

Dalgacık Dönüşümü ile Yıldırım Darbe Gerilimi Dalga Şeklinin Gürültüden Temizlenmesi

De-noising of Lightning Impulse Voltage Waveform using Wavelet Transform

Suna Bolat Özcan Kalenderli

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

bolats@elk.itu.edu.tr

ozcan@elk.itu.edu.tr

Özetçe

Yüksek gerilim güç aygıtları, yıldırımdan ciddi zararlar görebilir. Bu nedenle, karşılaşılabilecekleri yıldırım darbelerine dayanabilecek güç aygıtları tasarlayabilmek ve üretilmiş olanların davranışını saptayabilmek için yıldırım darbe gerilimi deneylerinin yapılması önemlidir. Yapılan darbe gerilimi deneylerinde, genelde elde edilen darbe gerilimi şekillerinin gürültülü olduğu görülür. Bu gürültüler, darbe gerilimi dalga şekli üzerinden gerilim darbesinin genlik ve zaman büyüklükleri gibi karakteristik büyüklüklerinin belirlenmesini zorlaştırır. Bu nedenle kaydedilmiş darbe işaretlerinin gürültüden temizlenmesi önemlidir. Bu çalışmada darbe işaretini gürültülerden temizlemek için dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Uygulama, dalgacık dönüşümünün, darbe gerilimi şeklinin gürültüden temizlenmesi işleminde çok etkin ve başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

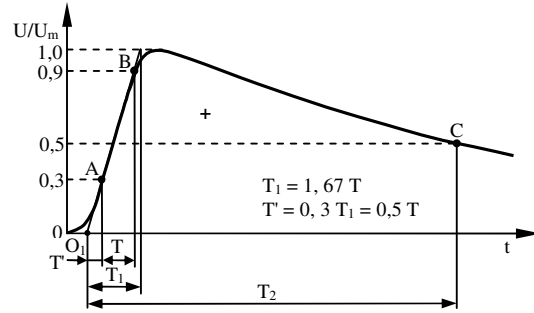
Abstract

High voltage power apparatus can be damaged by lightning which is an impulse voltage seen in nature. It is, therefore, very important to investigate the behavior of the equipments under the impulse voltage, to develop reliable insulation designs. When the impulse voltages measured which is generated in the laboratory, it has been revealed that the signal is noisy. These noises introduce difficulties determining characteristic parameters identifying impulse voltage. For that reason, it is important to de-noise the impulse voltage signal. In this study, wavelet transform is used to filter out the noise. It is seen that wavelet transform gives efficient and successful results for de-noising of the impulse voltage waveform.

1. Giriş

Yüksek gerilim güç aygıtları için, darbe deneyleri, yalıtım sisteminin bütünlüğü ve karşılaşılan aşırı gerilim olaylarına dayanabilecek bir sistem tasarımı açısından önemlidir. Özellikle güç iletim sistemlerinde, yalıtım tasarımı darbe gerilimlerinin etkilerine çok bağlıdır. İletim sistemlerinde kullanılan yüksek gerilim aygıtları, doğal bir darbe gerilimi kaynağı olan yıldırım sebebiyle zarar görebilir. Güç sistemlerinde meydana gelen ve boşalma veya delinmeyle sonuçlanabilecek anahtarlama olaylarında da darbe gerilimleriyle karşılaşılır. Bu sebeple darbe gerilimi altında aygıtların davranışlarını incelemek, güvenilir yalıtım tasarımları geliştirebilmek için çok önemlidir. Darbe gerilimi deneylerinde kullanılan dalga şekilleri, standartlarla

tanımlanmış şekillere sahiptir. Bir darbe gerilimi, dalga şekli ve onun üzerinden çıkarılan, gerilimin tepe değeri, cephe süresi, sırt yarı değer süresi ve kutbiyet (polarite) olmak üzere dört parametre ile tanımlanır (Şekil 1).



Şekil 1: Yıldırım darbe gerilimi dalga şekli.

