

YAPAY SİNİR AĞI VE BULANIK ÇIKARIM YÖNTEMLERİ İLE İZOLATÖR BİÇİM OPTİMİZASYONU

Suna BOLAT¹

Özcan KALENDERLİ²

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi

Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul

¹e-posta: bolats@elk.itu.edu.tr

²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Yüksek Gerilim, İzolatör, Biçim Optimizasyonu, Yapay Sinir Ağı, Bulanık Çıkarım Sistemi

ÖZET

Yüksek gerilim tekniğinde, optimum elektrot ve izolatör tasarımındaki gelişmeler, son yıllarda önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada bir izolatörün biçimi, Yapay Sinir Ağı ve Bulanık Çıkarım Sistemi kullanılarak, izolatör yüzeyindeki elektrik alan şiddeti düzgün ve olabildiğince küçük olacak şekilde optimize edilmiştir.

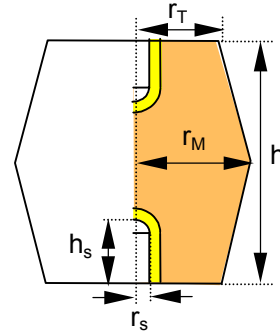
1. GİRİŞ

Yüksek gerilim tekniğinde elektrotlar ve izolatörler, elektriksel zorlanma ve boşalma olayları bakımından belirleyici rol oynamaktadır. Yüzeylerindeki alan dağılımlarının mümkün olduğu kadar düzgün olması gerekmektedir. Düzgün alan dağılımı elde edebilmek için yüksek gerilim düzenlerinde optimum elektrot ve izolatör biçimi tercih edilir. Bunun için sayısal, analitik ve deneysel yöntemler kullanılmaktadır [1-4]. Bu yöntemlerden birinde, istenen alan dağılımını elde edebilmek için izolatör biçimi, iteratif olarak değiştirilir [1-2]. İteratif yöntemlerde elektrik alan değerlerinin her adımda hesaplanması, hesaplama zamanını uzatır. Ayrıca iteratif yöntemler her problem için uygun değildir. Buna karşılık yapay sinir ağı (YSA), bulanık çıkarım sistemi (FIS: Fuzzy Inference System), genetik algoritma (GA) gibi optimizasyonda kullanılabilecek yöntemler, seçenek olarak değerlendirilebilir [3-4]. Örneğin YSA'yı eğitmek için sadece sınırlı sayıda alan hesabından oluşan bir eğitim kümesi yeterlidir. Bulanık çıkarımda ise, YSA'da olduğu gibi bir eğitim süreci yoktur ve biçim optimizasyonunda istenen sonuca ulaşmada, tasarımcının belirlediği kurallar etkilidir.

Bu çalışmada, iki düzlem elektrot (baralar) arasında bulunan bir izolatörün optimum biçimi, izolatör yüzeyindeki alan dağılımı düzgün ve en küçük olacak şekilde YSA ve FIS yöntemleriyle ayrı ayrı belirlenmiştir. YSA, izolatör yüzeyindeki belli noktadaki elektrik alan değerleri ve koordinatları kullanılarak eğitilmiştir. FIS için ise izolatörün tepe ve orta noktalarının elektrik alan değerleri ile izolatörün üst yarıçapı kullanılmıştır.

2. OPTİMİZE EDİLECEK İZOLATÖR

Bu çalışmada, optimize edilecek izolatör olarak bir bara mesnet izolatörü göz önüne alınmıştır (Şekil 1).



Şekil-1. Optimize edilecek mekik biçimli eksenel simetrik izolatör.

Çalışmada izolatörün, aralarındaki potansiyel farkı 1 kV olan, iki düzlem elektrot arasında olduğu varsayılmıştır. İzolatörün üst yarıçapı $r_T = 14,5$ mm, orta yarıçapı $r_M = 20$ mm ve izolatör yüksekliği $h = 40$ mm, izolatörü sabitlemek için kullanılan vidanın yarıçapı $r_s = 3$ mm ve yüksekliği $h_s = 10$ mm'dir. Üst yarıçap değiştirilerek, YSA ve FIS yöntemleri için gerekli farklı izolatör biçimleri oluşturulmuş ve optimum izolatör biçimini belirleyebilmek için, elektrik alan değerleri, sonlu elemanlar yöntemi ile belirlenmiştir [5].

