

Darbe Geriliminden Gürültünün Dalgacık Analizi ile Ayrıştırılması

Separation of Noise from Impulse Voltage with Wavelet Analysis

Özkan Altay¹, Özcan Kalenderli²

¹TUSAŞ

Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.

ozaltay@tai.com.tr

²İstanbul Teknik Üniversitesi

Elektrik-Elektronik Fakültesi

kalenderli@itu.edu.tr

Özet

Darbe gerilimleri, yüksek gerilim aygıtlarının yıldırım gibi geçici gerilimlere karşı dayanımını doğrulamak için yüksek gerilim alanında yaygın şekilde kullanılırlar. Elde edilen darbe gerilim şekilleri genellikle farklı girişim kaynakları tarafından oluşturulan çeşitli gürültüleri barındırırlar. Darbe karakteristiklerini doğrulukla değerlendirebilmek için bu gürültülerin orijinal darbe gerilim verilerinden ayrıştırılması gerekir. Beyaz gürültü örneğinde olduğu gibi geleneksel gürültü süzme yöntemleri her durumda yeterli olmayabilir. Bu çalışmada, deneyde elde edilen darbe gerilimi verilerinin gürültüden ayrıştırılmasında dalgacık analizi kullanılmıştır. Dalgacık analizini gürültü süzme amacıyla kullanırken ana sorun, en uygun ana dalgacığın, ayrıştırma seviyesinin, eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonunun belirlenmesidir. Bu bağlamda, dalgacık tabanlı gürültü süzme için optimum parametrelerin belirlenmesinde laboratuvar ortamında elde edilen tam ve kesik darbe gerilim verileri kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları gerçek darbe gerilimi deney verilerine başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Abstract

Impulse voltages are widely used in high voltage area in order to verify insulation integrity of high voltage apparatus to transient voltages such as lightning. Acquired impulse voltage waveforms usually have some sort of noises originated from the different interference sources. It is necessary to remove these noises from the original impulse voltage data in order to evaluate the waveform characteristics more precisely. Conventional filtering methods may not be sufficient in all cases like white noise. In this study, the wavelet analysis was used for separation of impulse voltage data obtained during the test from the noise. When using the wavelet analysis for de-noising purpose the main problem is to define the most suitable mother wavelet, decomposition level, thresholding rule and thresholding function, which all effect the evaluation of impulse voltage characteristics. In this context, normal and chopped impulse voltage data obtained in the laboratory have been used for defining the optimum parameters for wavelet based de-noising. The results of the study were applied to real impulse voltage test data successfully.

1. Giriş

Yüksek gerilim donanımları üzerinde yapılan darbe gerilim deneyleri, donanımın yalıtım yeterliliğini doğrulamak ve işletmede yıldırım gibi geçici aşırı gerilimlere karşı dayanma yeteneğini belirlemek için önemlidir. Standartlarda kullanılan darbe gerilim şekillerinde tepe değeri, cephe süresi, sırt yarı değeri süresi ve kesilme süresi gibi darbeyi tanımlayıcı parametreler karakterize edilmiştir [1, 2]. Laboratuvar ortamında ya da donanımın kullanıldığı güç sisteminde yapılan ölçümler genellikle çeşitli gürültü tiplerini içerebilirler. Bu durumda darbe gerilim verisinden darbe parametrelerini kolayca belirlemek mümkün olmayabilir. Kimi durumda ise, örnek olarak beyaz gürültünün baskın olduğu durumda, frekans bölgesinde süzme işlemi başarılı olmayıp darbenin gürültüden arındırılabilmesi için çeşitli işaret işleme yöntemlerinin kullanılması gerekebilir.