Dalga şekli ve parametreler osiloskop gibi elektronik aygıtlarla belirlenebilir [1, 2]. Fakat uygulamada darbe geriliminin dalga şekli üzerine, deney devresinin içinden ve dışından iletim ve yayılma yoluyla gelen gürültüler eklenir. Bu sebeple, darbe deneyi sırasında kaydedilen dalga şeklinde titreşimler veya tepe değerin aşılması gibi bozulmalar meydana gelir. Çeşitli kaynaklardan oluşabilen bu etkiler, toplanmış verinin sonradan işlenmesiyle ortadan kaldırılabilirse, sonraki çalışmalar ve analizler için daha temiz işaretler sağlanabilir.

Ölçümler sırasında toplanan veride kaçınılmaz olarak bulunan gürültüler temel olarak üç tiptir:

- Yüksek frekanslı sinüzoidal gürültüler (radyo frekanslı haberleşme sistemlerinin işletiminden kaynaklanır),
- Darbe şekilli gürültüler (çevredeki güç elektroniği aygıtlarından kaynaklanır) ve
- Rastgele gürültüler (pek çok kaynağa bağlı olabilir, direnç, diyot, transistör gibi elektronik bileşenler tarafından oluşturulan ısı gürültüler ve ölçme devresindeki ateşleme ve atlama düzenleri gibi aygıtlardan gelen gürültüler).

Darbe geriliminin karakteristik büyüklüklerinin doğru olarak belirlenebilmesi için, dalga şekli üzerindeki gürültünün giderilmesi gerekir. Gürültüyü temizleme, süzme işlemi, genel olarak işaret ile gürültü spektrumlarının çakışmadığını varsayan filtreleme yöntemine dayanır. Bununla beraber, bu spektrumlar çakışırsa, çakışmanın miktarına göre esas işaretin bazı ayrıntıları kaybolabilir. Bu problemi aşmanın bir yöntemi gürültüyü, sadece frekans spektrumuna göre değil, genlikleri

de göz önüne alarak süzmektir. Dalgacık gürültü temizleme tekniği bu ilkeyle çalışır [3-5]. Bu yöntemde göre gürültü içeren işaret, dalgacık katsayılarına dönüştürülür, belli bir eşik değerinin altındaki dalgacık katsayıları sıfıra ayarlanır ve kalan katsayılar, orijinal işareti tekrar oluşturmak üzere ters dalgacık dönüşümü uygulanır [3-7].

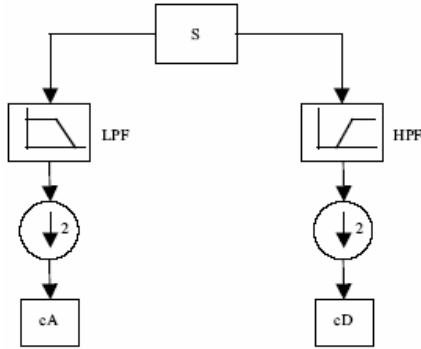
Bu çalışmada, laboratuvarında yapılan deneylerde elde edilen darbe gerilimi işaretleri, dalgacık gürültü temizleme yöntemi ile temizlenmiştir. Böylece darbe gerilimini tanımlayan karakteristik büyüklükler, en az kayıpla ve doğru olarak belirlenebilir.

2. Dalgacık Dönüşümü

Dönüşüm yöntemlerinde temel düşünce, bazı işlemlerin dönüşüm bölgesinde, orijinal işaret bölgesinden daha kolay yapılmasıdır. Dalgacık algoritmaları kolay işlenir, hesaplamaları etkindir ve zaman-frekans davranışıyla ayırt edilmiş işaretlerde gürültü açısından sağlıklı sonuçlar verir.

Ayrık dalgacık dönüşümü (Discrete Wavelet Transform-DWT), bir darbe deneyi sırasında kaydedilen zaman işaretlerini, dalgacık dönüşümünün zaman ölçekli bölgesine dönüştürür. Bir boyutlu DWT'de işaret, ana dalgacık olarak adlandırılan, ölçekli ve zamanda ötelenmiş dalgacık baz fonksiyonlarının toplamıyla ifade edilerek dalgacık katsayıları elde edilir. İşaretin dalgacık katsayılarını elde etmek için, toplama ana dalgacığının farklı ölçekleri için tekrarlanır. Dalgacık katsayısı, işaretin farklı bölümleri ile ölçeklenmiş ana dalgacık arasındaki benzerliğin göstergesidir. Analizi yapılan işaretin yaklaşık şekli önceden biliniyorsa, yüksek değerli dalgacık katsayıları verecek bozulma için uygun bir ana dalgacık seçilebilir.

