

Kısmi Boşalma Ölçümü ve Çoklu Çözünürlük Analizi ile Gürültü Süzme Partial Discharge Measurement and De-noising with Multi-Resolution Analysis

Özkan Altay, Özcan Kalenderli

Elektrik-Elektronik Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
ozkanaltay@gmail.com, kalenderli@itu.edu.tr

Özet

İşletmede gerilim altındaki yüksek gerilim aygıtlarında meydana gelebilecek kısmi boşalmalar zamanla delinme, kısa devre, sistem arızası, enerji kesilmesi gibi büyük problemlere neden olabilirler. Bu nedenle, yapılması gereken iş, elektriksel yalıtım malzemelerindeki hataların erken tanısını sağlamaktır. Gerek laboratuvar ortamında, gerekse işletmede gerilim altında yapılacak kısmi boşalma ölçümleri genellikle ortam ve ölçüm devresi kaynaklı gürültüye maruz kalır ve bu etkiler ölçüm sonuçlarının doğru değerlendirilmesine engel olur. Bu çalışmada, çoklu çözünürlük analizinin laboratuvar ortamında elde edilen kısmi boşalma verilerinden gürültü süzmek amacıyla kullanımı sunulmuştur. Belirtilen yöntemin deney sonucu elde edilen kısmi boşalma işaretlerine uygulanmasıyla gürültüden arındırılan işaretlerden kısmi boşalma büyüklüklerinin doğru olarak belirlenmesi olanaklı hale getirilmiştir.

Abstract

Partial discharges which may occur in high-voltage devices under operation can cause major problems in time such as, breakdown, short circuit, system failure and power interruption. Therefore the work to be done is to ensure early detection of failures in electrical insulating materials. Partial discharge measurements conducted both in laboratory environment or on-site are usually exposed to noise originated from measurement circuit or surrounding environment and these effects prevent reasonable evaluation of measurement results. In this study, use of multi-resolution analysis in order to filter out noise from partial discharge data acquired in a laboratory is presented. By applying the defined method to acquired partial discharge signals it has been made possible to determine partial discharge parameters accurately from the de-noised signals.

1. Giriş

İki elektrot arasında bulunan bir yalıtkanın yalnızca bir bölümünde olan ve elektrotları köprülemeyen yerel elektriksel boşalmalara kısmi boşalma (KB) veya korona adı verilir.

Kısmi boşalmaların ölçülmesinde, kısmi boşalmaların enerji dönüşümü sonucu ortaya çıkan etkilerinden yararlanılır. Bu etkiler, akım darbeleri, dielektrik kayıpları ve elektromanyetik dalga yayılması gibi elektriksel etkiler ve ısı, ışık, ses ve kimyasal bozulmalar gibi elektriksel olmayan etkilerdir. Ölçmelerde bu etkilerden en çok elektriksel KB darbelerinden yararlanılır. KB ölçmelerinin amacı, KB'ların varlığını belirleme, ölçme, yerini belirleme ve sonuçları değerlendirmedir [1, 2].

Laboratuvar ortamında ya da işletmede gerilim altında yapılan ölçmeler sırasında elde edilen KB işaretleri genellikle dış ortam veya ölçme devresi kaynaklı baskın derecede gürültüye maruz kalmakta ve kimi zaman KB işaretlerinin gerekli parametrelerini doğru bir şekilde bu verilerden saptamak kolay olmamaktadır. KB ölçümlerine ve gürültü kaynaklarına bağlı olarak literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir [3-6]. KB işaretinin oluşum anının zaman içerisinde değişken olması, gürültü kaynaklarının çeşitliliği, ölçme devre şekli ve kullanılan elemanların birbirlerine göre farklılık göstermesi, tek bir çözüm yerine uygulamaya bağlı çözümlerin oluşturulmasını gerektirmektedir.

