

Dalgacık Tabanlı Transformatör Modelleme Tekniği

Okan Özgönel¹ Veli Türkmenođlu² Güven Önbilgin³

^{1,3} Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik – Elektronik Mühendisliđi Bölümü
Kurupelit, Samsun
² Ordu Üniversitesi
Ordu Meslek Yüksek Okulu, Ordu

¹e-posta: okanoz@omu.edu.tr ²e-posta: turkmen67@hotmail.com
³e-posta: gönbilgi@omu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada dalgacık tabanlı doğrusal olmayan transformatör modeli oluşturulmuştur. Önerilen modelleme teknik transformatörün tek faz eşdeğer devresi üzerine kurulmuştur. Önerilen bu yeni modelleme tekniğinde eşdeğer devrenin her bir elemanı (direnç, endüktans ve sığa gibi) düğüm gerilim ve akımlarının hesaplanması amacıyla dalgacık tabanlı eşitlikler ile ifade edilir. En iyi dalgacık seviyesi çok sayıda bilgisayar benzeşimleri yapılarak belirlenmiştir. Önerilen dalgacık tabanlı modelleme tekniğinin başarımı ATP-EMTP ortamından elde edilen veriler ile kıyaslanmıştır. Gerekli hesaplamalar için Matlab™ kullanılmıştır.

1. Giriş

Transformatörler güç sisteminin en pahalı ve vazgeçilmez elemanlarından biridir ve böyle bir elemanın yokluğu çok ciddi sonuçlara yol açabilir. Etkin ve gerçeğe yakın bir bilgisayar benzetimi ile transformatörün iç ve dış arızalar esnasında nasıl davranacağı önceden kestirilebilir. Günümüzde bu tip arızaların modellenmesi amacıyla çok sayıda çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada da dalgacıklar doğrudan işaret işleme tekniğinin aksine güç sistem elemanlarının modellenmesinde kullanılmıştır. Bu sayede güç transformatörlerinin ayrıntılı sarım – sarım ya da sarım – toprak arıza modelleri elde edilecektir. Ancak bu çalışmada sadece transformatörlerin doğrusal olmayan modeli incelenmiştir.

Modern güç transformatörleri üzerinde yapılan çalışmaların sonucunda, transformatörlerin devre dışı kalma oranlarının %70 - %80'nini iç sargı arızaları oluşturmaktadır. Bu kısa devreler sargı yalıtımının bozulması sonucunda yakın sargılar arasında veya sarımların kendi üzerinde oluşmaktadır. Genel olarak bu kısa devreler sarım – sarım ve sarım – toprak arızaları olarak adlandırılmaktadır [1].

Üç fazlı transformatör için sargı arızalarını temel alan transformatör modeli P. Bertrand ve arkadaşları tarafından tanımlanmıştır [2]. Temel olarak arızalı sargının iki ana parçaya ayrılması ilkesine dayanmaktadır. Bu temel ilke transformatörün diferansiyel koruması amacıyla da kullanılabilir. Bu model sayesinde çok çeşitli iç arıza türleri oluşturulabilmekte ve koruma algoritmasının davranışı önceden kestirilebilmektedir.

Peter Palmer-Buckle ve arkadaşları tarafından tek fazlı bir dağıtım transformatörünün iç arızaları incelenmiş ve uç davranışları deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. [2] nolu kaynakçada belirtilen matematiksel yöntem ATP-BCTRAN adlı yazılım kullanılarak bilgisayar ortamında benzeşimler gerçekleştirilmiştir [3].

H. Wang ve arkadaşları, dağıtım transformatörünün iç sargı arızalarını sonlu elemanlar tekniği ve yapay sinir ağları (YSA) kullanarak modellemişlerdir. Transformatörün sarım – sarım ve sarım – toprak arızaları elektromanyetik kuplaj ve yapısal sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Karar verme algoritması olarak da YSA kullanılmıştır. Yapılan benzeşimlerde transformatörün uç davranışları önceden kestirilmeye çalışılmıştır. ANSOFT'un Maxwell yazılımı bu amaçla kullanılmıştır [4], [5], [6].