Ana dalgacığının daha düşük ölçeklerinde dalgacık daha sıkıştırılır ve bu sebeple işaretin yüksek frekans ayrıntılarını ifade etmekte başarılıdır. Diğer yandan yüksek ölçekte dalgacık daha yayılmıştır ve işaretin alçak frekanslı bölümlerini daha kesin ifade edebilir. DWT işlemleri en basit seviyede Şekil 2'deki gibi gösterilebilir. Bu şekilde bir basamaklı filtreleme işlemi, birinci seviye ayrıklaştırmayı ifade eder.



Şekil 2: Basit olarak ayrık dalgacık dönüşümü (DWT)

Şekil 2'de 's' işareti, paralel iki süzgece uygulanır. LPF, alçak geçiren, HPF yüksek geçiren süzgeçtir. Bu süzgeçlerin çıkışları, cA yaklaşım katsayılarını ve cD detay katsayılarını vermek için iki etken ile örneklenir. Örnekleme, ayrıklaştırmadan sonraki örnek sayısının toplamının, orijinal işarettteki örnek sayısına eşit olabilmesi için yapılır. Çok

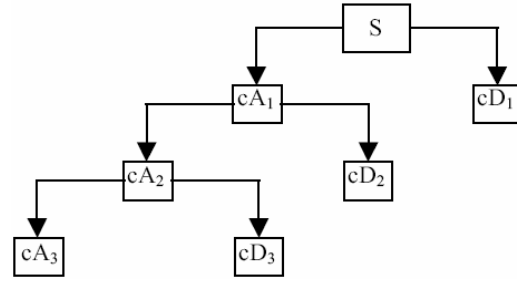
seviyeli ayrıklaştırma, yukarıdaki işlemin yaklaşım katsayıları üzerine her seviyede tekrar uygulanması ile elde edilir (Şekil 3). Şekil 3'te 's' işaretinin ayrıklaştırılması görülmektedir. cA1, cA2 ve cA3 yaklaşım katsayıları, cD1, cD2 ve cD3 detay katsayılarıdır [8, 9].

Herhangi bir j seviyesindeki yaklaşım katsayısının j+1 seviyesindeki yaklaşım ve detay katsayılarına ayrıklaştırması iki temel eşitlikle ifade edilir:

$$cA_{j+1} = \sum_m h(m-2k) cA_j(m) \quad (1)$$

$$cD_{j+1} = \sum_m g(m-2k) cA_j(m) \quad (2)$$

Burada h(k) ve g(k) ayrıklaştırma süzgeçleridir.



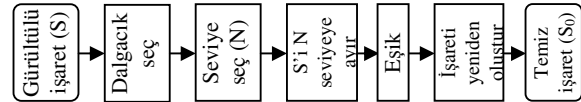
Şekil 3: Çok seviyeli ayrıklaştırma.

Ayrıklaştırma süreci sonlu sayıda seviyeye kadar devam edebilir. Bununla birlikte, birbirini izleyen seviyelerde alçak geçiren süzgecin bant genişliği ikiye bölünür. İşlem devam ettikçe, bir seviyede bu seviyeden sonraki ayrıklaştırmayla etkisiz olduğu görülür. S işareti, bir seviyedeki yaklaşım katsayıları ve detay katsayıları ile ifade edilebilir:

$$S = A1 + D1 = A2 + D2 + D1 = A3 + D3 + D2 + D1 \quad (3)$$

3. Gürültüyü Azaltma İşlemi

Dalgacık dönüşümü kullanarak gürültü azaltma işlemi, Şekil 4'teki gibi bir akış diyagramı ile gösterilebilir. İlk adım ayrıklaştırma için uygun bir ana dalgacık seçmektir. Çok çeşitli dalgacık aileleri vardır. Haar, Daubechies, Biorthogonal, Coiflets, Symlets, Morlet, Mexican Hat ve Meyer çok kullanılan dalgacık ailelerindendir.



