütundaki grafikler her üç fazdan geçen mıknatıslanma akımının şeklidir. 2. sütun bu akımların A katsayılarını, 3.

In Figure 5 and Figure 6, the horizontal axis gives time and vertical axis gives magnitude of each phase currents. The first column on the left hand side shows phase currents, the middle one shows A (approximation)

sütun ise D katsayılarını vermektedir. Ani mıknatıslanma akımının benzeşimi 1 sn süre ile gerçekleştirilmiş olup, örnekleme frekansı 2000 Hz'dir. Periyot başına 40 örnek alınmıştır. Enerjilenme anlarının başlangıcında D katsayılarının genlikleri yüksek ve zamanla ani mıknatıslanma durumu azalırken bu katsayıların genlikleri de azalmaktadır.

3.3. Arıza Akımlarının Benzeşimi

ATP-EMTP ortamında çok sayıda dış arıza benzeşimleri gerçekleştirilmiştir. Bu benzeşimler sırasıyla faz-toprak, 2 faz-toprak, 3 faz-toprak, 2 faz kısa devre ve 3 faz kısa devre arızalarıdır. Yine bu arızalar gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek amacıyla değişik anahtarlama anlarında oluşturulmuştur.

coefficients while the right one shows D (detail) coefficients. For a magnetizing inrush current simulation, the overall simulation time is 1 sec. and sampling frequency is 2000Hz and this yields 40 samples in each period. At the beginning of the energizing moment, the magnitude of D coefficients is greater and decays as the inrush condition finishes.

3.3. Simulation of Fault Currents

A number of external fault studies are performed in an ATP-EMTP environment. These simulations cover phase to ground, phase to phase and symmetrical fault conditions. In order to get realistic results, these faults are generated with different source triggering conditions.

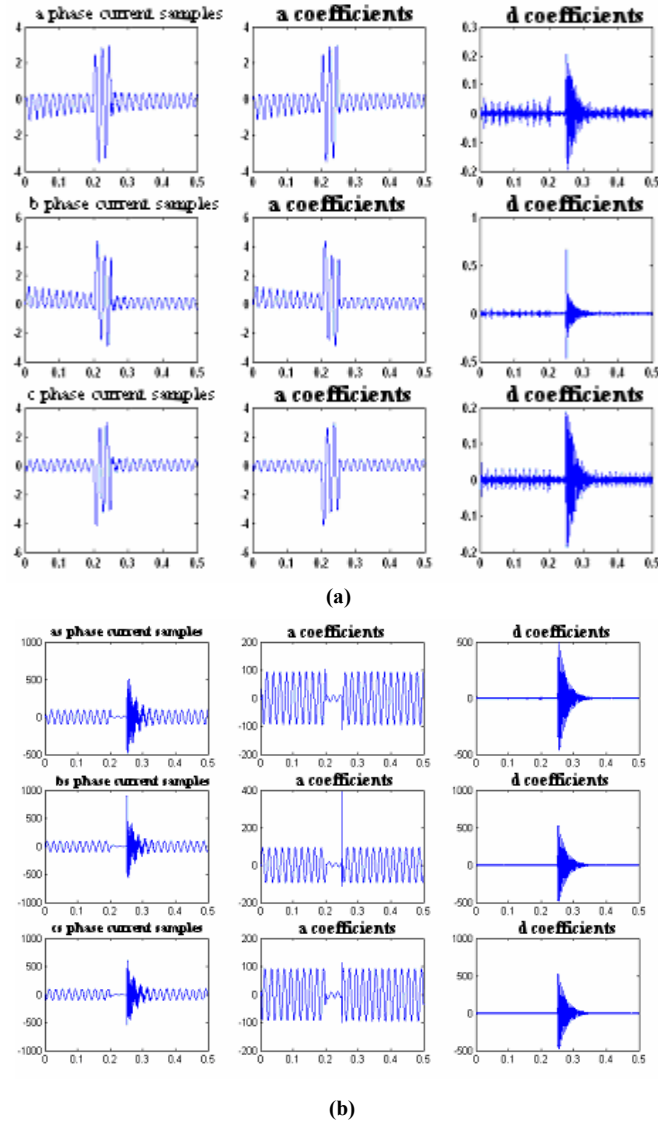


Figure 7. The simulation of symmetrical fault on secondary side, a) decomposition of primary currents and b) decomposition of secondary voltages.