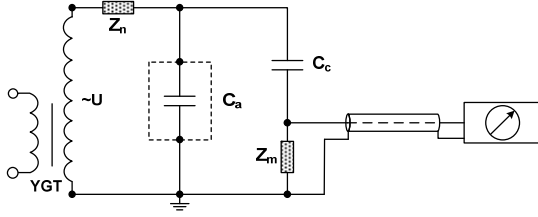
KB işaretleri için gürültü benzetimi ve bunların gürültüden arındırılması yöntemi, diğer bir çalışmada verilmiştir [7]. Bu çalışmada ise laboratuvar ortamında katı yalıtkan içerisinde bir KB bölgesi oluşturularak gerçek KB işaretleri elde edilmesi ve gürültü içerisine gömülmüş KB işaretlerinin çoklu çözünürlük analizi yardımıyla gürültüden süzülmesi için yapılan çalışmalar sunulmuş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Kısmi Boşalma Ölçme Devresi

Deney cisminin bir ucunun doğrudan topraklandığı ve ölçü empedansının kuplaj kondansatörünün altına bağlandığı tipik bir kısmi boşalma ölçme devresi Şekil 1'de gösterilmiştir.

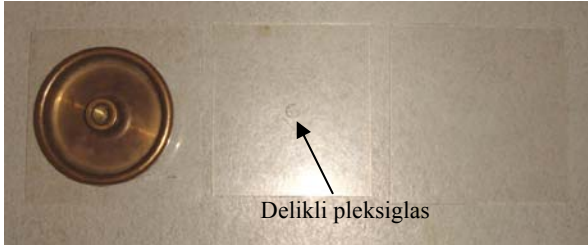
Şekil 1'deki devrede, YGT yüksek gerilim trafosunu, U uygulanan gerilimi, C_a deney cismini (KB kaynağını), C_c kuplaj kondansatörünü, Z_m ölçü empedansını veya dört uçlusunu, Z_n de devreyi yüksek akım ve rezonanstan koruma amaçlı bir öndirenci göstermektedir. Deney cisminin kapasitesinin küçük ve topraktan yalıtılabilir olduğu

durumlarda ölçme empedansı ya da dört uchlusunun deney cismi ile seri bağlandığı devreler de kullanılabilir.



Şekil 1: KB darbe ölçme devresi.

İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bir deney düzeni oluşturularak gerçek KB verileri elde edilmiştir. Deneyler sırasında katı yalıtkanlarda gerilim altında oluşan kısmi boşalmayı benzetmek için her biri 1 mm kalınlığında, 80 × 80 mm ölçülerinde kare kesitli 3 düzlem tabakadan oluşan pleksiglas (metilmetakrilat) yalıtkan deney örneği olarak kullanılmıştır. Şekil 2, kullanılan pleksiglas tabakaları ve bu üç tabakalı yalıtkana gerilim uygulanmasını sağlayan bir düzlem elektrotlardan birini göstermektedir.

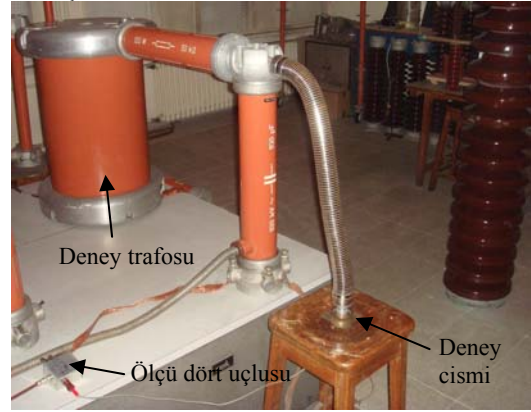


Şekil 2: Pleksiglas tabakalar ve kullanılan düzlem elektrotlardan birisi.