Dalgacık analizi kısmi boşalma verilerinin gürültüden arındırılması gibi zaman-frekans analizi gerektiren çeşitli işaretler üzerinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır [3, 4]. Darbe dalga şekilleri için çoklu çözünürlük analizi [5] ve [6]'da kullanılmıştır ancak ana dalgacığın seçiminin sonuca etkisi göz önüne alınmamıştır. Ayrıca işaret üzerindeki gürültü seviyesi bu çalışmadaki kadar yüksek değildir. Diğer taraftan çalışma [7]'de paket dalgacık dönüşümü kullanılmış ancak ana dalgacık seçimi çalışmamıştır. Kesik darbe gerilimleri [8]'de çalışılmış ve bazı özel frekans değerlerinde karakteristik özellikler çıkarılmıştır. Farklı uygulama alanları için farklı ana dalgacıkların seçimine bir örnek olarak [9] verilebilir.

Darbe gerilimlerinin gürültüden ayrıştırılmasında dikkat edilmesi gereken en önemli konu ayrıştırma işlemi esnasında ana darbe geriliminin bozulmasını önlemek ve darbe parametrelerini etkin bir şekilde doğru olarak belirlemektir. Dalgacık analizi ile ayrıştırma işlemi kullanabilmek için temelde dört değişkenin belirlenmesi gerekir bunlar; ana dalgacık, ayrıştırma seviyesi, eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonudur. Bu dört değişkenin optimum bir şekilde seçimi ve gürültülü darbe verisi üzeri uygulanması için yöntemin tanımlanması gerekir. Bu çalışmada öncelikle darbe gerilim verisinin benzetimi yapılarak bunlara beyaz gürültü

bindirilmesiyle elde edilen veriler kullanılarak belirtilen bu değişkenlerin belirlenmesine çalışılmıştır. Ardından laboratuvar ortamında kaydedilmiş gerçek gürültülü darbe gerilimleri üzerine belirlenen yöntem uygulanarak gürültüden arındırılmış darbe gerilimi sonuçları elde edilmiştir.

2. Dalgacık Analizi

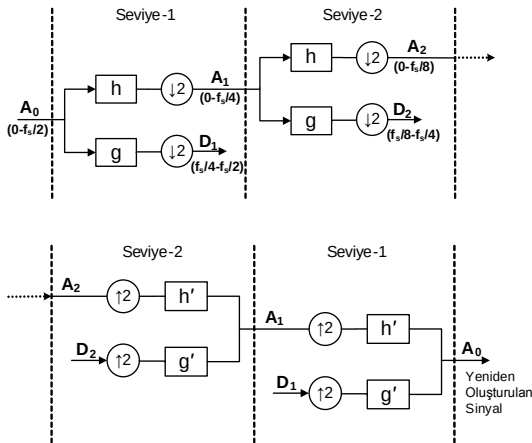
Dalgacık analizi zaman-frekans bölgesinde etkin bir şekilde kullanılabilen bir işaret işleme aracıdır. Verilen bir $x(t)$ fonksiyonu için Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) (1)'de verilmiştir. Burada dalgacık dönüşümü, işareti $\psi(t)$ ana dalgacığının ötelenmiş ve ölçeklenmiş versiyonlarına ayırmaktadır [10].

$$CWT(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (1)$$

τ ve a öteleme ve ölçekleme parametreleridir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) ise (2)'de verilmiştir. Burada n , b ve a , (1)'de verilen sırasıyla t , τ ve a 'nın ayrık değerleridir [10].

$$DWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x(n) \psi^* \left(\frac{n-b}{a} \right) \quad (2)$$

m ve n tamsayı ve $a_0 > 0$, $b_0 > 0$ olmak üzere ölçek parametresi $a = a_0^m$ ve öteleme parametresi $b = nb_0 a_0^m$ alınarak a ve b parametreleri ayrıştırılır. $a_0 = 2$ 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 ayırtırmayı sağlayan ve çoklu çözünürlüklü dalgacık analizi (ÇÇDA) denilen algoritmanın kullanılabilmesidir [10]. Şekil 1, A_0 işaretinin iki seviyeli olarak ayrıştırılmasını ve yeniden birleştirilmesini göstermektedir. Burada A_1 ve A_2 sırasıyla seviye 1 ve 2 için yaklaşık 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.

