

Bulanık Çıkarım Sistemi ile Elektriksel Boşalma Sesinden Gerilim Düzeyinin Belirlenmesi

Özcan Kalenderli¹

Suna Bolat²

Bülent Bolat³

^{1,2}*Elektrik Mühendisliği Bölümü*

İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak, İstanbul

³*Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü*

Yıldız Teknik Üniversitesi, 34349, Beşiktaş, İstanbul

ozcan@elk.itu.edu.tr, bolats@elk.itu.edu.tr, bbolat@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, elektriksel boşalmalara (koronaya) ilişkin ses kayıtları kullanılarak bir Bulanık Çıkarım Sistemi (Fuzzy Inference System-FIS) yardımıyla elektriksel boşalmaya neden olan gerilimin genliğinin belirlenmesine yönelik yeni bir işaret tanıma yaklaşımı sunulmuştur. Ses kayıtları, deneysel olarak 50 Hz frekanslı farklı yüksek alternatif gerilim düzeylerinde oluşturulan elektriksel boşalmalardan elde edilmiştir. Kaydedilen seslerin farklı sürelerdeki kayıt parçaları kullanılarak, FIS'in giriş ve çıkış bulanık kümeleri oluşturulmuştur. Amaç hem ses verisinden gerilim genliğini belirlemek hem de en az ses verisi ile en doğru olarak gerilim düzeyini belirlemek için veri ve tanı optimizasyonudur. Bunun için yararlanılan algoritmik yöntemde, doğrusal öngörü katsayıları kullanılmıştır. Yapılan uygulama sonunda elde edilen en iyi sonucun kabul edilebilir düzeyde olduğu gösterilmiştir.

uygulanan alanın türü gibi pek çok değişkene bağlı fiziksel bir olay olduğu için güvenilir bir yol olarak görülmemektedir. Günümüz ışıkla (optik) ve sesle (akustik) ölçme yöntemleri, ışık ve ses algılama ve kaydetme olanakları, gelişen bilgisayar donanımları ve işaret işleme yöntemleri göz önüne alındığında bir ölçme seçeneği olarak ilgi çekici gelmektedir [9-11]. Genelde bu yöntemler, ölçmeden çok, boşalmanın varlığını (detection) ve yerini (location) belirlemede kullanılırlar. Sesin, ışığın, ısının,... gerilim ölçme amaçlı kullanımı, özellikle doğrudan ölçmenin zor olduğu yüksek gerilimlerde, arıza tanısında ve uzun süreli sistem davranışı izleme ve değerlendirme çalışmalarında önemli bir araç oluşturur.

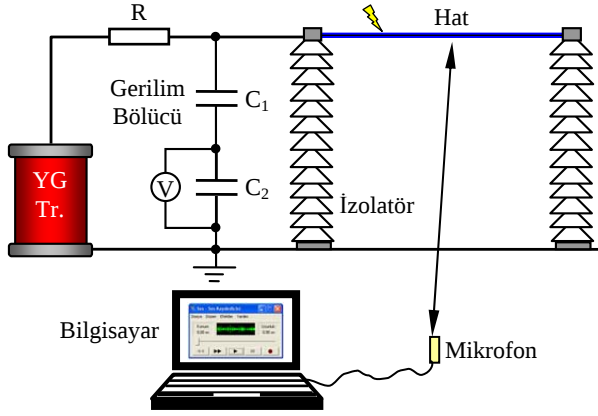
Bu düşünce ile bu çalışmada, elektriksel boşalmalara (koronaya) ilişkin ses kayıtları kullanılarak bir bulanık çıkarım sistemi yardımıyla elektriksel boşalmaya neden olan gerilimin genliğinin belirlenmesine yönelik yeni bir yaklaşım sunulmuştur.