Tabakalardan sadece birinin ortasında 6 mm çapında bir delik bulunmaktadır. Deneyde ortasında delik bulunan tabaka, deliksiz, sağlam tabakaların arasına yerleştirilmiştir. Bu şekilde katı yalıtkan içerisinde KB oluşumuna neden olacak 1 mm yüksekliğinde, 6 mm çapında silindrisel bir hava boşluğu oluşturulmuştur. Bu üç tabakalı yalıtkan, düzlem elektrotlar arasına yerleştirilmiş ve üst elektroda yüksek gerilim uygulanırken alt elektrot, ölçme dört uchlusu üzerinden topraklanmıştır. Deneylerde 100 kV'luk deney transformatörü kullanılmıştır. Şekil 3'de deney düzeneği ve ölçüm amaçlı tasarlanan dört uçlu ölçü empedansı görülmektedir. Şekil 4'te ise pleksiglas tabakalar ile üstte yüksek gerilim elektrotu ve altta toprak elektrotu yakından gösterilmektedir.

Ölçümlerde kullanılan ölçü dört uchlusu 100 ohm'luk bir dirençten ve aşırı gerilimde gerilimi sınırlamak üzere bu direnç uçlarına paralel bağlanan bir zener diyottan oluşturulmuştur. Deney yoluyla elde edilecek işaretler çeşitli frekans bandına sahip işaretleri içereceğinden ölçme devresinin en önemli parçalarından biri olan ölçü dört uchlusunun empedansının geniş bir frekans aralığında frekansla değişiminin belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda ölçü dört uchlusu için endüktif reaktansın, kapasitif reaktansın, direnç ve toplam empedansın 100 Hz ile 40 MHz

arasındaki değişimleri bir empedans analizörü kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3: Deney düzeni.



Şekil 4: Düzlem elektrotlar arasına yerleştirilmiş pleksiglas tabakalar.

Ölçü empedansının koaksiyel çıkışından alınan gerilim, koaksiyel bir ölçü kablosu ile bir dijital osiloskoba aktarılmıştır. Böylece KB darbe oluşumlarından dolayı akan akım, deney cisminde seri bağlı olan bu direnç üzerinde bir gerilim oluşturmakta ve bu gerilim osiloskoptan izlenebilmektedir. İzlenen dalga şekilleri, veri dosyası şeklinde osiloskoptan alınarak veri işleme ve değerlendirme çalışmaları yapabilmek amacıyla bir bilgisayara kaydedilmiştir.

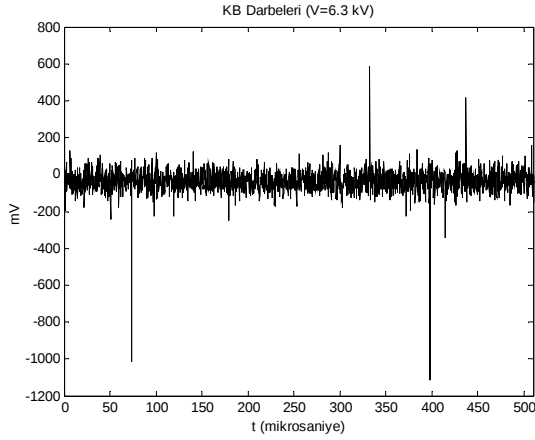
3. Kısmi Boşalma Ölçümleri

KB ölçümlerinde karşılaşılan dış ve ölçüm devresi kaynaklı ana gürültü kaynakları ölçüm devresi içinde oluşturulan elektriksel gürültü ve kontaklar arası atlamalar, periyodik darbe akımları (tristör gibi) gürültüleri gibi stokastik (beyaz) gürültülerdir. Yıldırım, periyodik ve stokastik darbe şekilli olan anahtarlama elemanları veya metal kontaklar arasında ark oluşumu vb. kaynaklı gürültüler de elde edilecek veriler üzerinde etkili olabilmektedir.