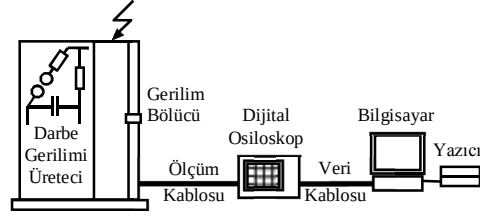


Şekil 1: İki seviyede işaretin ayrıştırılması ve birleştirilmesi.

3. Darbe Gerilimi Verisi

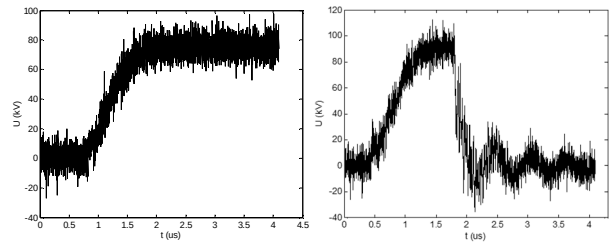
Laboratuvar veya işletme ortamında elde edilen elektriksel büyüklük verileri kimi zaman yüksek değerlerde gürültü içerebilir, hatta gürültü büyük oranda ana işareti maskeleyebilir. Özellikle işletmedeki ölçümlerde bu sıkıntı daha belirgin bir şekilde sorun yaratabilmektedir. Bu çalışma

için darbe gerilim verileri İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda Şekil 2'deki deney düzeneği kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 2: Darbe gerilimi deney düzeneği.

Laboratuvar ortamında elde edilen örnek gürültülü tam darbe (1,2/50 μ s) ve sırtta kesik darbe gerilimdalgı şekilleri Şekil 3'de gösterilmektedir. Buradan görüleceği üzere girişim halindeki gürültü nedeniyle darbelere ait cephe süresi, sırt yarı değer süresi ve tepe değeri gibi darbe parametrelerinin belirlenmesi zordur.



Şekil 3: Kaydedilen darbe gerilim işaretleri (soldaki tam, sağdaki kesik darbe gerilimidir).

Gürültüden ayırıştırma için ilk akla gelen yöntem Fourier dönüşümü sonrasında frekans bölgesinde gürültünün tanımlanarak ana veriden ayrılmasıdır. Ancak bu verinin Fourier dönüşümü alınıp frekans bölgesine geçiş yapıldığında tüm frekans eksenini üzerine yayılmış gürültü görülmektedir. Beyaz gürültü adı verilen ve genellikle ölçüm devresi ya da dış kaynaklı olabilen bu tür gürültünün frekans bölgesi tabanlı süzülmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle zaman-frekans bölgesi tabanlı gürültü süzme işlemi gerekmektedir.

4. Gürültüden Ayırıştırma Yöntemi

Dalgacık analizi tabanlı gürültü süzme bir lineer olmayan yöntem olup temel felsefesi ana işarete ait enerjinin dalgacık dönüşümü ile elde edilen büyük dalgacık katsayılarında bulunmasına dayanmaktadır. Bu anlamda dönüşüm ile elde edilen dalgacık katsayılarından ana işareti temsil edenler yeniden birleştirmeye katılmaz ya da eşiklenerek atılır. Dalgacık dönüşümü ile işaretlerin gürültüden arındırma işlemi genel anlamda üç ana adımda gerçekleştirilir, bunlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

Ayrıştırma: Dalgacık temel fonksiyonu ile işaret ayrıştırılarak dalgacık detay ve yaklaşım sabitleri bulunur. İlk adımda işaret dalgacık bölgesine transfer edilir ve farklı seviyelerdeki yaklaşım ve detay katsayıları ile temsil edilir. Bu aşamada üç adet belirlenmesi gereken parametre mevcuttur. Bunlar ana dalgacığın tipi, ana dalgacığın derecesi ve ayırıştırma seviyesidir. Bu parametreler belirlendiğinde dalgacık analizi gerçekleştirilebilir, ancak parametreler sonucu etkilediğinden seçim esnasında dikkatli olunması gerekmektedir.