Bu çalışmada, transformatörlerin doğrusal olmayan dalgacık tabanlı bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, laboratuvar ortamında deneysel üç fazlı transformatörün doyma karakteristiği çıkartılmış ve değişik yük koşulları altında birincil ve ikincil yan endüktanslarının dalgacık dönüşümleri modelleri gerçekleştirilmiştir. Hesap karmaşıklığından kaçınmak amacı ile kaçak endüktanslar hesaba katılmamıştır. Daha sonra her bir zaman aralığında düğüm gerilim ve akımları hesaplanarak kaydedilmiştir. Tüm hesaplamalarda haar dalgacık vektörleri kullanılmıştır. Önerilen hesaplama tekniği ile transformatörlerin iç arıza modellerinin kolayca elde edilebileceği önerilmiştir.

2. Genel Dalgacık Kuramı

Dalgacıklar son 15 yıl içerisinde bir çok mühendislik alanında başarı ile kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına örnek olarak, zaman ve frekans çözümlemesi, elektromanyetik çözümleme yöntemleri, sayısal süzgeçler, geçici durum analizleri, haberleşme, tıp, matematik, uzay, istatistik ve mali analizler, iki ve üç boyutlu resim işleme ve veri sıkıştırma teknikleri verilebilir. 1985'te Fransız matematikçisi Yves Meyer; Morlet ve Calderon'un çalışmaları arasında benzerlikler olduğunu ortaya koydu ve dik dalgacık temel fonksiyonlarını kurdu. Daha sonra Ingrid Daubechies, dalgacık biçimlerini geliştirdi ve Stephane Mallat'la birlikte sürekli işaret analizinden ayrık işaret analizine geçiş sağlandı 1986 yılında Mallat, Meyer ile birlikte ayrık dalgacık dönüşümünü (ADD) için çoklu çözünürlük analizini geliştirmiştir. 1992 yılında Albert Cohen, Jean Feauveau ve Daubechies "biortogonal dalgacıkları"

kurarken; J. Coifman, Meyer ve Victor Wicker Hauser çoklu çözünürlük analizinin doğal bir uzantısı olan “dalgacık paketlerini” geliştirdiler [7], [8], [9].

Bu çalışmada da, ADD kullanılarak sisteme ilişkin türev ve integral denklemlerinin çözümü amaçlanmıştır.

Herhangi sürekli bir $f(x)$ fonksiyonuna en iyi çözünürlük düzeyi $J = \log_2 N$ ile yaklaşılar ve dalgacık seriye açılırsa,

$$\begin{aligned} f_J(x) &= \sum_{k=0}^{N-1} c_k^J \phi_{J,k}(x) \\ &= \sum_{k=0}^{2^{J_{\min}}-1} c_k^{J_{\min}} \phi_{J_{\min},k}(x) + \sum_{j=J_{\min}}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^{j-1}-1} d_k^j \psi_{j,k}(x) \end{aligned} \quad (1)$$

Yukarıdaki eşitlik (1)'de, $\phi_{j,k}(x)$ ve $\psi_{j,k}(x)$ sırasıyla ölçek fonksiyonu $\phi(x)$ ve ana dalgacık $\psi(x)$ 'dan türetilmektedir. N örnek sayısı olarak ifade edilmektedir. c_k^j katsayısı orijinal işaretin dalgacık düzlem düz bilgisini, d_k^j katsayısı aynı işaretin dalgacık düzlem detay bilgisini ifade eder. J_{\min} en temel düzey çözünürlüğü göstermektedir.

İleri dalgacık dönüşüm için d_k^j dalgacık katsayısı Eşitlik (2) ile hesaplanır. Ters dalgacık dönüşüm katsayısı c_k^j ise Eşitlik (3) yardımıyla bulunur.

$$c_k^{j-1} = \sum_l h_{l-2k}^j c_l^j \quad (2)$$

$$d_k^{j-1} = \sum_l g_{l-2k}^j c_l^j$$

$$c_k^j = \sum_l [h_{k-2l}^{j-1} c_l^{j-1} + g_{k-2l}^{j-1} d_l^{j-1}] \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitliklerde, $h^j(k)$ ve $h(k)$ ölçek fonksiyonuyla bağlantılı ileri ve ters yüksek-geçiren süzgeç katsayıları, $g^j(k)$ ve $g(k)$ dalgacık fonksiyonuyla bağlantılı ileri ve ters alçak geçiren süzgeç katsayıları olarak ifade edilir.