Şekil 7. Boş çalışma anında ikincil yanda simetrik 3faz kısa devre arızasının benzeşimi, (a) Birincil yan akımları ve (b) ikincil yan gerilimlerinin dalgacık çözümleri

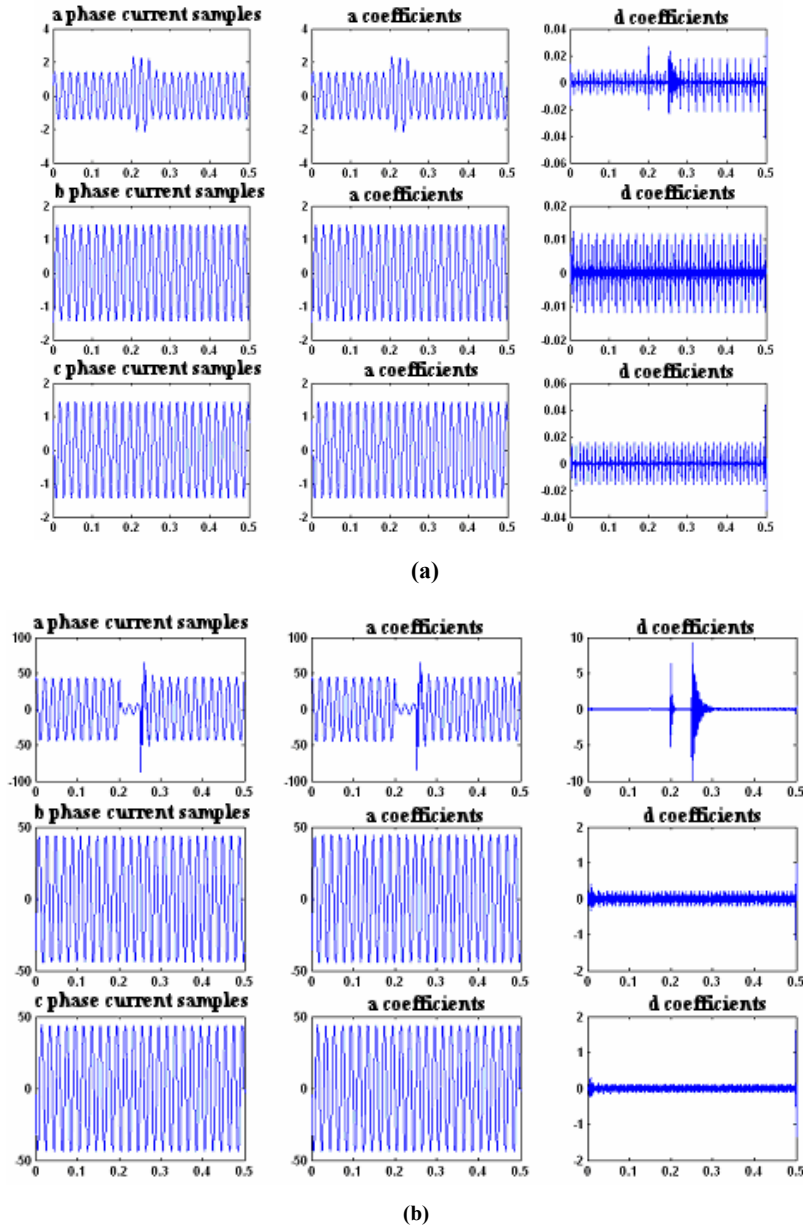


Figure 8. Simulation of phase to ground fault (for A phase), a) primary currents, b) secondary voltages
Şekil 8. R fazı-toprak arıza benzeşimi (a) birincil yan akımları ve (b) ikincil yan gerilimleri

Şekil 7 ve Şekil 8’de yatay eksen zamanı, dikey eksen ise genlik değerini ifade göstermektedir. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde her bir arıza durumu için ilgili yüksek frekanslı bileşen katsayıları (D) ayırt edici özelliklere sahiptir. Elde edilen alçak frekans ve yüksek frekans katsayıları ters dalgacık dönüşümünde kullanıldı. Ters dalgacık dönüşümü sonucunda yapılan en büyük hatanın sıfıra çok yakın değerlerde olduğu gözlemlendi. Bunun nedeni benzeşim sonucunda elde edilen akım ve gerilim örneklerinde hiçbir gürültü seviyesinin olmaması ve tamamen ATP-EMTP ortamından alınan işaretler olmasıdır.

