

# Güç Trafosu için Dalgacık Tabanlı Fark Koruma Algoritması

## Wavelet Transform Based Differential Protection Algorithm for Power Transformer

Merve ERTAN, Okan OZGONENEL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun  
merve.ertan@omu.edu.tr, okanoz@omu.edu.tr

### Özet

İletim ve dağıtım hatları içinde yer alan güç trafolarının korunması önemli bir konudur. Bu amaçla yapılan birçok çalışmada çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında güvenilirliği sebebiyle fark koruma yöntemi yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Yine de yöntemin göstermiş olduğu bazı yetersizlikler bu yönde çalışan bilim insanlarını bu yöntemi geliştirme yoluna itmiştir. Bu çalışmada, dalgacık tabanlı fark koruma yöntemi için yeni bir bakış açısı geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güç Trafosu, Fark Koruma, Dalgacık Dönüşümü, Mıknatıslanma Akımı, İç Arıza.

### Abstract

Protection of power transformers take part in transmission and distribution lines is an important issue. For the reason, there are many studies which improve various methods on the subject. Among the methods, differential protection method is commonly used because of its reliability. On account of some challenging points in the method, people who study on differential protection, tries to improve the method. This paper improves a new point of view to wavelet transform based differential protection algorithm for power transformers.

**Key Words:** Power Transformers, Differential Protection, Wavelet Transform, Inrush Current, Internal Faults.

## 1. Giriş

İletim ve dağıtım sistemleri içinde yer alan güç trafoları, sistemin sürekliliği açısından hayati öneme sahiptir. Güç trafosunda oluşan bir arıza, sisteme uzun süre enerji verilememesine sebep olabilir. Ayrıca trafonun onarım ve değiştirme maliyetlerinin yüksek olması güç trafosu korumasını daha da önemli hale getirmektedir. Dolayısıyla güç trafoları, sürekli izlenmesi gereken ve arıza durumlarında hızlı koruma gerektiren devre elemanlarıdır [1]. Güç sistemlerinde oluşan arızaların %10'u güç trafolarından kaynaklanmaktadır; bunların da %70'i sargılar arası kısa devre arızalarıdır [2].

10MVA ve üzeri güçteki trafoların korunmasında fark koruma yöntemi yaygın olarak kullanılır [3]. Fark koruma yöntemi, sadece trafo iç arızalarında devreye girer ve dış arızalara karşı

da sistemin kararlılığını sağlar [4]. Böylelikle sadece iç arıza durumlarında koruma sistemi tepki vererek, en küçük bölgenin etkilenmesi sağlanır, arıza ve enerji maliyetleri en aza indirgenmiş olur. Yine de trafo fark koruma röleleri, trafonun enerjilendirilmesinden kaynaklı mıknatıslanma akımı olduğu durumlarda sanki arıza varmış gibi tepki vermeye yatkındır. Bu nedenle mıknatıslanma akımı ile arıza akımı arasındaki ayrımın doğru yapılması çok önemlidir [5].

Trafo korumasında mıknatıslanma akımı ve arıza akımı arasındaki ayrımın doğru yapılabilmesi için birçok yöntem önerilmiştir. Bunlardan biri olan, hâlihazırda sayısal koruma röleleri içinde kullanılan harmonik kısıtlar ve harmonik sınırlama yöntemlerine [6]'da değinilmiştir. Bu harmonik tabanlı yöntemde ikinci harmonik dikkate alınır. Çünkü mıknatıslanma akımı sırasında ikinci harmonik temel harmoniğin yaklaşık %60'ına kadar ulaşmaktadır. Buradan yola çıkarak mıknatıslanma akımı ve iç arıza akımının birbirinden ayırt edilmesi düşünülür [7]. Bu yöntem çoğu mıknatıslanma akımı durumlarında doğru sonuç verirken bazı arıza durumlarında zayıflık göstermektedir. Ayrıca yeni geliştirilen, mıknatıslanma anında ikinci harmoniği %60'tan düşük olan çekirdek yapısına sahip trafolar için uygun değildir [8].