Şekil 4: Dalgacık dönüşümü ile gürültüyü azaltma işlemi

3.1. Dalgacık Seçimi ve Seviye Sayısının Belirlenmesi

Bu çalışmada, uygun dalgacık seviyesinin belirlenmesi için Shannon'ın entropi kavramı kullanılmıştır.

$$E_1(s) = -\sum_i s_i^2 \log(s_i^2) \quad (4)$$

Seviye sayısının belirli bir değeri için, yaklaşım ve detay fonksiyonlarının toplam entropileri bellidir. Farklı ana dalgacık tipleri sisteme tanıtılır ve ana dalgacık tipi, yaklaşım ve detay fonksiyonları en küçük toplam entropiye sahip ana dalgacık seçilir.

Seviye sayısının seçilmesinde başka bir yaklaşım da, seçilen ana dalgacık tipinin seviye sayısını değiştirmek ve en küçük entropili seviyeyi aramaktır.

Bir işaretin dalgacık dönüşümü ile ayrıklaştırılmasında kullanılan en büyük seviye sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$N = \text{fix}\left(\frac{\log \frac{n}{(n_w - 1)}}{\log 2}\right) \quad (5)$$

Burada n işaretin uzunluğu, n_w seçilmiş dalgacık ile ilgili ayrıklaştırma süzgecinin uzunluğu, fix parantez içindeki değeri en yakın tam sayıya yuvarlayan işlemdir [8, 9].

3.2. Eşikten Geçirme

Dalgacığın seçimi ve ayrıklaştırma seviyesinin belirlenmesinden sonra dalgacık dönüşümü belirlenir. Sonraki adım, işaretin yüksek frekanslı gürültülerini ayırmak için detay katsayılarını eşikten geçirmektir. Farklı eşik algoritmaları vardır.

Temelde eşikten geçirmek için iki yöntem vardır: Bunlar yumuşak eşik ve katı eşiktir. Katı eşikte, bir λ eşik değerinin altında kalan dalgacık katsayıları sıfıra ayarlanır, eşikğin üstünde diğer bütün katsayılar değerlerini korur.

$$\delta_{\lambda}^H = \begin{cases} x(t) & \text{if } |x(t)| > \lambda \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

Yumuşak eşikte de eşik değerinin altında kalan dalgacık katsayıları sıfıra ayarlanır fakat eşik değerinden büyük olan katsayılar, eşik değerinin çıkarılmasıyla küçültülür.

$$\delta_{\lambda}^S = \begin{cases} \text{sign}(x(t)) * (|x(t)| - \lambda) & \text{if } |x(t)| > \lambda \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

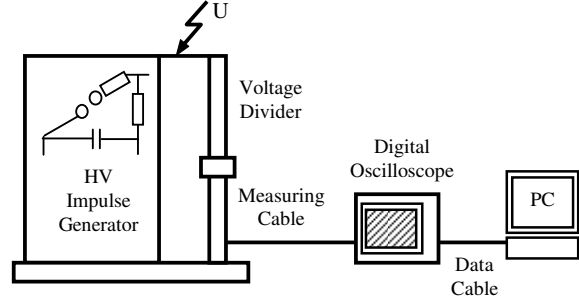
Yumuşak eşik kullanılması, zaman bölgesinde daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlar. Çünkü katı eşik, zaman bölgesinde süreksizlikler oluşturur. Bu çalışmada yumuşak eşik kullanılmıştır [8, 9].

3.3. İşaretin Yeniden Oluşturulması

Gürültüden arındırılmış işareti elde etmek için sıfırdan farklı katsayıları ters DWT uygulanarak, işaret yeniden oluşturulur. Bu, N . seviyedeki yaklaşım katsayıları ve 1'den N 'ye kadar seviyelerdeki eşikten geçirilmiş detay katsayıları kullanılarak hesaplanır.