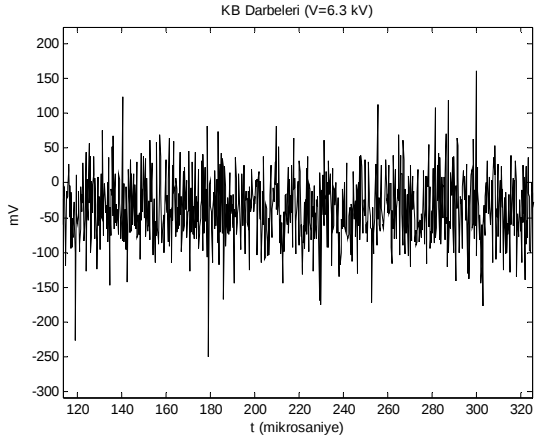
Ölçümler sırasında Şekil 3 ve 4'de verilen deney düzeni kullanılarak 6,3 kV gerilimde elde edilen örnek bir veri Şekil 5'de gösterilmiştir. Ana işaret osiloskopa girişte 10 kat zayıflatılmıştır. Şekil 5, bu 10 kat zayıflatmanın olmadığı ölçü dört uchlusu çıkışındaki ana işareti göstermektedir. Ölçümler sırasında osiloskobun örnekleme frekansı 4 MHz'dir. Deneyler esnasında ortam koşulları ise sıcaklık 17,3 °C, basınç 764 mmHg, bağıl nem % 43,9'dur.

Şekil 5 incelendiğinde, büyük genlikli pozitif ve negatif KB darbe oluşumları görülebilmektedir, ancak küçük genlikli olup gürültü içerisinde gömülmüş olabilecek KB işaretlerinin

ayrıt edilmesi ya da açıkça gözükken KB işaretlerinin gerçek genliklerini, oluşum zamanlarını doğru saptamak olanaklı gözükmemektedir. Şekil 5'te gösterilen verinin daha ayrıntılı görülebilmesi için 115 μ s ve 325 μ s zaman aralığındaki kısmı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5: Deneyde ölçülen gerilim değişimi (gürültüye gömülü KB işaretleri).



Şekil 6: Şekil 5'teki verinin 115 μ s ve 325 μ s zaman aralığındaki kısmı.

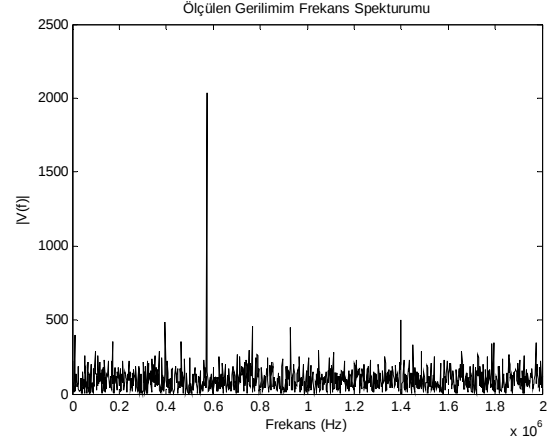
Şekil 5'te verilen gerilim değişimi incelendiğinde zaman ekseninde süreklilik gösteren bir tür gürültünün yayıldığı göze çarpmaktadır. Bu tür veriyi gürültüden arındırmak adına ilk akla gelen belli frekans aralığında işareti süzmektir. Bu amaçla verinin Fourier dönüşümü alınmış hali Şekil 7'de gösterilmektedir.

Şekil 7'den de görüleceği üzere gürültü tüm frekans eksenine yayılmış olan bir beyaz gürültü tipindedir ve belli bir band aralığında süzgeçleme ile KB işaretlerinin ayrıtılması mümkün gözükmemektedir. Bu sonuç, KB işaretlerine ait parametreleri daha doğru belirleyebilmek için zaman-frekans analizi yapabilecek analiz araçları arayışına yöneltmektedir.

4. Dalgacık Dönüşümü ve Çoklu Çözünürlük Analizi

Tanım olarak bir dalgacık, ortalama değeri sıfır olan ve zamanla sınırlı bir dalga şeklindedir. Zaman ekseninde

kaydırma ve ölçekleme parametrelerinin değişimi dalgacık dönüşümünün temelini oluşturmaktadır.



Şekil 7: Şekil 5'te gösterilen gürültüye gömülü KB işaretlerinin frekans-genlik değişimi.