Son dönemde yapılan çalışmalarda trafo fark koruma algoritması içinde kullanılmak üzere işaret işleme ve yapay zekâ yöntemleri üzerine durulmuştur.

İşaret işleme yöntemlerinden biri olan dalgacık dönüşümü yöntemi ile bir trafoda anlık oluşan durağan olmayan değişimler izlenerek mıknatıslanma akımı ile iç arıza akımı ayırt edilebilmektedir. Bu çalışmada dalgacık tabanlı fark koruma algoritması incelenmiştir.

## 2. Araçlar ve Yöntem

### 2.1. Fark Koruma İşlevi

Fark koruma işlevi, trafonun birincil ve ikincil yan akımlarının karşılaştırılması esasına dayanır. Bu işlem yapılırken birincil ve ikincil yan akımları arasında oluşan yük ve trafo kaynaklı faz farkı yok edilmeli ve dönüştürme oranının etkisini de yok edecek işlemler yapılmalıdır. Bu işlemler

deney sırasında kullanılan akım trafolarının seçimiyle veya hesap sırasında doğru katsayıların seçimiyle sağlanabilir.

Fark Koruma işlevinde oluşturulan akımlar (1) ve (2)'deki gibidir.

$$i_D = i_1 - i_2 \quad (1)$$

$$i_R = \frac{i_1 + i_2}{2} \quad (2)$$

(1)'de elde edilen akım fark akımını (2)'de elde edilen akım ise kısıtlama akımını ifade etmektedir. Fark koruma algoritmasına göre bu akımlar karşılaştırılır, trafonun niteliğine göre bir sınır katsayısı belirlenerek olağan çalışma, enerjilenme anı veya arıza durumuna anlık olarak karar verilebilir [9]. Bunun için röle içine çeşitli algoritmalar işlenir. Bu çalışmada dalgacık dönüşümü kullanılmıştır, dalgacık katsayılarından enerji işareti üretilerek karar aşamasına geçilir. Böylelikle karar alma sağlanabilir. Bu işlev 87 standardı olarak bilinir. Dalgacık katsayıları için oluşturulduğunda bu standart 87W olarak adlandırılır [10].

## 2.2. Dalgacık Dönüşümü

Zaman-frekans düzlemleri dönüşüm yöntemleri arasında en çok bilinen Fourier Yöntemi durağan olmayan işaretlerin izlenmesi için uygun değildir. Bundan dolayı anlık işaret işlemek için farklı dönüşüm yöntemlerine başvurulmuştur. Bu yöntemlere örnek olarak kısa zamanlı Fourier dönüşümü ve ayrık dalgacık dönüşümü verilebilir. Her iki yöntemde de işaret bir dönem boyunca pencere işlevi kullanılarak işlenir. Böylelikle durağan olmayan işaretler kolaylıkla incelenebilmektedir. Dalgacık dönüşümünün kısa zamanlı Fourier dönüşümünden (short time Fourier transform- STFT) üstünlüğü çok çözümlü işlem yapılabilmesidir. STFT için sabit bir frekans değeri için tek çözümlü işlem yapılabilir [11].

Dalgacık dönüşümü işlevini gerçekleştirmek için işlenecek işaretin ana dalgacık aileleri olarak adlandırılan dalgacıkların yüksek ve alçak geçiren süzgeç özelliğindeki bileşenleriyle katlanır; dalgacık ve ölçekleme katsayıları (3) ve (4)'deki gibi elde edilir.

$$w(k) = \sum_{n=1}^L h'(n) * x(k+n-L) \quad (3)$$

$$s(k) = \sum_{n=1}^L g'(n) * x(k+n-L) \quad (4)$$

w(k), dalgacık katsayılarını, s(k) ölçekleme katsayılarını ifade etmektedir. g'(n) ve h'(n) alçak ve yüksek geçiren süzgeçleri ifade eder; L ise süzgeçlerin boyutunu temsil etmektedir [12].