2. Deneysel veri toplama

1. Giriş

Potansiyel farkı olan iki nokta arasındaki gerilim veya bir iletken çevresindeki elektrik alan şiddeti, aradaki veya çevredeki yalıtkanın delinme geriliminden veya delinme dayanımından büyük olursa bu noktalar arasında, tamamında (delinme) veya belli bölümünde (kısmi boşalma, korona şeklinde) gerçekleşen bir elektriksel boşalma olur. Elektriksel boşalma kendini, akım, gerilim darbeleri ve elektromanyetik alan yayılımı dışında, ısı, ışık, ses, koku gibi birçok özelliği ile belli eder [1-5]. Boşalma ile ilgili elektriksel bilgiler, genelde boşalmanın elektriksel büyüklüklerinin ölçülmesinden elde edilir. Elektriksel olmayan büyüklüklerden, özellikle boşalmayı oluşturan gerilimin genliğini belirlemek literatürde daha az karşılaşılan bir uygulamadır [6-8]. Örneğin ışıktan, sestten gerilimin değerini bulmak, genelde elektriksel boşalma sıcaklık, basınç, nem, malzeme türü, boyutları, geometrisi, homojenliği,

Boşalma seslerini elde etmek için Şekil 1'de görülen deney düzeninde iki izolatör arasına yerden 220 cm yükseklikte, 5 m uzunluğunda, 2,5 mm² dairesel kesitli, pürüzsüz, temiz, kuru, çıplak bir bakır tel gerilmiştir. Tele 0,220/100 kV, 5 kVA'lık bir yüksek gerilim trafosundan, tel çevresinde çıplak kulakla duyulabilir boşalma (korona) başlangıç gerilimi olarak saptanan 27 kV'un üzerinde sırasıyla 35 kV, 40 kV, 45 kV, 50 kV, 55 kV ve 65 kV etkin değerli, 50 Hz frekanslı sabit alternatif gerilimler uygulanmıştır. Her gerilim basamağında telden yatayda 4 m uzağa yerleştirilen bir bilgisayar çoğul ortam mikrofoni üzerinden bir dizüstü bilgisayarda, MS Windows XP'nin ses kaydedici programı yardımıyla elektriksel boşalma (korona) sesleri kaydedilmiştir. Deney, 758 mmHg hava basıncı ve 24 °C ortam sıcaklığında, elektromanyetik ekranlı bir laboratuvarında, sessiz ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeni

3. Matematiksel yöntem - Doğrusal öngörü

Kaydedilen ses verilerinden gerilim değeri verisini çıkarmak için, ses spektrumunu elde etmenin yollarından biri olan ve genellikle konuşma işareti analizinde kullanışlı bir yöntem olarak bilinen doğrusal öngörü (LP) analizinden yararlanılmıştır [12-15]. Bu yöntemde spektrum, spektral tepeler üzerine yoğunlaşan bir tüm-kutup fonksiyon ile modellenir [16].

İleri yönlü doğrusal öngöründe amaç, işaretin bir sonraki örneği (n)'i, p adet geçmiş örneğin doğrusal birleşimi ile elde etmektir:

$$\hat{y}(n) = \sum_{i=1}^p a_i y(n-i) \quad (1)$$

Burada a_i ile gösterilen katsayılar, doğrusal öngörü katsayıları olarak adlandırılır. (1) denklemi, transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olan bir tüm-kutup süzgeç tanımlar:

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}} \quad (2)$$

Doğrusal öngöründe amaç, ortalama karesel öngörü hatası e'yi en küçük yapan a katsayılarını bulmaktır:

$$e = E \left\{ \left| y(n) - \sum_{i=1}^p a_i y(n-i) \right|^2 \right\} \quad (3)$$

$$e \approx \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left| y(n) - \sum_{i=1}^p a_i y(n-i) \right|^2 \quad (4)$$

Burada $E\{\cdot\}$ beklendiği değeri işlecidir. (3) veya (4) eşitliğini minimize etmek için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada Levinson-Durbin algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, çok bilinen bir algoritma olduğundan ayrıntılarına burada yer verilmemiştir; ancak ayrıntılı bilgiye [17] ve [18]'den ulaşılabilir.