Eşikleme: Her ayrıştırma derecesi için gürültü eşiklerinin seçimi ve detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesidir. İkinci adımda işaret içindeki gürültünün karakteristiği konusunda bilgili olunması yöntemin başarısına olumlu katkı sağlar. Ardından eşik değeri belirleme yöntemi ve detay katsayıları için belirlenen bu eşik değerin hangi eşikleme fonksiyonuna göre uygulanacağını belirlenmesi önemlidir. Detay sabitlerinin eşik süzgeçlenmesi işlemi belirlenen bir aralık için bu aralığa dahil olan detay yani dalgacık sabitlerinin sıfırlanması ya da onların kırılması ile gerçekleştirilir.

Birleştirme: İşaretin son güncellenmiş detay sabitleri kullanılarak yeniden oluşturulması yani Ters Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanmasıdır. Böylece zaman bölgesinde gürültüden belli bir oranda ayıklanmış ana işaret elde edilir

Uygulanan yöntem sonuçta ana dalgacık üzerinde dalga şekli bakımından mümkün olan en az seviyede bozulmaya neden olmalıdır. Çalışma kapsamında yapılan bu gürültüden arındırma işleminin başarısını sınamak adına hesaplanan işaret gürültü oranı (SNR), ortalama karesel hata (MSE) ve genlik hatası (ME) değerleri kullanılmıştır. İşaret gürültü oranı (3) denkleminde verilmektedir. Burada W_s ana işarete ait işaret enerjisini, W_n gürültüye ait işaret enerjisini ifade etmektedir.

$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{W_s}{W_n} \right) \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S(i) - R(i))^2 \quad (4)$$

Bu nedenle gürültü süzme çalışmaları sırasında değiştirilen farklı etkenlerin etkinliğinin sınaması amacıyla her benzetim işareti gürültüden temizlendikten sonra ortalama karesel hata (MSE) bulunmuştur. Beklenti, bu hatanın mümkün mertebe küçük olmasıdır. (4) denkleminde S başlangıçtaki ana işareti, R gürültülü işaretten gürültü arındırma işlemi yapıldıktan sonra yeniden elde edilen işareti ifade etmektedir. Analiz sonucunda elde edilen işarettaki genlik bozulmasını değerlendirmek için eşitlik (5)'de verilen genlik hatası ME kullanılmıştır. Burada A_0 ana işaretin genliğini, A_d ise gürültüden arındırılmış işarete ait genliği göstermektedir.

$$ME(\%) = \frac{A_0 - A_d}{A_0} * 100 \quad (5)$$

Burada A_0 ana işaretin genliğini, A_d ise gürültüden arındırılmış işarete ait genliği göstermektedir. Analiz çalışmalarında MATLAB programından yararlanılmıştır.

4.1. Ana Dalgacık

İşaretlerin gürültüden arındırılması için yapılan denemeler, gürültüden arındırma işleminde kullanılan farklı ana dalgacıkların farklı sonuçlara neden olabildiğini göstermiştir. Gürültüden arındırma işleminin kalitesini etkilediğinden üzerinde çalışılan işaret türüne göre ana dalgacığın belirlenmesi gerekir. En uygun ana dalgacığın seçimi için öncelikle benzetim verilerinden yararlanılmıştır. Çünkü ölçme ile elde edilen veride ana veri bilinmemektedir. Buna karşılık benzetim verisinde ana veri ve gürültü bileşeni bilindiğinden ana dalgacığın başarısı MSE ve ME değerleri kullanılarak belirlenebilmiştir. Bu amaçla db (daubechies), sym (symlet) ve coif (coiflet) gibi farklı dalgacık ailelerinden toplamda 31 adet aday ana dalgacık kullanılmıştır.