Gerçek zamanlı analizlerde durağan dalgacık dönüşümü yöntemi olarak bilinen **modwt** ya da **swt** işlevi kullanılabilir. Bu işlev, ayrık zamanlı dalgacık dönüşümü olan **dwt** işlevinin aynısıdır. Tek farkı, dwt'de yapılan örnek sayısını yarıya indirme kısmı modwt yapılmadığından daha hızlı sonuç elde edilir, hesap yükü azaltılır. Bu nedenle bu çalışmada **modwt** kullanılmıştır.

Son olarak da bir dönem boyunca, dalgacık katsayıları elde edilmiş işaretin enerji işareti oluşturularak trafonun durumu hakkında yorum yapılabilir. Bunun için (5) denklemi kullanılır.

$$\mathcal{E}(k) = \sum_{n=k-\Delta k+1}^k x^2(n) \quad (5)$$

Burada  $\Delta k = \frac{f_s}{f}$  yani bir dönem boyunca alınan örnekleme adedini, k toplam örnekleme anındaki katsayıyı temsil eder.

Ölçekleme ve dalgacık katsayıları için ayrı ayrı enerji işaretleri (6) denklemini oluşturur.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}' + \mathcal{E}'' \quad (6)$$

$\mathcal{E}'$  : dalgacık katsayılarının enerjisi

$\mathcal{E}''$  : Ölçekleme katsayılarının enerjisi

Bu çalışmada dalgacık katsayısı yani yüksek frekans işaretleri üzerinde çalışılacaktır.

## 2.3. Yöntem

Bu çalışmada kullanılan iş akışı basamakları aşağıdaki gibidir:

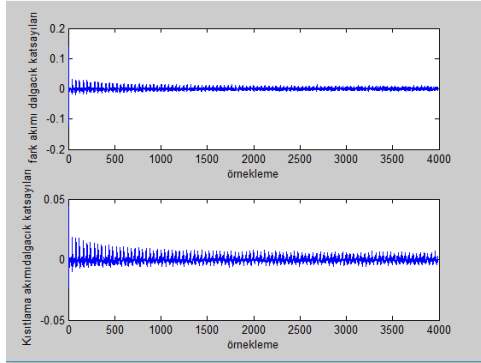
- Dalgacık tabanlı fark koruma yönteminin test edilmesi amacıyla Şekil 1'deki deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneğinden her biri 2 saniyelik olan, normal çalışma, enerjilenme (mıknatıslanma akımı), iç arıza ve mıknatıslanma akımı ile birlikte iç arıza bilgisi içeren, toplamda 70 adet örnek deney verisi elde edilmiştir.



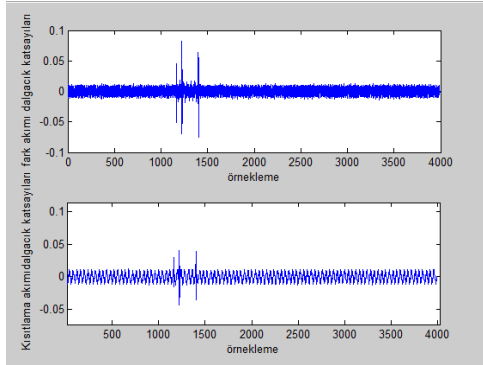
Şekil 1: Çalışmada kullanılan deney düzeneği