4. Bulanık çıkarım sistemi (FIS)

Bulanık mantık, insanın düşünme biçimine uyan bir yöntemdir. Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki temel fark, bulanık mantıkta kesin sınırların olmamasıdır [19-20].

Bütün olası nesne veya değişkenlerin toplamı evrensel kümeyi (U) temsil eder. Bir evrensel kümede bulunan bir A bulanık kümesi, $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonu ile tanımlanır. Üyelik fonksiyonu, her reel sayıya karşılık düşen bir üyelik derecesi ile bulunabilir. Üyelik fonksiyonunun tipi tasarımcı tarafından, sistemin yapısına ve kendi deneyimlerine bağlı olarak belirlenir.

FIS'in, verilerin bulanıklaştırılması, bulanık operatörlerin uygulanması, kural tabanı ve çıkarım mekanizması, sonuçların toplanması ve sonuçların durulaştırılması olmak üzere beş temel adımı vardır. Bulanıklaştırma, bulanık olmayan bir büyüklüğün bulanık bir büyüklüğe dönüştürülmesidir. Bunun için, üyelik fonksiyonları kullanılarak girişlerin bulanık kümelerden hangisine hangi derecede ait olduğu belirlenir. Girişler, giriş değişkeninin evrensel kümesinde bulunan sayısal değerlerle sınırlıdır. Çıkış ise, kümeyi niteleyen üyeliğin 0-1 aralığında bulanık bir derecesidir. Girişler bulanıklaştırıldıktan sonra, sistemin yapısına göre kural tabanı belirlenir. FIS'te değişkenler arasındaki ilişkiler, bulanık kurallarla ifade edilir. Verilen bir kuralın öncül önermesi birden fazla bölüme sahipse, tek bir sayı elde etmek için bulanık operatörler kullanılır. Bu sayı daha sonra çıkış fonksiyonuna uygulanır. Bulanık operatörün girişi, bulanıklaştırılmış giriş değişkenlerinden oluşan iki veya daha fazla üyelik değeridir. Bununla beraber, kurallardan belirlenen çıkış değerlerinin toplamı, bulanık kümedir. Bu sebeple tek bir çıkış değeri elde etmek için, küme durulaştırılmalıdır. Durulayıcı, çıkarım mekanizmasının ürettiği bulanık kümeleri gerçel değerli sistem çıkışına dönüştürür [19-20].

5. Uygulama

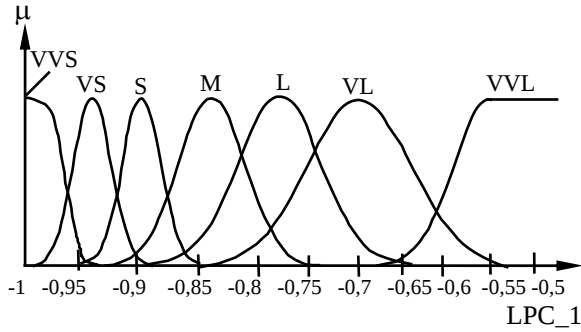
Çalışmada kullanılan ses örnekleri, her gerilim basamağında 15 s süreli kayıtlar sonucunda elde edilen elektriksel boşalma (korona) sesi örnekleridir. Ses örnekleri 22050 Hz örnekleme frekansında ve 8 bit çözünürlükle kaydedilmiştir.