4.2. Ayrıştırma Seviyesi

Ayrıştırma sonrası elde edilen alt bantlardan ana dalgaya ilişkin veriyi içeren bandı bulmak çok yararlıdır. Eğer ilgilenilen verinin frekans spektrumu biliniyorsa ilgili alt bant ana dalgaya ait bilginin bulunduğu alandır. Aksi takdirde ayrıştırma seviyesinin seçimi için örnekleme frekansı ve işaret enerjisinin göz önünde bulundurularak maksimum ayrıştırma seviyesinin belirlenmesi gerekir. Şekil 3'de verilen her iki darbe gerilimi için örnekleme frekansı $f_s = 1$ GHz'dir. Ana işarete ait kimliği barındıran alt bantın bulunması için işaret alt bant enerjilerinden yararlanılabileceği düşünülmüştür. Bir alt bantta bulunan işaret enerjisi (6)'da verilmiştir.

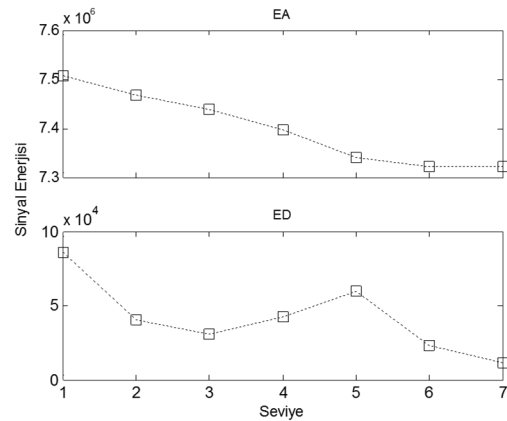
$$E(a) = \sum_{i=1}^N |W(a, i)|^2 \quad (6)$$

Çizelge 1 alt-bant frekanslarını göstermektedir. Eğer işaret enerjisi frekans spektrumunun belirli kısımlarında yoğunlaşmış olduğu açıksa, işareti daha fazla ayrıştırmaya gerek yoktur.

Çizelge 1: Yedi seviyeli ayrıştırma için alt bant frekansları.

Yaklaşımlar	Alt Bantlar (MHz)	Detaylar	Alt Bantlar (MHz)
a_1	0-250	d_1	250-500
a_2	0-125	d_2	125-250
a_3	0-62.5	d_3	62.5-125
a_4	0-31.25	d_4	31.25-62.5
a_5	0-15.625	d_5	15.625-31.25
a_6	0-7.8125	d_6	7.8125-15.625
a_7	0-3.90625	d_7	3.90625-7.8125

Bu bağlamda, işaret üzerinde farklı ayrıştırma seviyeleri denenmiş ve 7 seviyeye kadar enerji dağılımları Şekil 4'de verilmiştir. Buradan da görüleceği üzere işareti daha fazla ayrıştırmaya gerek yoktur, 7 seviyeli bir ayrıştırma yeterlidir. Şekil 4'de sırta kesik darbe gerilimi için EA, ayrıştırma sonrası yaklaşım enerjilerini; ED ise detay enerjilerini göstermektedir.



Şekil 4: Kesik darbe gerilimi yaklaşım (EA) ve detay (ED) enerji dağılımı.

Enerji dağılımından görülebileceği 7 seviyeli bir ayrıştırma yeterli olup daha fazla ayrıştırma yapmak gereksizdir.