Sürekli dalgacık dönüşümünde tümüyle ölçeklenebilir bir pencere, işaret boyunca kaydırılır ve her konum için spektrum hesaplanır. Bu işlem her yeni aşamada biraz daha kısa veya uzun pencereyle birçok kez tekrarlanır. Sonunda, işaretin zaman-frekans gösterimi, hepsi de farklı çözünürlüklü olan işaretler olacaktır.

Karesel integrale edilebilir bir $x(t)$ fonksiyonunun bir $\psi(t)$ dalgacığına göre sürekli dalgacık dönüşümü aşağıdaki gibi tanımlanır [8].

$$CWT_{\psi} x(a, b) = W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

$\psi_{a,b}(t)$ fonksiyonu ise normalize edilmiş olarak eşitlik (2)'de verilmiştir.

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

Burada $\psi(t)$ baz fonksiyonu ya da ana dalgacığı, (*) sembolü kompleks eşleniği ve a, b parametreleri ise $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$ olmak üzere sırasıyla ölçekleme ve öteleme parametrelerini gösterir. $W_x(a, b)$ terimi dalgacık dönüşümü ile elde edilen dalgacık katsayılarını ifade eder. Diğer taraftan, ayrık dalgacık dönüşümü, yeterli bilgiyi sağlamakla birlikte hesaplama zamanında da önemli bir azalma getirmektedir.

Bu işlemi yapmanın diğer bir yoluysa süzme tekniklerinin kullanılmasıdır. İşaret bu tip analizde birbirine seri bağlı yüksek ve alçak geçiren süzgeçlerden (filtrelerden) geçirilmektedir. Böylece işarete varolan yüksek ve alçak frekans bileşenleri ayrı ayrı analiz edilmektedir. İşaretin çözünürlüğü süzgeçler yardımıyla değiştirilirken, alt ve üst örnekleme yardımıyla da işaretin ölçeği değiştirilmektedir.

Sürekli genişleme ve öteleme parametreleri yerine,

$$a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m \quad (3)$$

şeklindeki ayrık parametreleri tanımlamak mümkündür. Burada a_0, b_0 sabit sayılar olup, $a_0 > 1, b_0 > 0$ koşullarını sağlar. Ayrıca m, n sayıları da, Z tamsayılar kümesinin

elemanlarıdır. Bu durumda ayrıklaştırılmış ana dalgacık eşitlik (4)'de verilmiştir.

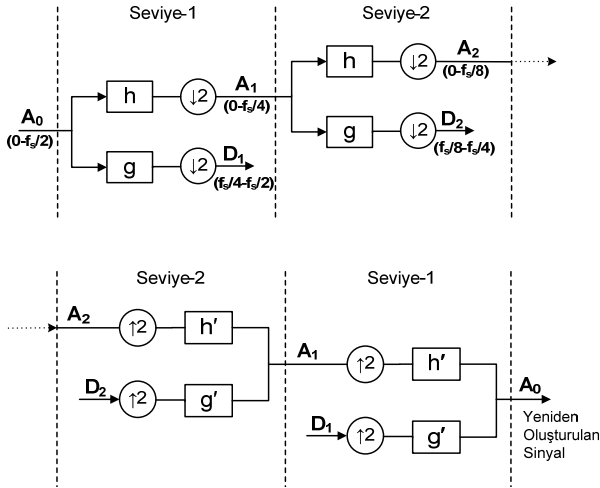
$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (4)$$

Buradan hareketle ayrık parametrelili dalgacık dönüşümü eşitlik (5)'te tanımlanmıştır

$$DWT_{\psi} x(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{m,n}^*(t) dt \quad (5)$$

$a_0 = 2$ ve $b_0 = 1$ değerleri için dalgacık dönüşümü, diadik-ortonormal dalgacık dönüşümü adını alır. Bu durumdaki ortonormal bazın önemli özelliklerinden birisi ise a_0 ve b_0 'ın yukarıdaki gibi seçimiyle, işareti farklı zaman ve frekans çözünürlüklü ölçeklere ayrıştırmaı sağlayan ve çoklu çözünürlüklü dalgacık analizi (ÇÇDA) denilen algoritmanın kullanılabilmesidir [9].