Her bir gerilim basamağı için elde edilen ses örnekleri, 1 s'lik parçalara bölünerek, 1 s'lik ses kaydı boyunca 20 ms uzunluklu çerçeveler için LP katsayıları hesaplanmıştır. Çerçeveler arasında örtüşme yoktur. Her çerçeve için LP katsayıları hesaplanmış, tüm çerçeveler için hesaplanan katsayıların ortalamaları alınarak her bir ses kaydı, bu ortalama değerler ile temsil edilmiştir. Ses kayıtları için 4. dereceden LP katsayıları hesaplanmıştır. Herbir gerilim basamağında ses örneklerinin LP katsayıları sistemin girişlerini oluştururken, gerilim basamağı da sistemin çıkışını oluşturur.

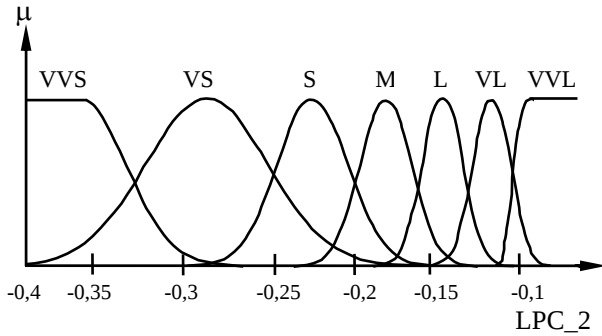
Bu çalışmada, karar verme aşamasında, Sugeno (Singleton) bulanık mantık modeli kullanılmıştır. Sugeno modelinde çıkış üyelik fonksiyonları doğrusal veya sabittir. Bu çalışmada, sistemin çıkışı gerilim basamağı olduğu için, çıkış üyelik fonksiyonları sabittir.

Girişlerin bulanıklaştırılması için Gaussian ve Sigmoid üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Bütün değişkenler yedi bulanık kümeye bölünmüştür (Şekil 2).

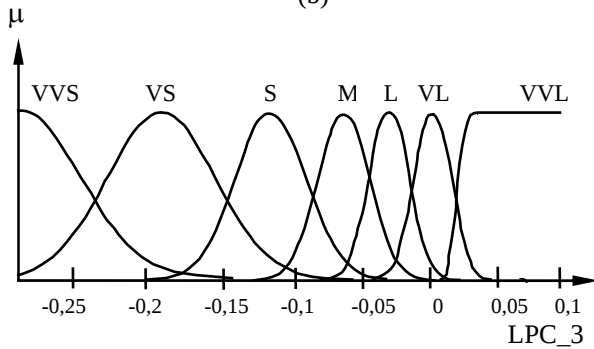
VVS: Very very small (çok çok küçük)
VS: Very small (çok küçük)
S: Small (küçük)
M: Medium (orta)
L: Large (büyük)
VL: Very large (çok büyük)
VVL: Very very large (çok çok büyük)



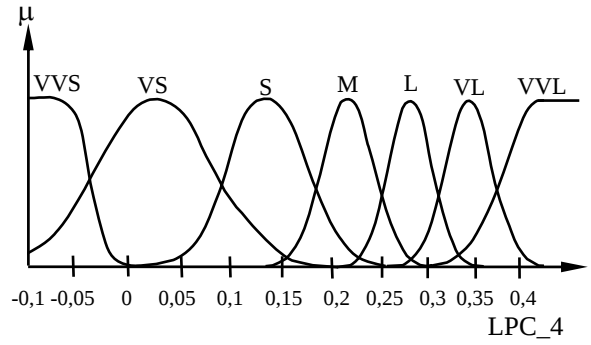
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2. Girişlerin üyelik fonksiyonları