3. YAPAY SİNİR AĞI

YSA, insan beyninin öğrenme şeklinin uygulanmaya çalışıldığı bir yöntemdir [3, 6-7]. Bir YSA, nöron adı verilen, bilgi işleme elemanlarından oluşmaktadır. Nöronlar, bağlantı hatları üzerinden işaret göndererek birbirlerini etkilerler. Bu bağlantı hatlarının herbirinin kendine özgü bir ağırlığı vardır. Uyarlamalı hesaplanabilen bu ağırlıklar, bilgiyi doğru olarak bildirir. Farklı öğrenme algoritmaları kullanılarak belirlenebilen ağırlıklar ile sonuç bilgisine ulaşılır. Bu çalışmada, öğrenme algoritması olarak genelleştirilmiş regresyon ağı (GRN) kullanılmıştır.

GRN, radyal tabanlı işlev ağlarının özel bir durumudur. Ağ yapısı bir radyal tabanlı katman ile özel bir doğrusal katmandan oluşmaktadır. GRN'de radyal tabanlı fonksiyon ağlarının merkez ve bant genişlikleri, eğitme verisinin deterministik işlevleri olarak belirlenir ve bu tip ağlarda eğitim için yinelemeli (iteratif) yöntemler kullanılmaz [6-7].

Birinci katman, normal bir radyal tabanlı YSA gibi işler. Her nöronun ağırlıklı girişi, giriş vektörü ile bu girişin ağırlık vektörü arasındaki uzaklıktır. Her nöronun net girişi, o nöronun ağırlıklı girişi ile biasının çarpımıyla belirlenir. Her nöronun çıkışı, o nöronun net girişinin radyal tabanlı katmandan geçirilmesiyle hesaplanır.

GRN'de bir x_j girişi, ağdaki Gauss çekirdeklerinden birinin merkezi olarak atanır. Herhangi bir giriş vektörü x için i . radyal tabanlı biriminin çıkışı

$$\beta_i = \exp\left[-\frac{(x - x_i)^T (x - x_i)}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

şeklinde hesaplanır. Burada σ kullanıcı tarafından belirlenen bir parametredir. Herhangi bir x girişi için ağırlık çıkışı y

$$y = \sum_{i=1}^K \alpha_i y_i \quad (2)$$

şeklinde dir. Burada α katsayıları

$$\alpha_i = \frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^K \beta_i} \quad (3)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Eğer x , herhangi bir x_i eğitim vektörüne yakın ise x_i 'ye ilişkin α_i en büyük olacak ve istenen y , x_i 'ye ilişkin y_i çıkışına yaklaşacaktır.

3.1 YSA Uygulanması

YSA'ya uygulanacak eğitim ve test verilerini belirlemek için, izolator üst yarıçapı 9 mm'den 19,9 mm'ye kadar 0,1 mm'lik adımlarla değiştirilerek, 110 farklı izolator biçimi oluşturulur. Oluşturulan farklı izolator düzenlerinde teğetsel elektrik alan değerleri, izolator yüzeyinde z koordinatları eşit uzaklıkta olan 45 noktada hesaplanmıştır. İzolator yüzeyindeki teğetsel elektrik alan dağılımları, izolatorün orta noktasına göre simetrik olduğu için izolatorün tepe noktasından orta noktasına kadar sadece 22 noktada teğetsel elektrik alan değerleri YSA'ya giriş vektörü olarak, bu noktaların r – koordinatları da çıkış vektörü olarak uygulanmıştır. Bu durumda, YSA 22 giriş ve 22 çıkış nöronundan meydana gelmektedir.

Bu çalışmada, veri kümeleri için 2 – katlamalı çapraz geçerlilik yöntemi (2 – fold cross – validation method) kullanılmıştır. İzolator için 110 farklı biçim ile hesaplanan bütün veri kümesi, iki alt kümeye bölünmüştür. Birinci durumda 55 örüntüden oluşan birinci alt küme eğitim kümesi olarak, 54 örüntüden oluşan ikinci alt küme test kümesi olarak kullanılmıştır. YSA, belirlenen eğitim kümeleri ile GRN kullanılarak eğitilmiştir. Eğitimin tamamlanmasından sonra ağın güvenilirliğini sınamak amacıyla belirlenen test kümesi ağı uygulanarak, gerçek çıkış ile YSA'nın hesaplamış olduğu çıkış karşılaştırılmış ve hata bulunmuştur. İkinci durumda ise eğitim ve test

kümelerinin yerleri değiştirilerek YSA'ya uygulanmıştır. Bu uygulama ile YSA'nın genelleme yeteneği incelenmiştir.