In Figure 7 and Figure 8, the horizontal axis gives time and vertical axis gives magnitude of each phase currents. As it is again seen from the Figure 7 and 8, D coefficients have distinctive features for the fault conditions. The A and D coefficients are also used for inverse wavelet transform. The error obtained from inverse wavelet transform is so small due to the current and voltage samples including no distortion because they are generated in ATP-EMTP environment.

3.4.Yüksek Frekans (D) Katsayılarının Yorumlanması

Bu bölümde, dalgacık katsayılarının yorumlanması amacıyla kullanılan en büyük olabirlik kuramından (EOK) ve uygulamalarından bahsedilecektir. Hesaplanan yüksek frekans katsayılarının mıknatıslenme anı, normal çalışma anı ve arıza anları gibi durumlar için ayırt edici katsayılar olduğu grafiksel olarak açıklanmıştır (Bkz. Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11). En büyük olabirlik yöntemi ile bu katsayılar MATLAB ortamında her bir benzeşim deneyi için sayısal yolla ayrık dağılım kullanılarak hesaplanmıştır.

EOK yöntemi bir çok dağılım fonksiyonlarını desteklemektedir. Bu dağılım fonksiyonlarından ayrık dağılım fonksiyonunu tercih edilmiştir. Elde edilen ayrık veriler bu dağılım fonksiyonlarından birine uygulanır. Bu sayede bu verilerin her birine dağılım fonksiyonunun özelliğine göre bir ağırlık değeri atanır. Yeni oluşan fonksiyonun en büyük olabirlik değeri o fonksiyonun ortalama değerini ve bu değerinde yer aldığı güven aralıklarını vermektedir.

Bölüm 3.5'de yüksek frekanslı dalgacık katsayılarının yorumlanmalarına yer verilmiştir.

3.5. Ani Mıknatıslenme Verilerinin Yorumlanması

Yaklaşık 150 adet değişik bağlantı gruplarında ve gerilim faz açılarında ani mıknatıslenme verileri 2000Hz örnekleme frekansında 0,5sn ve 1sn sürelerle alınmıştır. Arızasız koşullarda enerjilenme anlarına ve normal çalışma benzeşimlerinden elde edilen akım ve gerilim örneklerine Daubechies (4) ölçek ve ana dalgacık dönüşümleri uygulanmış olup, yüksek frekanslı D bileşenlerinin ayrık dağılımlı EOK yöntemi sonucunda en fazla akım için 0,1, gerilim için 1,1935 değerleri elde edildi. Aşağıdaki sonuçlar da irdelendiğinde, bu değerlerin altında kalan akım ve gerilim değerleri ani mıknatıslenme durumu olarak yorumlandı. Üstü ise arıza durumu olarak yorumlanmıştır. Bütün arıza durumları için EOK yöntemi sonucunda elde edilen değerleri 0,1 ve 1,1935 değerlerinden oldukça yüksek çıkmıştır.

3.4 Interpretation of D Coefficients

Maximum likelihood estimation (MLE) function is used to interpret D coefficients. The calculated D coefficients for the case of magnetizing inrush and fault conditions are distinctive features and this is shown graphically in Figures 9, 10 and 11. MATLAB is used for calculating MLE values of each transformed phase samples and discrete distribution function is used of MLE.

MLE function supports a lot of distribution functions. Equal weights are appointed to each transformed samples and the mean value of the obtained new density function is the MLE value of each phase currents or voltages. Section 3.5 describes the interpretation of magnetizing inrush currents.