- Deney sırasında elde edilen birincil ve ikincil yan akım örnekleri arasında, trafo dönüştürme oranı ve üç fazlı trafonun yıldız üçgen bağlı olmasından kaynaklı hem genlik hem de faz farkı oluşmaktadır. Bu durumu gidermek için bazı dönüştürme işlemleri uygulanarak birincil ve ikincil yan akımları işlenebilir duruma getirilmiştir.
- Her bir örnek için birincil ve ikincil yan akımları kullanılarak fark ve kısıtlama akımlarını elde edebilmek için (1) ve (2) denklemlerinden yararlanılmıştır.
- Buraya kadar yapılan işlemler, normal çalışma ile iç arıza durumunu ayırt etmek için yeterlidir; Ancak iç arıza ile mıknatıslanma akımını ayırt etmek için fark koruma yöntemi tek başına yeterli değildir. Bu çalışmada fark koruma yöntemini geliştirmek için dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Dalgacık katsayıları elde edilirken **modwt** işlevinden yararlanılmıştır, ana dalgacık ailesi olarak da Daubechies(4) seçilmiştir. Dalgacık dönüşümü yapılırken her bir örnek anlık olarak yüksek ve alçak frekans bileşenlerine ayrılır. Bunun için (3) ve (4)'te gösterilen denklemler kullanılmıştır. Bu çalışmada fark koruma işlevinin karar algoritmasını

oluşturmak için elde dalgacık dönüşümü yapılarak elde edilen yüksek frekans bileşenleri (dalgacık katsayıları) kullanılmıştır. Şekil 2’de mıknatıslanma akımı için şekil 3’te arıza akımı için dalgacık katsayıları örnekleri görülmektedir.



Şekil 2: A fazı mıknatıslanma akımı dalgacık katsayıları

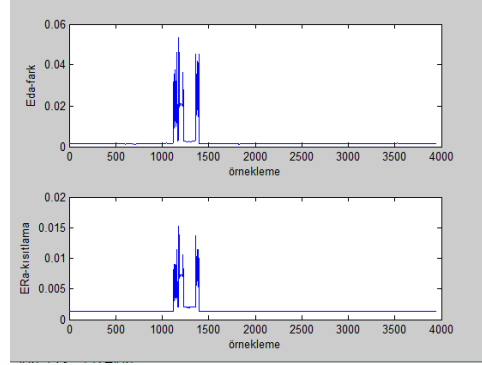


Şekil 3: A fazı iç arıza dalgacık katsayıları

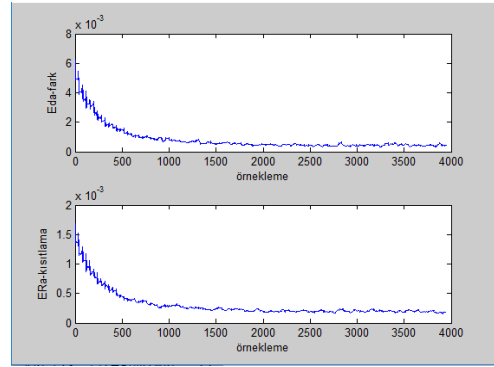
- Karar aşamasında fark ve kısıtlama akımlarının dalgacık katsayıları karşılaştırılarak bir sonuca varılır. Bu karşılaştırma farklı şekillerde yapılabilir. [13]’te dalgacık katsayılarının enerji dağılımına bakılarak veya etkin değerlerinden yararlanılarak yapılabileceği anlatılmıştır. Tabii bu aşamada gerçek zamanlı uygulama yapabilmek için kayar pencere yöntemi kullanılır. Bu çalışmada enerji dağılımı enerji dağılımı yapılmıştır. Denklem (5) yardımıyla fark ve kısıtlama akımlarının dalgacık katsayılarının enerji işaretleri elde edilmiştir. Kayar pencerenin genişliği için denklem (7) kullanılmıştır.

$$\Delta k = \frac{f_s}{f} \quad (7)$$

Burada  $f_s$  örnekleme frekansını,  $f$  sistem frekansını ifade eder. Bu çalışmada örnekleme frekansı 2000 Hz ve sistem frekansı 50 Hz olduğundan kayar pencere genişliği 40 örneği kapsar. Şekil 4’te örnek arıza verisi için, Şekil 5’te örnek mıknatıslanma verisi için enerji dağılımları görülmektedir.