4.3. Eşikleme Kuralı ve Eşikleme Fonksiyonu

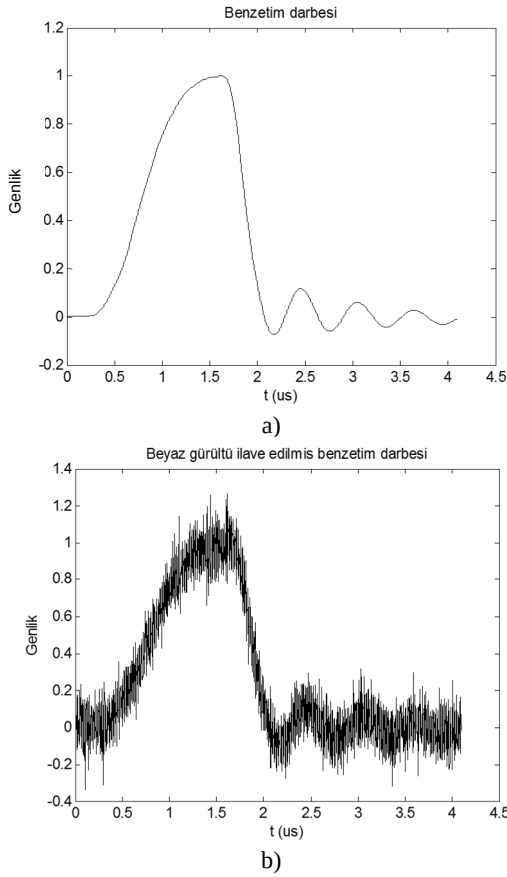
Önceki çalışmamız [11] göstermiştir ki [12] tarafından önerilen ve denklem (7) ile verilen Seviye Bağımlı Eşikleme (SBE), bu tür işaretler için en başarılı eşikleme kuralıdır. Bu ifadede de λ_j j . seviyeye ait eşik değeri, m_j j . seviyedeki dalgacık katsayılarının medyan değeri, n_j j . seviyedeki dalgacık katsayısı sayısıdır.

$$\lambda_j = \frac{m_j}{0.6745} \sqrt{2 \log(n_j)} \quad (7)$$

Eşikleme fonksiyonu olarak ise katı eşikleme fonksiyonu (8) kullanılmıştır. İfadede w_j j . seviyedeki dalgacık katsayılarını göstermektedir.

$$w_j = \begin{cases} w_j & |w_j| > \lambda \\ 0 & |w_j| \leq \lambda \end{cases} \quad (8)$$

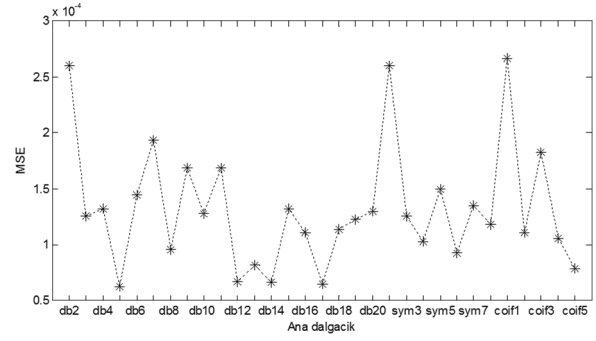
Gerçek darbe verisi üzerinde belirlenen gürültüden arındırma yöntemini kullanmak için gerekli parametrelerin belirlenmesi amacıyla beyaz gürültü içeren darbe benzetim verileri kullanılmıştır. Şekil 5 gürültü bindirilmiş kesik darbe gerilim verisi örneğini göstermektedir (SNR = 14.97).



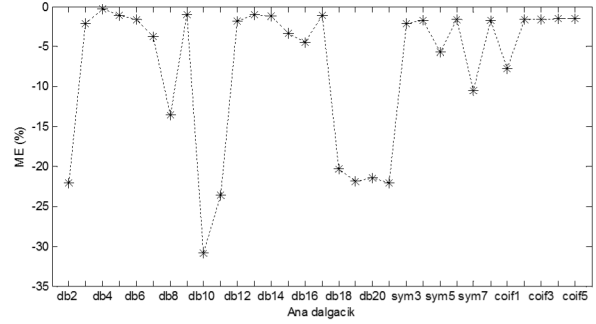
Şekil 5: a) Benzetim darbesi, b) Beyaz gürültü eklenmiş hali.

En uygun ana dalgacığın bulunması amacıyla db, sym ve coif gibi farklı dalgacık ailelerinden toplamda 31 adet aday ana dalgacık kullanılmıştır. Ayırıştırma seviyesi 7 olarak alınmıştır. Ana dalgacığa bağlı olarak elde edilen minimum karesel hata (MSE) değerleri Şekil 6'da verilmektedir. Diğer taraftan hesaplanan genlik hataları (ME) ise Şekil 7'de gösterilmektedir. Sonuçlar irdelendiğinde analiz için ana

dalgacık olarak db5 dalgacığının en uygun ana dalgacık olduğu görülmektedir.