3.5. Interpretation of Magnetizing Inrush Currents

Approximately 150 different types of magnetizing inrush conditions with different source triggering angles are performed with a sampling frequency of 2000Hz and the overall simulation time is chosen as either 0.5sec or 1sec. Under no load condition, the MLE values of each phase currents and voltages are 0.1 and 1.1935, respectively. The MLE values under these figures are interpreted as a magnetizing inrush condition and above these values, it is quoted as fault condition. For all fault conditions, the MLE values of each transformed phase samples are greater than 0.1 and 1.1935.

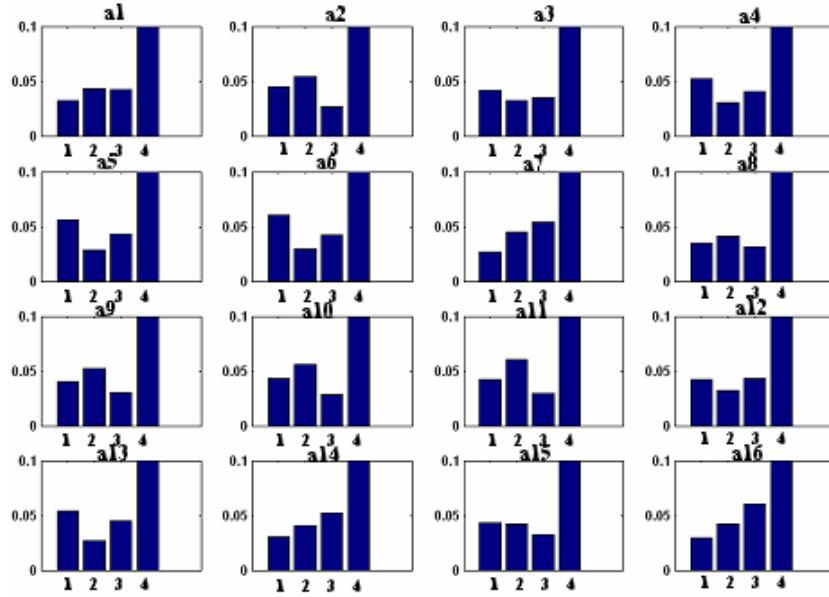


Figure 9. MLE values of inrush currents

Şekil 9. Ani mıknatıslanma akımının ayrıık düzgün dağılımlı EOK değerleri

Şekil 9'da görülen 4 nolu örnek laboratuvar transformatörü için seçilen ani mıknatıslanma durumunun eşik değeridir. 1, 2 ve 3 nolu örnekler ise her bir faz akımının EOK değeridir. İki değer diğerlerinden yüksek olmasının nedeni, enerjilenme anlarında gerilim faz açısına bağlı olarak iki faz geriliminin yüksek değerden diğerinin ise düşük değerlerden başlamasından ötürüdür. Daha öncede belirtildiği gibi yaklaşık 150 adet mıknatıslanma akımı benzeşimi gerçekleştirilmiş olup, Şekil 9'da bunlardan ilk 16'sının grafiği (a1 den a16'ya kadar) görülmektedir. Diğer benzeşim sonuçları da bu değerlere oldukça yakındır.

3.6 Arıza Benzeşimlerinden Elde Edilen Verilerin Yorumlanması

Arıza benzeşimleri şu deneysel çalışmaları kapsamaktadır:

- Boş çalışma anında ikincil yanda üç faz simetrik kısa devre
- Tam yükte ikincil yanda üç faz simetrik kısa devre
- Tam yükte ikincil yanda faz – toprak kısa devresi
- İkincil yanda 2 faz – toprak kısa devresi
- İkincil yanda 2 faz kısa devresi

Tüm bu kısa devre benzeşimleri tam yük ve değişik yük koşullarında yapılmış olup, mümkün olduğunca gerçek çalışma koşullarına yakın benzeşimler yapılmaya çalışılmıştır.

In Figure 9, the fourth value is chosen as the threshold value (for currents 0.1 and voltages 1.1935) and the first three values are MLE values of each current samples. The first two MLE values are always greater than the third one because in each case the two currents start with very high harmonic components while the third one includes less harmonic components. As it was quoted before, 150 types of inrush conditions are performed and the first 16 ones (from a1 to a16) are seen in Figure 9. The other ones give approximately the same results.