Şekil 4: A fazı arıza fark ve kısıtlama akımlarının dalgacık katsayılarının enerjisi



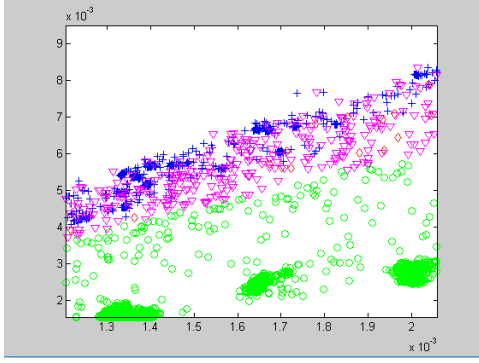
Şekil 5: A fazı mıknatıslanma akımı için fark ve kısıtlama akımlarının dalgacık katsayılarının enerji dağılımı

Bu çalışmada kısıtlama akımının enerjisi  $E_R$  fark akımının enerjisi  $E_d$  olarak gösterilmiştir. Denklem (8) fark koruma işlevinin karar işlevidir.

$$i_d = i_0 + k * i_R \quad (8)$$

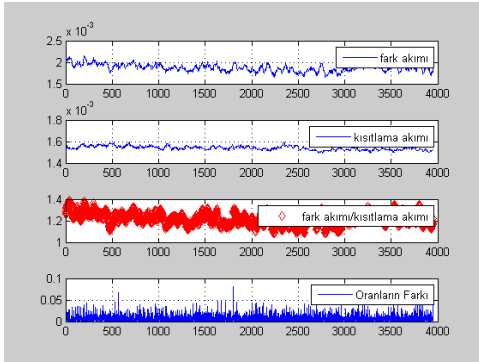
Burada  $i_d$  fark akımını,  $i_R$  kısıtlama akımını ifade etmektedir.  $k$  ve  $i_0$  da sırayla çalışma karakteristiğinin oranını ve rölenin çalışması için gereken asgari fark akımını ifade etmektedir [14].

Bu çalışmada  $i_d$  yerine  $E_d$ ,  $i_R$  yerine  $E_R$  kullanılmıştır. Dolayısıyla  $E_d/E_R$  için  $k$  katsayısı incelenmiştir. Normal çalışma örnekleri için  $k$  değeri 1,5 değerinin altında iken iç arıza mıknatıslanma akımı bilgileri içeren veriler 3,5 ile 5 arasında değişkenlik göstermektedir. Bu durum Şekil 6’da görülmektedir.

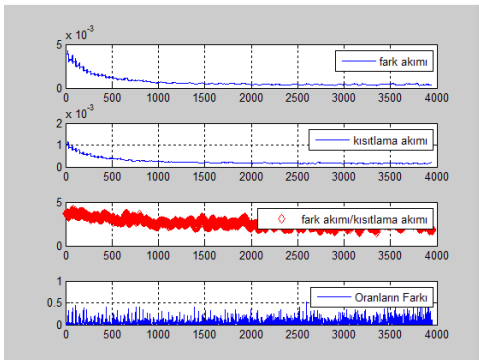


Şekil 6: A fazı birincil yan karakteristiğinden bir kesit

Şekil 6'da '+' miktatsızlanma akımını, '▽' birincil yan iç arızalarını, '○' normal çalışma koşullarını temsil etmektedir. Şekilde arıza ve miktatsızlanma akımları iç içe çıktığı için ayırım yapılamamaktadır. Dolayısıyla k katsayısı için belirlenemez. Ancak  $E_d/E_R$  oranının anlık değişimi gözlemlendiğinde sadece iç arıza anında anlık bir sıçrama olduğu Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'un c bölümlerinde görülmektedir.