Bu çalışmada eğitim için toplam karesel hata (sum squared error, sse),

$$sse = \sum_{j=1}^N e_j^2(n) \quad (4)$$

ortalama karesel hata (mean squared error, mse) ve

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (5)$$

hatanın etkin değeri (root mean square, rms)

$$rms = \sqrt{\frac{1}{N n_o} \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_o} (d_{jk} - y_{jk})^2} \quad (6)$$

test için ise ortalama mutlak hata (mean absolute error, mae)

$$mae = \frac{1}{n_t n_o} \sum_{j=1}^{n_t} \sum_{k=1}^{n_o} \left[\frac{|d_{jk} - y_{jk}|}{d_{jk}} \right] 100 \quad (7)$$

formülleri ile hesaplanmıştır. Burada N eğitim kümesindeki tüm örüntü sayısını, C çıkış katmanındaki bütün örüntüleri, n_o çıkış katmanındaki nöron sayısını, n_t ise test kümesindeki örüntü sayısını göstermektedir. Eğitim ve test fazlarında belirlenen hatalar, Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1: Eğitim ve test hataları.

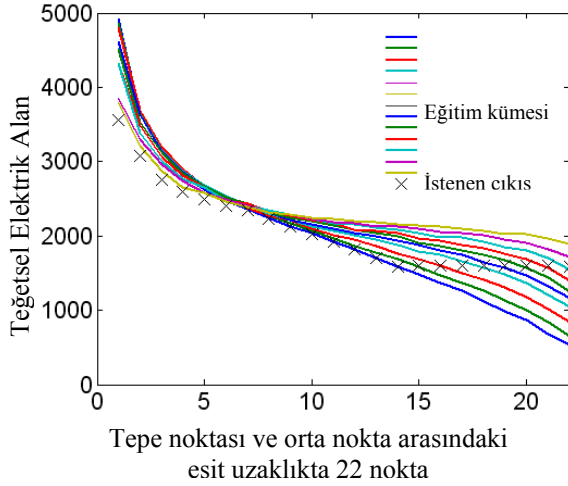
Durum	Eğitim hataları			Test hataları
	sse (%)	mse 10^{-6} (%)	rms (%)	mae (%)
1.	0.0064	5.2653	0.0229	0.6123
2.	0.0020	1.7140	0.0131	0.6174

GRN'de kullanılan σ parametresi deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Her iki durum için de bu parametrenin değeri $\sigma = 0.015$ iken en iyi sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. YSA bu değer kullanılarak eğitilmiştir. İstenen alan dağılımı, eğitim kümesindeki minimum alan dağılımları ve silindirik izolator yüzeyindeki alan dağılımları kullanılarak, olabildiği kadar düzgün bir dağılım sağlayacak şekilde belirlenmiştir. İstenen alan dağılımı eğitim kümesindeki elektrik alan dağılımları ile birlikte Şekil 2'de görülmektedir.

Eğitim ve test fazlarının tamamlanmasından sonra istenen alan dağılımı, optimum izolator biçimini vermek üzere YSAya uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan YSA hesaplamaları MATLAB 6.5 Neural Network Toolbox kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

4. BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ (FIS)

Bulanık mantık, insanın düşünme biçimine uyan bir yöntemdir. Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki temel fark, bulanık mantıkta kesin sınırların olmamasıdır [4, 8-9].



Şekil-2. İzolatör yüzeyindeki teğetsel alan dağılımları.

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 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 [8-9].

4.1 FIS Uygulaması

Elektrik alan dağılımında, elektrot boyutlarıyla ile doğrudan ilgili iki etken vardır [4]. Bu etkenler, izolatörün tepe noktasında oluşan maksimum teğetsel elektrik alan şiddeti ($E_{üst}$) ve orta noktada oluşan elektrik alan şiddetidir (E_{orta}).

Bu çalışmada, karar verme aşamasında, Mamdani bulanık modeli kullanılmıştır. Girişlerin ve çıkışın bulanıklaştırılması için Gaussian ve Sigmoid üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Bütün değişkenler yedi bulanık kümeye bölünmüştür (Şekil 3).