(a) LPC_1, (b) LPC_2, (c) LPC_3, (d) LPC_4

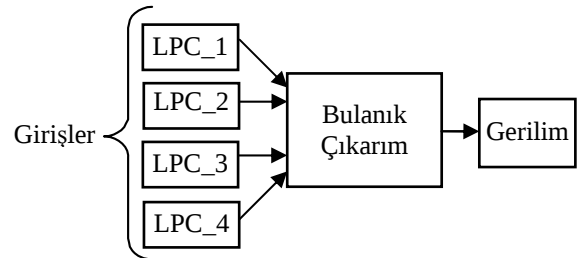
Ses örnekleri için belirlenen LP katsayıları ve gerilim basamakları kullanılarak FIS için kurallar oluşturulmuştur. Giriş – çıkış veri kümesi kullanılarak oluşturulan bulanık kural tabanı, bütün olasılıklar bu sistemde aktif durumda olmadığı için 39 kural içermektedir. Bu çalışmada, bulanık mantıksal VE operatörü çarpım, VEYA operatörü cebirsel toplam olarak seçilmiştir. Çıkarım yöntemi olarak minimum, durulaştırma için ise ağırlıklı ortalama yöntemi seçilmiştir. Sistemde kullanılan EĞER - O HALDE ifadeleri aşağıda gösterilen formda yazılarak, kurallar tanımlanmıştır.

EĞER LPC_1 A ise **VE** LPC_2 B ise **VE** LPC_3 C ise **VE** LPC_4 D ise;

O HALDE Gerilim E'dir.

Burada A, B, C, D bulanık kümeler ile tanımlanan dilsel değerlerdir.

Sistemin şeması Şekil 3'te görülmektedir. Çıkış değerleri durulaştırma işleminden sonra, giriş olarak sisteme verilen LP katsayılarının temsil ettiği ses örneğinin oluştuğu gerilim değerini verir.



Şekil 3. Problemin bulanık modeli

Sistemin başarımını incelemek için, farklı gerilim değerlerine sahip sekiz ses örneği, LP katsayıları kullanılarak FIS'e uygulanmış ve sonuçlar gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır (Çizelge 1).

Burada karesel hata,

$$e_i = |\text{gerçek değer}_i - \text{FIS sonuçları}_i|$$

$$\text{Karesel Hata} = (e_i / \text{Gerçek değer})^2 \times 100 \quad (5)$$

$$i = 1, \dots, n; n = 8$$

şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 1. Gerçek değerler ile FIS sonuçlarının karşılaştırılması

Gerçek değerler (kV)	FIS sonuçları (kV)	Karesel hata (%)
35,00	38,00	0.734690
40,00	40,00	0
45,00	44,90	0.000494
50,00	58,10	2.624400
55,00	54,20	0.021157
60,00	58,20	0.090000
65,00	64,80	0.000947
70,00	67,40	0.137960

Sistemin genel başarımını incelemek için, FIS'e uygulanan bütün giriş vektörlerinin toplam karesel hatası,

$$\text{Toplam karesel hata} = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (6)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu çalışmada, toplam karesel hata % 3,6097 olarak belirlenmiştir.

6. Tartışma ve sonuç

Amacın hem ses verisinden gerilim genliğini belirlemek hem de en az ses verisi ile en doğru olarak gerilim düzeyini belirlemek için veri ve tanı optimizasyonu yapmak olan bu çalışmada, bu amaçla doğrusal öngörüyle bulanık çıkarım sistemi kullanılmıştır.

Tanının başarımı, öncelikle ses verisinin algılama ve kayıt özellikleri ile ilgilidir. Boşalma sesi, boşalmanın olduğu yapının geometrisine, boyutlarına, temizlik, kuruluk ve düzgünlüğüne çok bağlıdır. Çalışmada temiz, kuru, dairesel geometrili, düzgün yüzeyli tel kullanılmış olması, tel çevresinde boşalma oluşumu bakımından zorluk yaratan koşullardır. Bunun için tel çapının küçük, gerilim düzeyinin büyük tutulmasıyla tel yüzeyindeki elektrik alan şiddetinin, teli çevreleyen havanın delinme dayanımından yüksek olması sağlanmış ve elektrik alan şiddetinin havanın delinme alan şiddetinin altında kaldığı yere kadar boşalmanın olmasına izin verilmiştir. Işıklı, sesli ısılı, kokulu belirtileri ile kendini belli eden ve genelde korona adı verilen bu yerel (kısmi) elektriksel boşalma, tel çevresindeki iyonlaşmanın, iyon hareketinin sonucu

olarak 15 Hz - 30 MHz frekans aralığında seslerin yaratıcısıdır.