3.6. Interpretation of Fault Currents

Fault studies cover the following conditions:

- Symmetrical fault on the secondary side when the transformer is in no load.
- Symmetrical fault on the secondary side when the transformer is in rated load.
- Phase to ground fault on the secondary side when the transformer is in rated load.
- Two phase to ground fault on the secondary side.
- Phase to phase fault on the secondary side.

All the fault studies are performed with different load conditions to get realistic results.

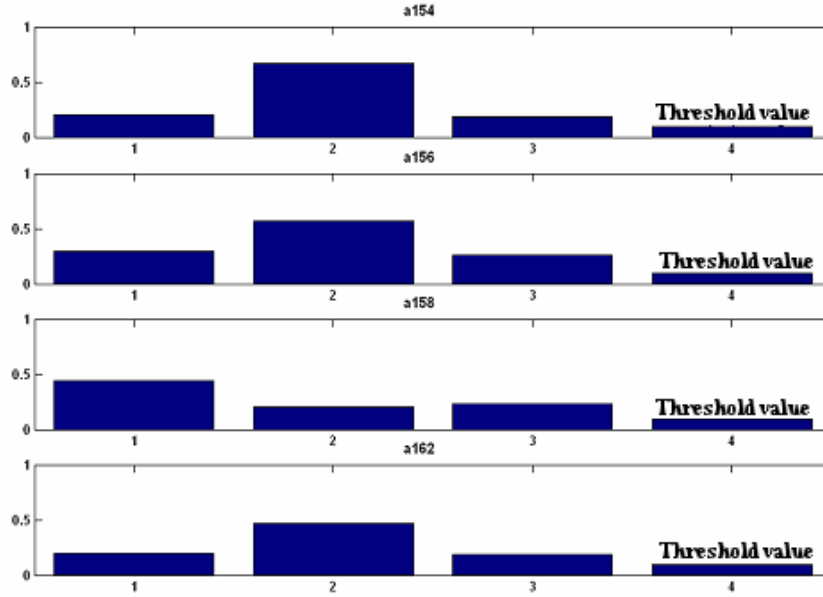


Figure 10. Symmetrical fault on secondary side when the transformer is in no load
Şekil 10. Boş çalışma anında ikincil yanda simetrik 3 faz kısa devre arızası

Şekil 10'da boş çalışma anında ikincil yanda gerçekleştirilen üç faz simetrik kısa devre arızasının çözülmesi görülmektedir. Benzer şekilde 4 nolu örnek birincil yan akımının EOK değeri olup şekilde "Normal Çalışma Değeri" olarak gösterilmiştir. Arıza anında faz akımlarının EOK değerlerinin bu değerden yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 11'de ise ikincil yanda gerçekleştirilen sırasıyla A fazı-toprak, B fazı-toprak ve C fazı-toprak arızalarının çözülmesi görülmektedir. Dokuz parçalı bu şekilde ilk sıra A fazı-toprak, sonraki üç sıra B fazı-toprak ve son üçlü grup ise C fazı-toprak arızalarına ait birincil yan akımlarının EOK sonuçlarıdır. Benzer şekilde 4 nolu örnek birincil yan akımının normal çalışma anındaki EOK değerini simgelemektedir. Her bir arıza türü için değişik transformatör bağlantı grupları kullanılmıştır. Farklı bağlantı gruplarında bile önerilen teknikte arıza durumlarının kolayca ayırt edilebileceği görülmektedir.

Çünkü her bir arıza koşulunda ilgili arıza akımının EOK değeri normal çalışma koşulundaki EOK değerinden oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir (9). Şekil 10'daki grafiklerin başlıkları ilgili analiz dosyasının adı olup, her bir analiz dosyası farklı bir çalışma durumunu simgelemektedir.

4.SONUÇLAR

Güç transformatörü koruması güncelliğini yitirmeyen, bilgisayar dünyasındaki gelişmelere koşut olarak hızla artan bir eğilim gösteren çalışma konusudur. Bu amaçla 1970'li yıllardan günümüze kadar bir çok sayısal koruma algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmaların temel kullanım alanı, ani miktatsızlanma akımı ve arıza akımları arasındaki farklı ortaya koymak içindir. Bu çalışmada;

- Günümüzde işaret ve görüntü işleme, haberleşme, tıp, matematik, uzay ve istatistik gibi alanlarda kullanılabilen dalgacık tekniğinin bu alandaki kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

In Figure 10, the fourth sample shows the calculated MLE value of current samples and it is called a "normal working condition". During the fault condition, it is clearly observed that the MLE values of each current samples are much greater than the value of normal working conditions.