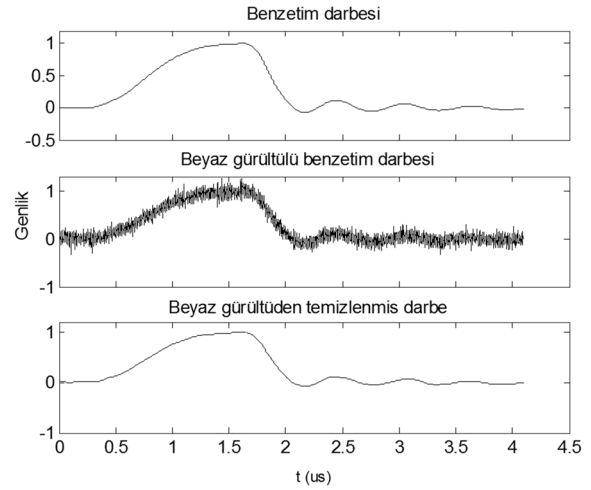


Şekil 6: Benzetim darbesi için MSE değerleri.



Şekil 7: Benzetim darbesi için ME değerleri.

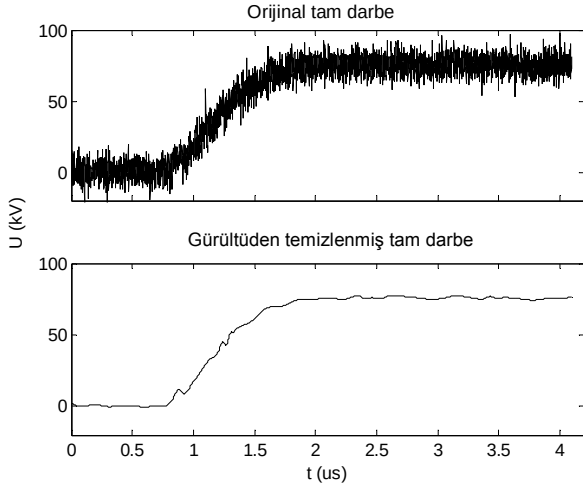
Ana dalgacık olarak belirlenen db5 kullanılması ve önerilen gürültüden arındırma yönteminin izlenmesi amacıyla Şekil 5'de verilen gürültülü darbenin gürültüden ayırıştırılmış hali Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8: Benzetim darbesinin gürültüden ayırıştırılmış hali.

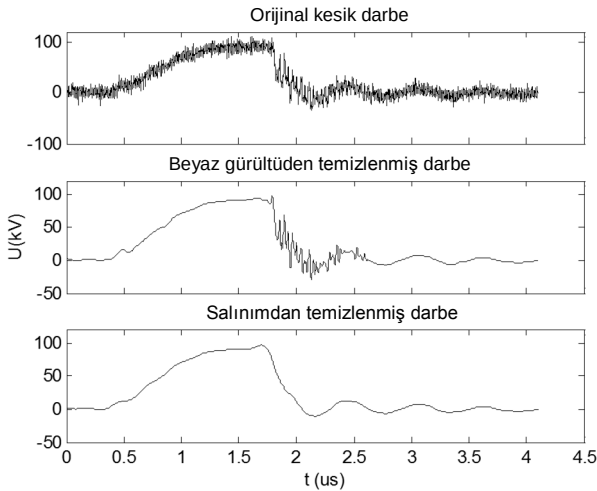
5. Gerçek Deney Verileri Üzerine Uygulama

Önceki bölümlerde darbe gerilimlerinin gürültüden dalgacık analizi ile arındırılmasında kullanılması için belirlenen en uygun parametrelerle laboratuvar ortamında kaydedilen gerçek deney verisi üzerinde bir uygulama yapılmıştır. Şekil 9 ve 10, laboratuvar ortamında kaydedilen gürültülü darbe gerilimlerini ve onların gürültüden arındırılmış sonuçlarını göstermektedir (ana dalgacık: db5, ayırıştırma seviyesi: 7).