İnsan kulağının 15 Hz - 15 kHz arasında ses duyabilme kapasitesini kullanarak ölçmeler yapmak çevre gürültülerinden sesleri ayırt etmedeki güçlük nedeniyle pek tercih edilmez ve genelde uygulamada ultrasonik ses frekansı bölgesinde, 15 kHz'in üstündeki frekanslarda ölçmeler yapılır. Bu çalışmada, duyulabilir ses bölgesinde çalışılmış kullanılan, dolayısıyla çevre gürültüleri önemli olmuştur. Buna önlem olarak ölçme ortamı sessizliği sağlanmış ayrıca ölçmeler laboratuvarın gün içindeki en sessiz zamanında yapılmıştır. Bu uygulamada başarılı olduğu için analizde bunun getirdiği sorunlarla karşılaşmamıştır. Ancak öngörülmeleyen bir sorun özellikle 65 kV'ta ve 70 kV'ta yapılan ölçmeleri etkilemiştir. Bu sorun, gerilim uygulanan tel çevresindeki elektrostatik alanın örneğin mikrofonda ve bilgisayarda endüklediği gerilimlerdir. Ancak bilinmektedir ki hattan uzaklaşma ve hat ile ölçme sistemi arasında elektromanyetik ekranlama (örneğin Faraday kafesi) kullanımı bu sorunu büyük ölçüde çözecek ve kayıt, tanı kalitesini arttıracaktır.

Kayıtlarda, uygulamada yaygın olarak kullanılan bilgisayar çoğul ortam seti mikrofondan yararlanılmıştır. Bu durumun ses algılama duyarlılığında önemli olduğu bilinmekle beraber özel olmayan, sıradan bir mikrofonla başarımın bu düzeylerde elde edilmiş olması, nitelikleri daha yüksek mikrofonla başarımın daha iyi olacağının göstergesidir. Ses düzeyi kaynağına, sesin yayıldığı ortama, sesin alındığı uzaklığa bağlı olduğu için kaynağa olabildiğince yakın ölçme yapılmaya çalışılmıştır. Burada sesin havadaki yaklaşık normal hava koşullarındaki yayılma hızından yararlanılmıştır. Çalışmanın sıvı ve katı yalıtkan içindeki elektriksel boşalmaların incelenmesi ve ölçülmesi için yapılması durumunda ses yayılma hızı ve ortam koşulları daha önemli olacaktır.

Mikrofon üzerinden sesin kaydedildiği donanım olarak bilgisayardan yararlanılmıştır. Bilgisayarın işlemci ve bellek özelliklerinin çalışmada önemli olduğu bilinmekle birlikte hem çalışmada kullanılan bilgisayarın hem de günümüz bilgisayarlarının bu tür ölçmeler için yeterli özelliklere sahip oldukları açıktır. Burada karşılaşılan sorun, bilgisayar ses kartı çözünürlük özelliklerinin yeterli olup olmamasındadır. Özel olarak tasarlanmış veya yüksek çözünürlüklü bir ses kartı sonuçlara olumlu katkı yapacaktır.

Ses örnekleri 22050 Hz örnekleme frekansında ve 8 bit çözünürlükle kaydedilmiştir. Farklı örnekleme frekansı ve çözünürlük üzerinde çalışılabilir, çözünürlüğün artmasının tanı başarımı açısından yararı fazladır. Ses kaydı için MS Windows XP'nin ses kaydedici programının kaydetme özellikleri içinde kalınmıştır. 15 saniye boyunca yapılan ses kayıtları, FIS'in uygun sonuçlar vermesi için yeterli olmuştur. Böylece Yapay Sinir Ağı gibi yöntemlerin getirdiği başarımın veri sayısına bağlılığı sorunu giderilmiş olur.