Çoklu çözünürlüklü çözümleme açılım şekli DWT matrisiyle ifade edilebilir. Bu matristeki elemanlar h ve g süzgeciyle hesaplanır. Eğer dalgacık dönüşümü ortogonal ise aşağıdaki ilişkiye sahiptir,

$$IDWT = DWT^{-1} = DWT^T \quad (4)$$

3. Modelleme Tekniği

3.1 Dalgacık Düzleminde Doğrusal Direnç Modeli

Sürekli zaman düzleminde R direncinin $V-I$ karakteristiği $v(t) = R * i(t)$ olarak tanımlanabilir. J çözünürlük seviyesinde $v(k)$ ve $i(k)$ k. örnekler olduğunu kabul edersek, gerilim ve akım dalga şekillerine aşağıdaki gibi yaklaşılabılır [10], [11].

$$\begin{aligned} v(t) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} v(k) \Phi_{j,k}(t) \\ i(t) &= \sum_{k=-\infty}^{+\infty} i(k) \Phi_{j,k}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

Sonlu uzunluktaki bir işaret için, $V = R * I$ olur.

Eşitlik 5'de V ve I matrisleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\begin{aligned} V &= [v(1) \dots v(j) \dots v(N)]^T \\ I &= [i(1) \dots i(j) \dots i(N)]^T \end{aligned} \quad (6)$$

V gerilim ve I akımının DWT katsayı vektörleri WV , WI olsun.

En temel çözünürlük seviyesi olarak sıfır seçilirse Eşitlik 8 elde edilir.

$$\begin{aligned} WV &= DWT * V = [cv..WV_s^T]^T \\ WI &= DWT * I = [ci..WI_s^T]^T \end{aligned} \quad (7)$$

Eşitlik 8'deki WV matrisi aşağıdaki gibidir.

$$WV = R * U * WI \quad (8)$$

Burada U birim matrisi, cv ve ci gerilim ve akım dalga şeklinin DC bileşenlerini, WI_s ve WV_s dalgacık katsayılarını ifade eder. Direnç için geçici durum modelini aşağıda Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Dalgacık düzleminde omik direncin modellenmesi

3.2 Dalgacık Düzleminde Doğrusal Endüktans Modeli

Sürekli zaman düzleminde bir L endüktansının $V-I$

karakteristiği $v = L * \frac{di}{dt}$ dir. Eşitlik 5'e en iyi çözünürlük seviyesi uygulanırsa (9) nolu eşitlik elde edilir.

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} v(k) \Phi_{j,k}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{L}{\Delta t} \left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty} i(k) \Phi_{j,k}(t) - \sum_{k=-\infty}^{+\infty} i(k) \Phi_{j,k}(t - \Delta t) \right) \quad (9)$$

En iyi çözünürlük seviyedeki en küçük aralık örnekleme periyodu ΔT ve $\Phi_{j,k}(t - \Delta t) = \Phi_{j,k+1}(t)$ olursa, yukarıdaki eşitlik aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir ve (10) nolu eşitlik elde edilir.

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} v(k) \Phi_{j,k}(t) = \frac{L}{\Delta T} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (i(k) - i(k-1)) \Phi_{j,k}(t) \quad (10)$$

Bundan dolayı ayrık zaman aralığında $(0 \dots N\Delta T)$ geçici durum için aşağıdaki ifade oluşturulur.

$$V = L * D_T * I - L * i(0) * VL0 \quad (11)$$

Burada ilk değer $i(0)$ verilir.

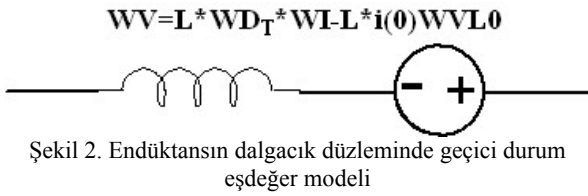
$$VL0 = 1/\Delta T [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (12)$$

$$D_T = \frac{1}{\Delta T} \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$WVLO$, VLO 'ın DWT katsayı vektörü ise, dalgacık düzleminde gerilimin ifadesi şöyle verilir.

$$WV = L * WD_T * WI - L * i(0) * WVLO \quad (14)$$

Burada WD_T , N boyutunda geçici durum fark operatörü, $L * WD_T$ endüktans dalgacık düzlem empedansı olarak ifade edilir. Aşağıda Şekil 2' de endüktans geçici durum eşdeğer modeli verilmiştir. Burada eşdeğer devre endüktansdan geçen akımın ilk durumuyla hesaplanan bir gerilim kaynağı ve dalgacık düzlem empedansıyla gösterilmektedir.