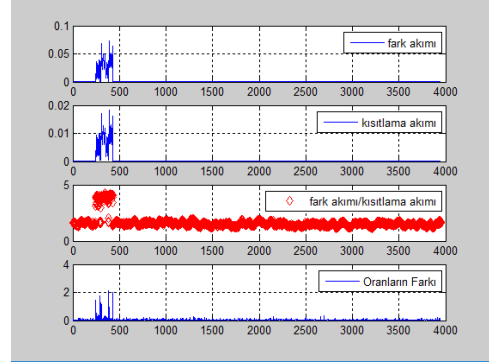
Şekil 7: Normal çalışma verileri için a. Fark akımının dalgacık katsayılarının enerji dağılımı b. Kısıtlama akımının dalgacık katsayılarının enerji dağılımı c. Fark akımı/Kısıtlama akımı ( $C = E_d/E_R$ ) d. C'nin örnekten örneğe değişimi



Şekil 8: Miktatsızlanma akımı verileri için a. Fark akımının dalgacık katsayılarının enerji dağılımı b. Kısıtlama akımının dalgacık katsayılarının enerji

dağılımı c. Fark akımı/Kısıtlama akımı ( $C = E_d/E_R$ ) d.

C'nin örnekten örneğe değişimi



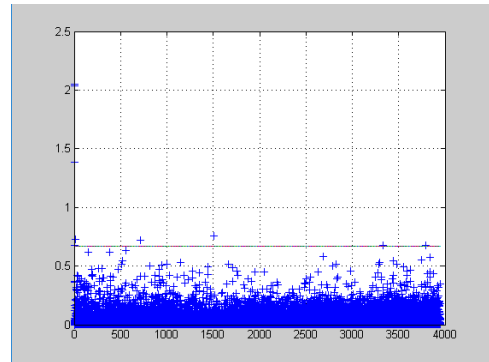
Şekil 9: İç arıza durumu verileri için a. Fark akımının dalgacık katsayılarının enerji dağılımı b. Kısıtlama akımının dalgacık katsayılarının enerji dağılımı c. Fark akımı/Kısıtlama akımı ( $C = E_d/E_R$ ) d. C'nin örnekten örneğe değişimi

Denklem (9) ve denklem (10)'de uyarlanmış k katsayısı görülmektedir.

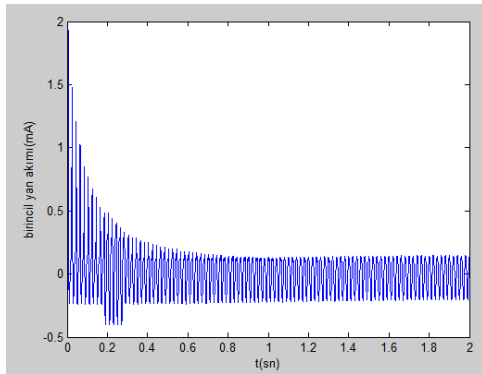
$$C(i) = E_d(i)/E_R(i) \quad (9)$$

$$k = C(i) - C(i-1) \quad (10)$$

Çalışmada kullanılan 70 adet veri incelendiğinde (10) denkleminde elde edilen k katsayısının sınır değeri bu çalışma için 0.67 seçilmiştir. Miktatsızlanma akımı bilgisi içeren neredeyse tüm anlık verilerin k katsayısının 0.67 değerinin altında kaldığı Şekil 10'da görülmektedir. Üstündeki değerler ise miktatsızlanma akımı örnek verilerinin normal çalışma zamanına aittir. Dolayısıyla  $i_0 = 0.9$  mA seçilerek bu kusurlar giderilebilmektedir. Ayrıca iç arıza bilgisi içeren verilerin yalnızca iki tanesi algoritma tarafından yakalanamamıştır. Yakalanamayan bu iki örnek veri hem miktatsızlanma akımı hem de iç arıza akımı içermektedir; Ayrıca arıza akımı aşırı sönümlü olduğundan miktatsızlanma akımı içine gömülmüştür. Örneği şekil 11'de görülmektedir.