In Figure 11, nine simulation studies including A phase to ground, B phase to -ground and C phase to ground faults are shown. The first three rows belongs to the MLE values of A phase to ground fault, the second three rows belong to the MLE values of B phase to ground fault and the third three rows belong to the MLE values of C phase to ground fault studies. Similarly, the fourth value is the calculated MLE value for secondary voltages. A different winding connection type is used for each fault condition. The proposed technique can easily discriminate the fault condition because the MLE value is much greater than the threshold value during fault condition (9).

4. RESULTS

Power transformer protection still attracts much attention due to the improvements in computer science. For this reason, a lot of numerical protection algorithms have been introduced since 1970 to discriminate magnetizing inrush and fault condition. In this work, the following outcomes are derived:

- The wavelet transform, which was originally used for picture processing, communication systems, statistical analysis etc., is used for digital signal processing.
- A number of simulation studies are performed by the help of laboratory experiments and wavelet transform

- b) Laboratuvar ortamında ve bilgisayar benzeşimleri sayesinde gerçekleştirilen çok sayıda enerjilenme durumu (ani miktatsızlanma akımı) ve olağan dışı çalışma durumları (dış arıza koşulları) irdelenmiş, örneklenmiş akım ve gerilim dalga şekilleri üzerine dalgacık tekniği uygulanmıştır.
- c) Yapılan çözümlenmelerin yardımıyla, zaman düzleminde frekansı değişen sinyallerin (ani miktatsızlanma akımı gibi) ve sinyaldeki süreksizlik noktalarının (arıza sinyallerinde) çözümlenmesinde dalgacık tekniğinin çok güçlü olduğu ortaya konmuştur.
- d) Karar verme algoritması olarak en büyük olabilirlik parametre tahmin yöntemi kullanılmış ve gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- is applied to both current and voltage samples.
- c) With the help of simulation studies, discontinuities of the current samples are easily identified in D coefficients.
- d) As a decision algorithm, maximum likelihood estimation is used and very satisfactory results are obtained.

REFERENCES/ KAYNAKLAR

1. Rahman, M.A, Jeyasurya B., "A State-of-the-art Review of Transformer Protection Algorithms", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 3, no.2, April (1988).
2. Habib, M., Marin, M.A., "A Comparative Analysis Of Digital Relaying Algorithms For The Differential Protection Of Three Phase Transformers," *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 3, No.3, August (1988)
3. Rahman, M.A., So, B., Zaman, M.R., Hoque, M.A., "Testing Of Algorithms For A Stand-Alone Digital Relay For Power Transformers," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.13, No.2, April (1998).
4. Rockfeller, G.O., "Fault Protection With Digital Computer," *IEEE Trans. On Power Apparatus And Systems*, Vol.PAS-88, No.4, April: 438-461 (1969).
5. Morante, M.G., Nicoletti, D.W., "A Wavelet Based Differential Transformer Protection," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 14, No.4, October:1351-1358 (1999).
6. Karimi, M., Mokhtari, H., Reza Iravani, M., "Wavelet Based On-Line Disturbance Detection For Power Quality Applications," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, October (2000).
7. Satish, L., B.I. Gururaj, B.I. , "Wavelet Analysis For Estimation Of Mean-Curve Of Impulse Waveforms Superimposed By Noise, Oscillations And Overshoot," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 16, No. 1, January (2001).
8. Littler, T.B., Morrow, Dr. D.J., "Wavelets For The Analysis And Compression Of Power System Disturbances," *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April (1999).
9. O. Özgönenel, Kocaman, Ç., "Wavelet Approach For Identification of Inrush Currents", *10. National Symposium on Electric, Electronic and Computer Engineering*, 14-17 September, İstanbul: 75-78 (2003).