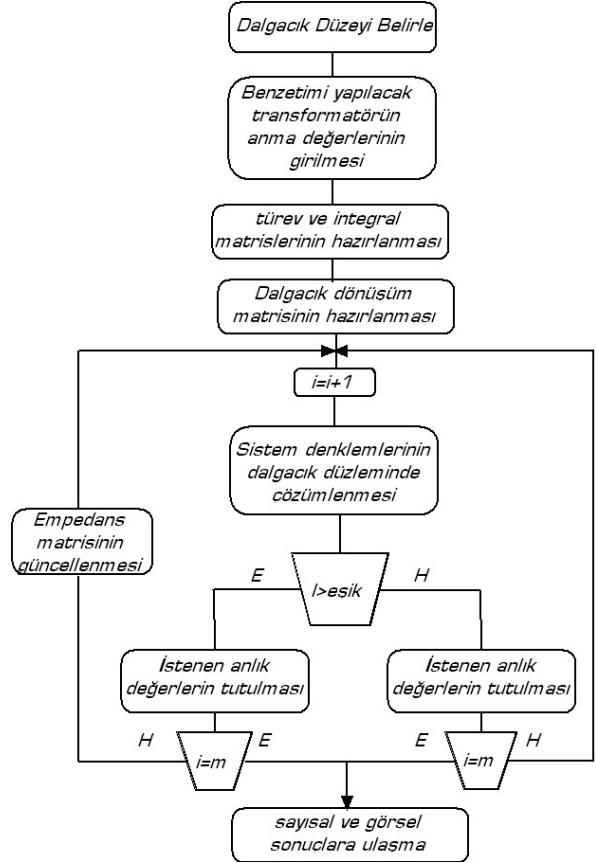


Şekil 2. Endüktansın dalgacık düzleminde geçici durum eşdeğer modeli

Türev ve integral denklemlerinin dalgacık tabanlı çözümlerinde aşağıdaki sırasıyla adımlar uygulanır.

- Dalgacık düzeyi belirlenir.
- Benzetimi yapılacak transformatör parametreleri girilir.
- Diferansiyel denklem çözümü için türev ve integral katsayı matrisleri hazırlanır.
- Dalgacık dönüşüm katsayı matrisleri hazırlanır.
- Sistem denklemleri dalgacık düzlem çözümü yapılır.
- Transformatör akım değeri eşik akımdan fazla ise endüktansın değeri değiştirilerek empedans matrisi güncellenir. Transformatör akımı eşik akımından küçükse çözülmeye devam edilir.
- Yapılan çözümler sonunda istenen görsel ve rakamsal sonuçlara ulaşılır.

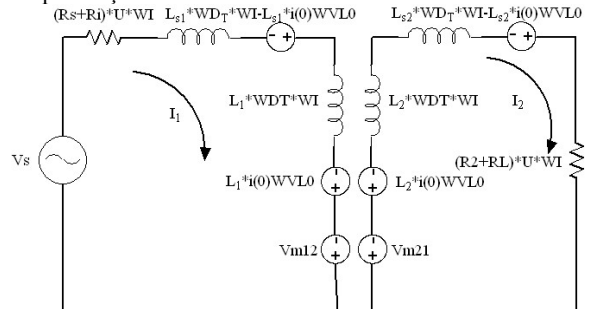
Öne sürülen benzetim dizgesi Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Dalgacık tabanlı çözümler için benzetim dizgesi

4. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalarda tek fazlı, 1000 VA, 220/110V, B=1T verilerine sahip bir transformatör kullanılmıştır. Sargı arızalarını modellemek amacıyla hem birincil hem de ikincil yanda çok sayıda kademe sargıları dışarı çıkartılmıştır. Ancak bu çalışmada sadece transformatörün dalgacık tabanlı modellenmesine yer verilecektir. Temel deneysel sayesinde transformatörün doyma eğrileri elde edilmiştir. İkincil yan endüktansı her bir benzetim adımında birincil yan endüktansının dönüştürme oranının karesine bölünerek hesaplanmıştır.



Şekil 4. Benzetimi yapılan transformatör dalgacık eşdeğer devresi

Şekil 4'de benzetimi gerçekleştirilen transformatörün dalgacık tabanlı eşdeğeri görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere, kaçak akımlar ve karşılıklı endüktanslar da birer endüktans gibi modellenmiştir. L_{s1} ve L_{s2} sırasıyla birincil ve ikincil yan kaçak endüktansları, L_1 ve L_2 sırasıyla birincil ve ikincil yan endüktanslarını, R_1 ve R_2 birincil ve ikincil yan sargı

dirençlerini, R_L yük direncini, V_{m12} ve V_{m21} de karşılıklı kuplajı simgeleyen akım bağımlı gerilim kaynaklarını göstermektedir.