Şekil 10: Miktatsızlanma akımı örneği içeren tüm verilerde k katsayısının durumu



Şekil 11: Fark edilemeyen arıza birincil yan akımı

### 3. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada, trafo koruması için yaygın olarak kullanılan fark koruma yöntemini güçlendirmek için, karar kısmına dalgacık dönüşümü tabanlı yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bunun için laboratuvar ortamında elde edilen veriler kullanılmıştır. 70 adet 2 saniyelik verilerde mıknatıslanma akımı, iç arıza, normal çalışma ve hem mıknatıslanma akımı hem de iç arıza bilgileri içeren birincil ve ikincil yan akım örnekleri bulunmaktadır. Örnek veriler gerekli dönüştürmeler yapılarak iyileştirildikten sonra fark koruma algoritmasına uygun olarak fark ve kısıtlama akım bilgilerine dönüştürülmüştür. Daha sonra da bu bilgiler dalgacık dönüşümü yardımıyla ölçekleme ve dalgacık katsayılarına ayrılmıştır. Dalgacık katsayılarından yararlanarak anlık enerji dağılımları gözlemlenmiştir. Fark koruma algoritmasına uygun olarak  $k$  katsayısı 0.67 seçilmiş ve yöntemin başarımı yalnızca 2 adet çok sönümlü iç arızayı kaçırması sebebiyle %97 olarak belirlenmiştir.

Yöntem diğer dalgacık dönüşümü uygulamalarından modwt kullanılarak oluşturulduğu için daha hızlı sonuç vermektedir. Ayrıca yaygın olarak kullanılan harmonik tabanlı yöntemlere göre herhangi bir sınırlama getirmediğinden başarımı daha yüksektir.

### 4. Kaynaklar

- [1] D. Barbosa, U. Netto, D. Coury, and M. Oleskovicz, "Power transformer differential protection based on clark's transform and fuzzy systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 2, pp. 1212–1220, 2011.
- [2] J. Blackburn and T. Domin, "Protective Relaying: Principles and Applications" Third Edition. Taylor & Francis, 2006.
- [3] "Ieee guide for protecting power transformers," *IEEE Std C37.91-2008(Revision of IEEE Std C37.91-2000)*, pp. 1–139, May 2008.
- [4] O. Ozgonenel, S. Karagol, "Transformer differential protection using wavelet transform," *Electric Power Systems Research* 114 (2014) 60–67
- [5] R. P. Medeiros, F. B. Costa, K. M. Silva, "Power Transformer Differential Protection Using the Boundary Discrete Wavelet Transform," *Transactions on Power Delivery*, DOI 10.1109/TPWRD.2015.2513778, IEEE
- [6] K. Behrendt, N. Fischer, and C. Labuschagne, "Considerations for using harmonic blocking and harmonic restraint techniques on transformer differential relays," *Journal of Reliable Power*, vol. 2, no. 3, pp. 36–52, 2011.
- [7] K. Bakırcıoğlu, "Diferansiyel Koruma," *Elektrik Mühendisliği* 214, UDK: 621.316.925.2
- [8] A. Guzman, S. Zocholl, G. Benmouyal, and H. Altuve, "Correction to a current-based solution for transformer differential protection-part ii: relay description and evaluation," *Power Delivery, IEEE Transaction on*, vol. 18, no. 2, pp. 660–660, 2003.
- [9] S. Horowitz and A. Phadke, *Power System Relaying*. Wiley, 2008. [Online]. Available: <https://books.google.com.tr/books?id=odHDAQAAQBAJ&printsec>
- [10] A. Phadke and J. Thorp, "Computer Relaying for Power Systems," Wiley, 2009.
- [11] F. Jurado and J. R. Saenz, "Comparison between discrete stft and wavelets for the analysis of power quality events," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 3, pp. 183–190, Jul. 2002.
- [12] F.B.Costa, B.A.Souza, N.S.D.Brito, "Real-Time Detection of Voltage Sags Based on Wavelet Transform," 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 978-1-4577-0487-1/10/\$26.00 ©2010 IEEE
- [13] F. B. Costa and J. Driesen, "Assessment of voltage sag indices based on scaling and wavelet coefficient energy analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 1, pp. 336–346, Jan. 2013.
- [14] R. P. Medeiros, F. B. Costa, and J. F. Fernandes, "Differential protection of power transformers using the wavelet transform," *IEEE PES Gen. Meeting*, 2014.