Şekil 8, A_0 işaretinin iki seviyeli olarak ayrıştırılmasını ve yeniden birleştirilmesini göstermektedir. Burada A_1 ve A_2 sırasıyla seviye 1 ve 2 için yaklaşım katsayılarını, D_1 ve D_2 de detay katsayılarını ifade etmektedir. Belirtilen şekilde g yüksek geçiren, h alçak geçiren ayrıştırma süzgeci iken g' yüksek geçiren, h' alçak geçiren birleştirme süzgeçleridir.



Şekil 8: İki seviyeli olarak işaretin ayrıştırılması ve yeniden birleştirilmesi.

5. Gürültülü KB Darbe İşaretlerinin Çoklu Çözünürlük Analizi ile Gürültüden Arındırılması

Gürültüden arındırma ana amaç gerçek kısmi boşalma işaretine mümkün mertebe zarar vermeden gürültüyü en etkin biçimde ölçülen işaretten ayırmaktır. Çoklu çözünürlük analizinde işareti alt bantlara ayrıştırmaı kullanılacak en uygun dalgacığı belirlemek için birçok aday dalgacık mevcuttur. Analizde ana işaretin dalgacığa benzerliği sonucun doğruluğu için önemlidir. Bu nedenle tüm dalgacık ailesine ait ana dalgaya benzer olan dalgacıklar aday dalgacıkları oluşturmaktadır. Çalışmada geniş bir aday dalgacık ailesi ile ana işaret arasındaki benzerlik araştırılmıştır. Bu amaçla iki veri arasındaki benzerliği ortaya

koyan korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Eşitlik (6)'da X ve Y veri kümeleri arasındaki korelasyonu belirleyen bağıntı verilmiştir.

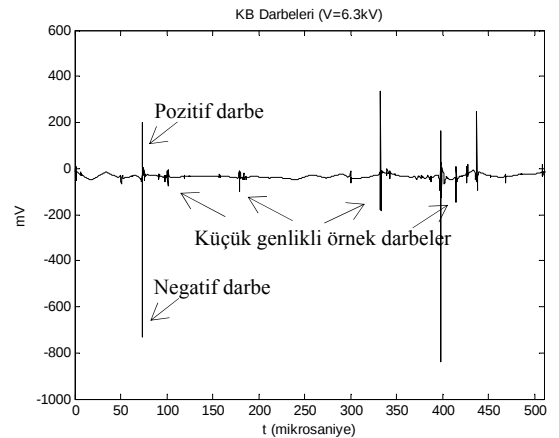
$$\gamma(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \text{ort}(x))(y_i - \text{ort}(y))}{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \text{ort}(x))^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \text{ort}(y))^2 \right]^{1/2}} \quad (6)$$

KB işaretimiz için en yüksek korelasyon değerini Coif2 ana dalgacığı sağlamıştır [7]. KB darbesi benzetim verisinin 2048 noktadan oluştuğu ve de Coif2 ayrıştırma filtresinin uzunluğunun 12 olduğu göz önüne alınırsa ayrık dalgacık dönüşümü ayrıştırma seviyesinin 6 olarak seçilmesinin anlamlı olacağı düşünülmüş ve yapılan denemeler olumlu sonuç vermiştir. Tablo 1, 6 seviyeli ayrıştırma ve 4 MHz örnekleme frekansı için alt bant frekans değerlerini göstermektedir.

Tablo 1: 6 seviyeli ayrıştırma için alt bant frekansları.