Benzeşim esnasında daha gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek amacıyla 2000Hz'de örneklenmiş birincil yan gerilimi giriş olarak kullanılmıştır. Başka bir deyişle giriş gerilimi Matlab ortamında sentetik olarak oluşturulmamıştır.

En uygun dalgacık seviyesi olarak $j=7$ seçilmiştir. Dalgacık çözümleme seviyesinin artması daha hassas sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır ancak bu durumda çözümleme zamanı da artmaktadır. Benzetimde kullanılan haar dalgacık matrisleri aşağıdaki kod parçacığı ile hesaplanmaktadır.

```
a=0;
mat=zeros(n,n);
a1=1;
for j=1:n,
    if j<n+1&j==a1,
        mat(j,1+a:2+a)=0.5;
    else
        mat(j,j-1)=0.5;
        mat(j,j)=-0.5;
        a1=j+1;
    end
    a=a+1;
end
haar=sparse(sqrt(2)*(mat));
```

Daha sonra dalgacık tabanlı türev ve integral matrisleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

Yukarıdaki kod parçacığından da görüleceği gibi bu matrisler seyrek matris şeklindedir ve hesaplamalarda zaman tasarrufu sağlamaktadır.

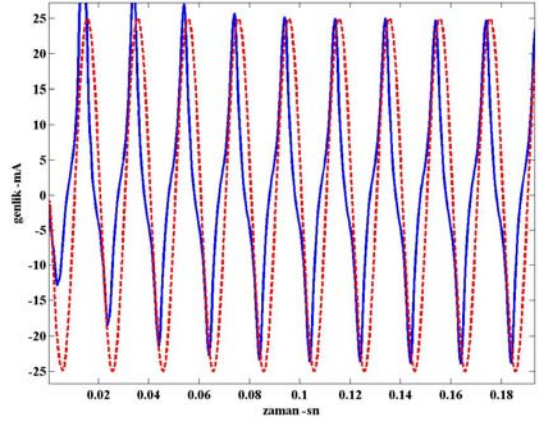
```
U=sparse(DT*INT);
WDT=sparse(haar*DT*haar');
WINT=sparse(haar*INT*haar');
```

Deney transformatörünün doğrusal olmayan birincil yan endüktansının, L_1 , karakteristiği aşağıdaki gibidir.

```
if abs(I1(k))>=0 & abs(I1(k))<0.11
    Li=7;
elseif abs(I1(k))>=0.11 & abs(I1(k))<0.3326
    Li=2.1;
elseif abs(I1(k))>=0.3326 & abs(I1(k))<1.12
    Li=0.62;
elseif abs(I1(k))>=1.12 & abs(I1(k))<2.33
    Li=0.296;
elseif abs(I1(k))>2.33
    Li=0.25;
end
```

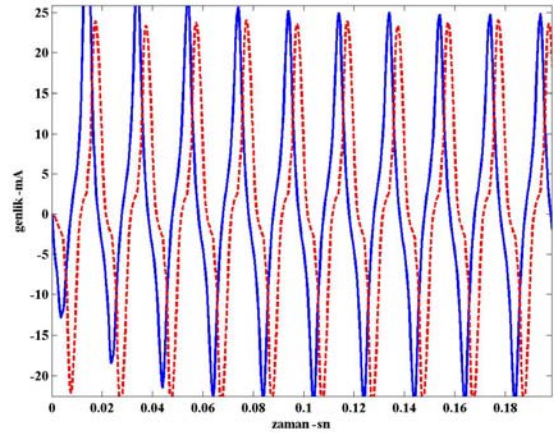
Yukarıdaki kod parçacığında I_1 , k benzeşim anında birincil yan akımının değerini, L_i ise buna karşılık gelen endüktans değerini göstermektedir.

Aşağıdaki şekillerde değişik çözümleme seviyelerinde birincil akımları görülmektedir.