4. Uygulama

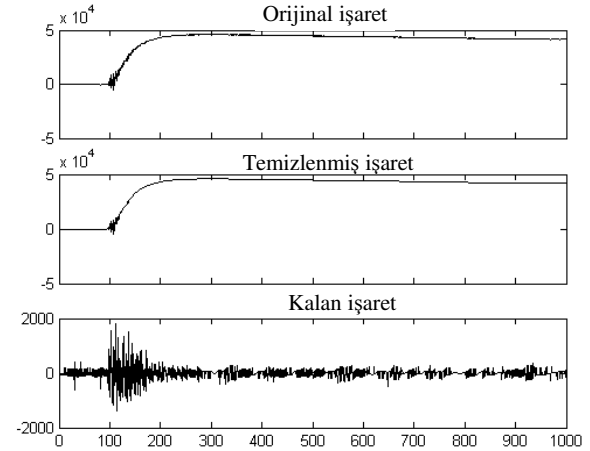
Maksimum tepe değeri 280 kV, enerjisi 200 Joule olan Marx darbe gerilimi üretici kullanılarak, cephe süresi 1,2 μ s, sırt yarı değer süresi 50 μ s olan yıldırım darbe gerilimleri üretilmiştir. Üretilen gerilimler, bir kapasitif gerilim bölücü üzerinden Hewlett Packard 54600 B marka, 2 kanallı, 100 MHz band genişlikli bir dijital osiloskoba alınmış, kaydedilmiş ve osiloskoptan da bilgisayara alınmıştır. Deney düzeneği Şekil 5'te görülmektedir [10].



Şekil 5: Yıldırım darbe gerilimi üretici ve ölçme sistemi

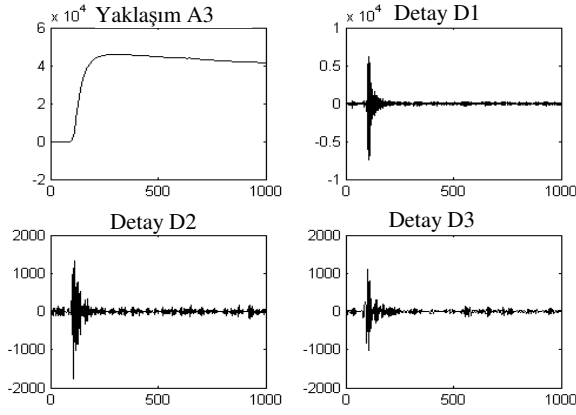
Osiloskopta görülen gerilim dalga şekli, gürültülü bir işarettir. Bu gürültünün darbe parametreleri belirlenmeden önce giderilmesi gerekir. İşaretin gürültüsünün giderilmesinde Daubechies dalgacığı kullanılmıştır.

Bu çalışmada, yüksek frekanslı gürültüye sahip bir darbe işareti ölçülmüştür. İşaretin gürültüsü, 5 seviyeli Daubechies5 kullanılarak giderilmiştir. Ölçülen gürültülü tam darbe gerilimi işareti, gürültüsü giderilmiş darbe gerilimi ve kalan işaret Şekil 6'da gösterilmiştir.



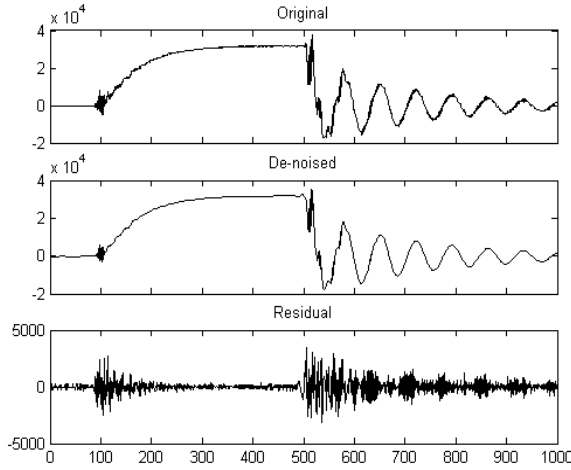
Şekil 6: Ölçülen ve işlenmiş tam darbe gerilimi işareti

Üç seviyeli ayrıklaştırma seçilerek, giriş ayrıklaştırılmış ve Şekil 5'te bir yaklaşım katsayısı (A_3) ve üç detay bileşeni (D_1 - D_3) görülmektedir. Giriş işaretindeki yüksek frekanslı gürültülerin ilk bir veya ikinci detay işaretinde görülmesi mümkündür. Bu durum tanımlanabilir böylece gürültü temizlenebilir. Tam darbe gerilimi için elde edilen yaklaşım ve detay işaretleri Şekil 7'den görülebilir.