Yaklaşımlar	Alt Bantlar (kHz)	Detaylar	Alt Bantlar (kHz)
a_1	0-1000	d_1	1000-2000
a_2	0-500	d_2	500-1000
a_3	0-250	d_3	250-500
a_4	0-125	d_4	125-250
a_5	0-62.5	d_5	62.5-125
a_6	0-31.25	d_6	31.25-62.5

Çoklu çözünürlük analizi ile alt bantlara ayrıştırılan işaret daha sonra gürültü bileşenlerinin süzülmesi için eşikleme işlemine tabi tutulur. Detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi işlemi belirlenen bir aralık için bu aralık içindeki detay katsayılarının sıfırlanması ile gerçekleştirilir. Diğer bir ifadeyle dalgacık sabitlerinin eşiklenmesi işlemi gürültü veya benzer şekilde değerlendirilebilecek önemsiz detay dalgacık sabitlerinin uzaklaştırılması esasına dayanır. Belirlenen uygun eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonu alt bant detay katsayılarına uygulanmıştır. Şekil 9 dalgacık katsayılarının eşiklenmesi sonrasında ters dalgacık dönüşümü ile yeniden oluşturulan ana sinyali göstermektedir.



Şekil 9: Şekil 5'teki gürültülü KB darbelerine ait işaretin gürültüden süzölmüş hali.

Şekil 9'dan burada yapılan analizin, öncesinde (Şekil 5) kolayca tespit edilebilen KB darbelerinin yanı sıra gürültü içerisine gömülü daha küçük genlikli darbelerin de varlığını açıkça ortaya koyduğu gözükmemektedir. Örnek olarak, Şekil 9'da $t = 73 \mu s$ 'de bir pozitif darbe ardından bir de negatif darbe görülmekteyken, Şekil 5'ten sadece büyük genlikli negatif darbe ayırt edilebilmektedir. Saptanan diğer küçük genlikli darbelere örnekler Şekil 9 üzerinde gösterilmiştir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, öncelikle laboratuvar ortamında pleksiglas tabakalar kullanılarak 6,3 kV gerilimde KB işaretleri elde edilmiş, ardından elde edilen gürültü içerisine gömülü bu KB işaretlerine çoklu çözünürlük analizi uygulanmıştır. Sonuçlar, bu çalışmada uygulanan yöntemin KB işaretlerini etkin bir şekilde gürültüden arındırarak kısmi boşalmaların varlığını, genliğini, frekansını, oluşum yerini ve zamanını gibi bilgilerin yeterli düzeyde saptanabilmesine olanak sağladığını göstermektedir.

7. Kaynaklar

- [1] Kreuger, F. H., *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, Butterworth & Co., New York, 1989.
- [2] Altay, Ö., Kalenderli, Ö., Merev, A., Dedeoğlu, S., Gülnihar K., "Preliminary Partial Discharge Measurements with a Computer aided Partial Discharge Detection System", *Eleco 2009 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Bursa, Türkiye, Vol. 1, pp. 345-348, 5-8 November 2009.
- [3] Kyprianou, A., Georgiou, G. E., "Wavelet Packet Denoising for On-Line Partial Discharge Detection in High Voltage Systems", *13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Limassol, Cyprus, June 27-29, 2005.
- [4] Li, J., et al, "Wavelet based De-noising for PD Online Measurement of Transformers", *2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, ABD, 19-22 Sept. 2004.
- [5] Zhou, X., Zhou, C., Kemp, I. J., "An Improved Methodology for Application of Wavelet Transform to Partial Discharge Measurement Denoising", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, pp. 586-594, 2005.
- [6] Chang, C. S., et al, "Denoising of Partial Discharge Signals in Wavelet Packets Domain", *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*, Vol. 152, No. 3, pp. 129 – 140, May 2005.
- [7] Altay, Ö., Kalenderli, Ö., "Elektriksel Kısmi Boşalma Darbesinin Benzetimi ve Dalgacık Analizi ile Gürültüden Süzülmesi", *EEBBM 13. Ulusal Kongresi*, Ankara, 23-26 Aralık 2009.
- [8] Stark, H. G., *Wavelets and Signal Processing- An Application Based Introduction*, Springer, Hollanda, 2005.
- [9] Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, Londra, 1999.