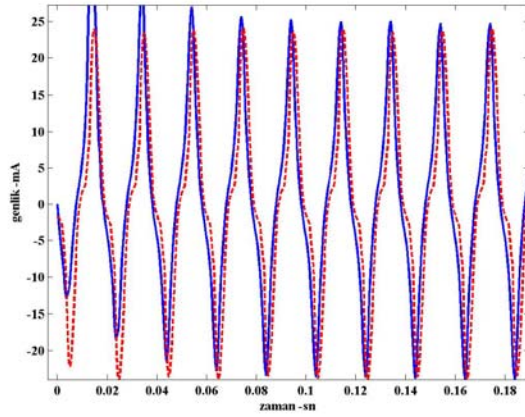
Şekil 5. Birincil yan akımının benzeşimi, $j=5$

Şekil 5'de birincil yan akımının hem ATP-EMTP ortamında (sürekli çizgi) hem de dalgacık tekniği (kesik çizgi) ile hesaplanması görülmektedir. Dalgacık seviyesi $j=5$ olarak seçilmiştir. Görülmektedir ki, ATP-EMTP ile daha gerçeğe yakın bir çözüm elde edilmiştir.



Şekil 6. Birincil yan akımının benzeşimi, $j=7$

Benzer şekilde, Şekil 6'de birincil yan akımının hem ATP-EMTP (sürekli çizgi) hem de dalgacık tekniği (kesik çizgi) ile hesaplanması görülmektedir. Dalgacık seviyesi $j=7$ olarak seçilmiştir. Görülmektedir ki, ATP-EMTP ile elde edilen sonuca yaklaşılmıştır.



Şekil 7. Birincil yan akımının benzeşimi, $j=9$

Son olarak, Şekil 7’de birincil yan akımının hem ATP-EMTP (sürekli çizgi) hem de dalgacık tekniği (kesik çizgi) ile hesaplanması görülmektedir. Dalgacık seviyesi $j=9$ olarak seçilmiştir. Görülmektedir ki, ATP-EMTP ile elde edilen sonuca oldukça yaklaşılmıştır. Ancak çözümleme süresi uzamıştır.

Her üç şekilde de benzetimin ilk anlarındaki farklılıklar başlangıç koşullarından kaynaklanmaktadır. Kaynak direncinin eklenmesiyle (yaklaşık 100Ω) her iki eğride başlangıç anında birbirine çok yaklaşmaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada güç sistemlerinin vazgeçilmez bir elemanı olan transformatörlerin ayrık dalgacık tabanlı bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. ATP-EMTP kullanılarak elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiş olup, sayısal türev ve integral denklemlerinin çözümünde alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir. Doğasında ayrık bir yöntem olan dalgacık tekniği kolay bir şekilde enerji sistemlerinin geneline uygulanabilir.

Gelecek çalışmada; başka dalgacık vektörlerinin kullanımı ve haar dalgacıklarla karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca etkin bir dalgacık tabanlı iç arıza modeli oluşturularak, transformatörlerin sarım – sarım ve sarım – toprak arızaları sonucunda nasıl davranacağını önceden kestirmek mümkün olacaktır.

6. Kaynakça

- [1] P. P. Buckle, K. L. Butler, N. D. R. Sarma, A. Kopp “Simulation Of Incipient Transformer Faults”, Power System Automation Laboratory Texas A&M University, College Station, TX
- [2] P. Bastard, P. Bertrand, M. Mevner “A Transformer Model For Winding Faults Studies”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994
- [3] Palmer-Buckle, P.; Butler, K.L.; Sarma, N.D.R, “Characteristics of Transformer Parameters During Internal Winding Faults Based on Experimental Measurements”, Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE, Volume 2, 11-16 April 1999 Page(s):882 - 887 vol.2.
- [4] Wang, H.; Butler, K.L, “Finite Element Analysis of Internal Winding Faults in Distribution Transformers”,

Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 16, Issue 3, July 2001 Page(s):422 – 428.

- [5] Wang, H.; Butler, K.L, “Neural Network Modeling of Distribution Transformers With Internal Short Circuit Winding Faults”, Power Industry Computer Applications, 2001. PICA 2001. Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference on, 20-24 May 2001 Page(s):122 – 127.
- [6] Hang Wang; Butler, K.L, “Modeling Transformers With Internal Incipient Faults”, Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 17, Issue 2, April 2002 Page(s):500 – 509.
- [7] G. S. and T. Nguyen, “Wavelets and Filter Banks”, Wellesley-Cambridge Pres, 1996
- [8] C.K.Chui, “An Introduction to Wavelet” Academic Press Inc, 1992
- [9] L. Larry, Schumaker and Glean Webb, “Recent Advances in Wavelet Analysis”, Boston: Academic Press, c1994.
- [10] T. Zeng, E. B. Markam, A. A. Girgis, *Power System Transient and Harmonic Studies Using Wavelet Transform*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, October 1999.
- [11] J. Liu, *Wavelet Modeling of Power Transients*, Ph.D Dissertation, Clemson University, 2000.