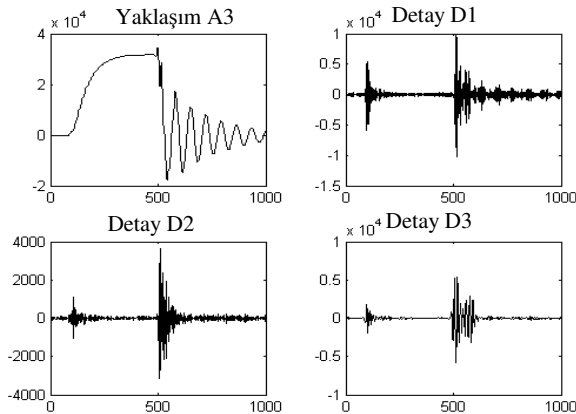


Şekil 7: Tam darbe gerilimi için yaklaşım ve detaylar

Tam darbe için yapılan çalışma, kesik darbe gerilimi için de yapılabilir. Ölçülmüş kesik darbe gerilimi ve temizlenmiş işaret Şekil 8'de kalan işaretlerle birlikte görülmektedir.



Şekil 8: Ölçülen ve işlenmiş kesik darbe gerilimi işareti



Şekil 9: Kesik darbe gerilimi için yaklaşım ve detaylar

Kesik darbe gerilimi için elde edilen yaklaşım ve detay işaretleri Şekil 9'da gösterilmiştir.

5. Sonuçlar

Dalgacık dönüşümünün, Fourier dönüşümünden daha fazla bilgi taşıdığı bilinmektedir ve darbe geriliminin gürültüsünün giderilmesinde daha başarılı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte dalgacık dönüşümü daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve gürültülü veriden çıkarılacak işaretin şekline, kaydetme uzunluğuna ve örnekleme hızına bağlı işlemler içerir.

Yüksek frekanslı gürültüler başarılı bir şekilde temizlenemez. Bununla beraber, yıldırım darbe geriliminin tepe değeri, cephe süresi, sırt yarı değer süresi, kesilme süresi gibi karakteristik parametrelerinin hesaplanması, temizlenmiş işarete, ölçülen işarete göre daha kolay ve kesin sonuçlar vermektedir. Bu da yalıtım tasarımı, delinme olayları, elektrik alanı, iç ve dış aşırı gerilimlerin belirlenmesi gibi konularda daha etkin ve kesin bilgiler üretmeye yardımcı olur.

6. Kaynakça

- [1] Salles, C., Martinez, M. L. B., "Improvements on a new method to correct the humidity effect on lightning impulse testing", *13th Int. Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.
- [2] Totev, J., "Evaluation of lightning impulse tests on reactors", *13th Int. Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.
- [3] Lenz, M., Feser, K., et al, "Wavelet transform application during impulse tests of power transformers", *13th Int. Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.
- [4] Zhou, C., Ma, X., Kemp, I. J., et al, "Optimal algorithms for wavelet-based denoising in PD measurement", *13th Int. Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.
- [5] Hettiwatte, S. N., Wang, Z. D., et al, "De-noising of partial discharge signals detected at a 400 kV power transformer", *13th Int. Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.
- [6] Satish, L., Gururaj, B. I., et al, "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.
- [7] Quak, B., Gulski, E., et al, "Wavelet analysis of PD in power cables", *13th Int. Symposium on High Voltage Engineering*, Netherlands, 2003.
- [8] Kovačević, J., Cohen A., "Wavelets: The mathematical background", *Proceedings of the IEEE*, April 1996.
- [9] Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, London, 1999.
- [10] Kalenderli, Ö., Yıldırım, H., Özdemir, A., "Yeni bir bilgisayar destekli yüksek darbe gerilimi ölçme sistemi", *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi*, pp. 719-722, İstanbul, 1999.