Olabildiği kadar kısa veya az veri ile yüksek başarımla elde etme isteğinin bu yöntemle karşılandığı görülmektedir.

Ses verisinin analizinde, farklı analiz yöntemlerinden yararlanılabilir. Burada doğrusal öngörü yöntemi tercih edilmiştir. Tablo 1’de verilen sonuçlara bakıldığında sonuçların tatmin edici olduğu görülmektedir. Ancak başka yollar denenerek ve karşılaştırılarak en uygun yöntem arayışında bulunulabilir. Yapay sinir ağları, bulanık mantık ve genetik algoritma gibi algoritmik yöntemlerin günümüzde çok kullanılmaya başladığı ve uygulandığı göz önüne alındığında çalışma için başka yöntem seçeneklerinin olduğu açıktır.

Yapılan çalışma, işaret işleme tekniklerini kullanarak ses verisinden gerilim ölçme için bir adımdır. Özellikle yüksek gerilimde, yüksek gerilim hatlarına bağlantı yapmadan gerilim düzeyi hakkında bilgi edinme veya bir arızada ortaya çıkan boşalma sesinden arzaya neden olan gerilimin büyüklüğü hakkında bilgi edinme veya elektrik sistemlerinde gözleme ve izleme sistemlerinde uygulamaya dönük çalışmalar için bir uygulamadır.

7. Kaynaklar

- [1] Ö. Kalenderli, C. Kocatepe, O. Arkan, *Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [2] M. Özkaya, *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [3] L. I. Sirotinski, (Çeviren: M. Özkaya), *Yüksek Gerilim Tekniği, Gazlarda Deşarj Olayları*, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 594, İstanbul, 1964.
- [4] M. S. Naidu, V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, Third Ed. 2004.
- [5] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, M. I. Qureshi, *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1998.
- [6] ASTM Publ. 669, *Engineering Dielectrics Vol. I: Corona Measurement and Interpretation*, Chapter 10, Philadelphia, 1979.
- [7] E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, Newnes, 2nd Ed. 2000.
- [8] S. Ray, *An Introduction to High Voltage Engineering*, Prentice Hall of India, New Delhi, 2004.
- [9] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, Butterworths, London, 1989.
- [10] E. Gulski, *Computer-Aided Recognition of Partial Discharges Using Statistical Tools*, Delft Univ. Press, Delft, 1991.
- [11] H. M. Ryan, *High Voltage Engineering and Testing*, Peter Peregrinus Ltd., London, 2nd Ed. 2001.
- [12] J. C. Brown, "Computer Identification of Musical Instruments Using Pattern Recognition with Cepstral Coefficients as Features", *J. Acoust. Soc. Amer.*, 105:1933–1941, 1999.
- [13] K. D. Martin, "Sound-Source Recognition: A Theory and Computational Model", *PhD. Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, 1999.
- [14] I. Fujinaga, K. MacMillan, "Realtime Recognition of Orchestral Instruments", *Proc. Int. Computer Music Conf.*, pp. 141-143 Berlin, Germany, 2000.
- [15] A. Fraser, I. Fujinaga, "Toward Realtime Recognition of Acoustic Musical Instruments", *Proc. Int. Computer Music Conf.*, p. 175-177, Beijing, China, 1999.
- [16] A. Eronen, "Automatic Musical Instrument Recognition", *Master's Thesis, Tampere University of Technology*, 2001.
- [17] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, NY, 1991.
- [18] M. H. Hayes, *Statistical Digital Signal Processing and Modelling*, John Wiley & Sons, NY, 1996.
- [19] L. A. Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3, pp. 28-44, 1973.
- [20] E. Balog, I. Berta, "Fuzzy Solutions in Electrostatics", *Journal of Electrostatics*, No. 51-52, pp. 409-415, 2001.