Şekil 9: Deney verisi orijinal ve gürültüden temizlenmiş tam darbe gerilimleri.

Şekil 10'da görüldüğü üzere ana veri beyaz gürültü ve bunun yanında salınım yapan bir gürültü içermektedir. Gürültüden arındırma işlemi iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada gürültülü kesik darbeye belirlenen yöntemle dalgacık analizi uygulanmış ve beyaz gürültünün başarılı bir şekilde veriden yok edildiği gözlenmiştir. Ardından ortaya çıkan salınım yapan bileşen, dalgacık analizi esnasında birleştirme işleminde sadece ca7 (7. Seviye yaklaşım katsayıları) kullanılarak darbeden uzaklaştırılmıştır.



Şekil 10: Deney verisi orijinal kesik darbe, beyaz gürültüden temizlenmiş ve salınımdan temizlenmiş hali.

Yapılan çalışma sonucunda gürültüden arındırılmış darbe verilerine (Şekil 9 ve 10) ilişkin darbeyi tanımlayıcı parametreler kolayca belirlenebilecek düzeye gelmiştir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada deney veya ölçüm sonucunda elde edilen darbe gerilimi verilerinden gürültünün mümkün merteye ayrıştırılmasında dalgacık dönüşümü kullanılırken gerekli en uygun ana dalgacık, ayrıştırma seviyesi, eşikleme kuralı ve eşikleme fonksiyonu, gerek laboratuvar ortamında elde edilen veriler gerekse darbe benzetim verileri kullanılarak

belirlenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki; gürültüden arındırma amacına yönelik önerilen dalgacık dönüşümü belirlenen parametrelerle kullanıldığında gürültülü darbe gerilimlerinin darbe parametrelerinin rahatlıkla belirlenebilmesine olanak sağlamaktadır. Farklı türden işaretleri farklı gürültü etkilerinden ayrıştırmada da bu çalışma kapsamında belirlenen yöntemden yararlanılabileceği değerlendirilmektedir.

7. Kaynaklar

- [1] *High Voltage Test Techniques-Part I: General Definitions and Test Requirements*, IEC 60060-1 Standard, 2010.
- [2] *Standard Techniques for High Voltage Testing*, IEEE Standard 4, 1995.
- [3] X. Zhou, C. Zhou, I. J. Kemp, "An improved methodology for application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising", *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No. 3, pp. 586-594, 2005.
- [4] H. Zhang, T. R. Blackburn, B. T. Phung, D. Sen, "A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements Part-1: WT de-noising algorithm", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, No. 1, pp. 3-14, 2007.
- [5] L. Satish, B. I. Gururaj, "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, pp. 116-121, Jan. 2001.
- [6] S. Bolat, Ö. Kalenderli, "Dalgacık dönüşümü ile yıldırım darbe gerilimi dalga şeklinin gürültüden temizlenmesi", *SİÜ 2007 IEEE 15. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, Eskişehir, Bildiri No. 331, 11-13 Haziran 2007.
- [7] L. Angrisani, P. Daponte, C. Dias, A. Almeida do Vale, "A wavelet based approach for measurements on high voltage impulses", *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, Vol. 1, London, pp. 205-208, 22-27 Aug. 1999.
- [8] E. Önal, Ö. Kalenderli, S. Seker, "Multi-resolution wavelet analysis for chopped impulse voltage measurements and feature extraction", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 3, pp. 893 - 900, June 2008.
- [9] O. Özgönenel, G. Önbilgin, C. Kocaman, "Transformer protection using the wavelet transform", *TUBITAK The Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 13, No. 1, pp. 119-135, 2005.
- [10] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, London, 1999.
- [11] Ö. Altay and Ö. Kalenderli, "Noise reduction on partial discharge data with wavelet analysis and appropriate thresholding", *ICHVE 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, New Orleans, USA, 11-14 October 2010.
- [12] X. Ma, C. Zhou, I. J. Kemp, "Automated wavelet selection and thresholding for PD detection", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 18, No. 2, pp. 37-45, 2002.