VVS: Very very small (çok çok küçük)

VS: Very small (çok küçük)

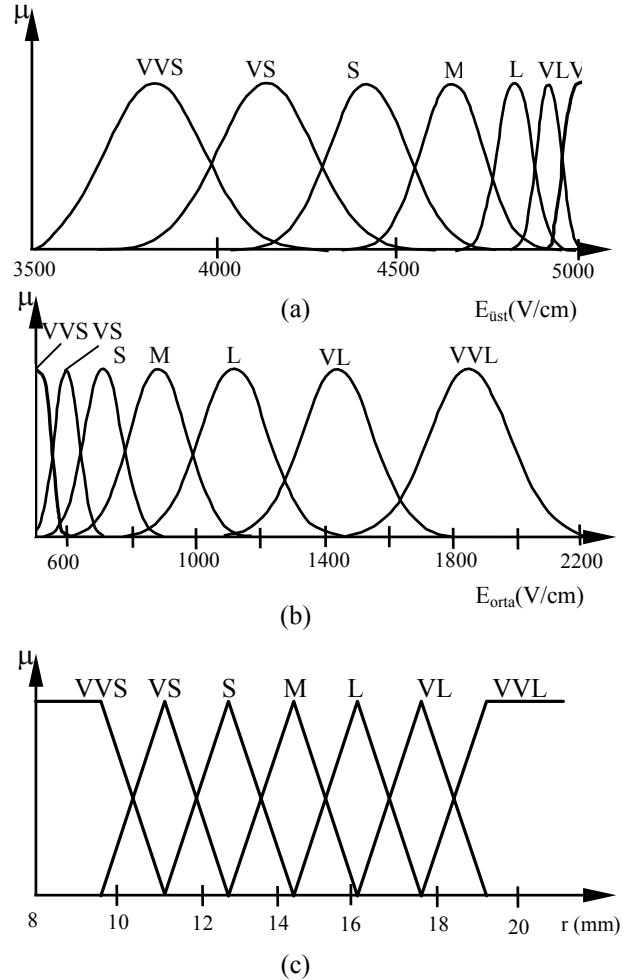
S: Small (küçük)

M: Medium (orta)

L: Large (büyük)

VL: Very large (çok büyük)

VVL: Very very large (çok çok büyük)



Şekil-3. Üyelik fonksiyonları (a) $E_{üst}$ (b) E_{orta} , (c) r .

İzolatörün üst yarıçapı, tepe ve orta noktalarda hesaplanan elektrik alan değerleri kullanılarak, FIS için kurallar oluşturulmuştur. Giriş – çıkış veri kümesi kullanılarak oluşturulan bulanık kural tabanı, bütün olasılıklar bu sistemde aktif durumda olmadığı için 32 kural içermektedir. Bu çalışmada, bulanık mantıksal *VE* operatörü minimum, *VEYA* operatörü maksimum olarak seçilmiştir. Çıkarım yöntemi olarak minimum, durulaştırma için ise Centroid yöntemi seçilmiştir. Sistemde kullanılan *EĞER - O HALDE* ifadeleri aşağıda gösterilen formda yazılarak, kurallar tanımlanmıştır.

$E_{\text{GER}} E_{\text{üst}} A$ ise $VE E_{\text{orta}} B$ ise; $O HALDE r C$ 'dir.

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

İzolatör yüzeyindeki alan dağılımının düzgün olabilmesi için, izolatörün tepe ve orta noktalarının elektrik alan değerlerinin birbirine mümkün olduğu kadar yakın olması gerekmektedir. Optimum izolatör biçimi için, alan dağılımına göre, izolatörün tepe noktasının elektrik alanı 4000 V/cm, ve orta noktasının elektrik alanı 2000 V/cm olarak seçilmiştir. Bu girişler FIS'e uygulandığında, izolatör üst yarıçapı 16,3 mm olarak belirlenir. Söz konusu FIS çalışmaları, MATLAB 6.5 Fuzzy Logic Toolbox kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5. SONUÇLAR

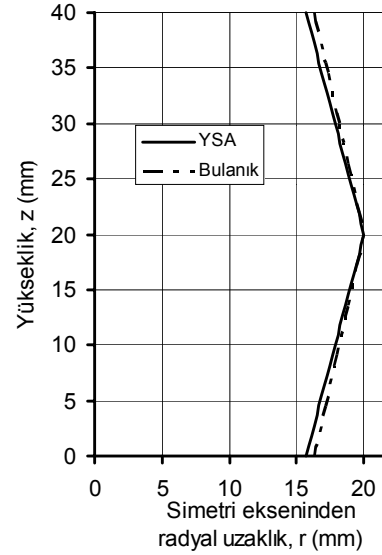
Optimum izolatör biçimi, yapımı kolay, boyutları küçük ve dolayısıyla ekonomik ve uzun ömürlü izolatörler elde etmeyi sağlar. Bu çalışmada optimum izolatör biçimi, YSA ve FIS ile belirlenmiştir. Optimizasyon problemlerinde YSA ve FIS kullanılması, analitik ve deneysel yöntemlere göre bilgisayardan yararlanıldığı için geniş olanaklar sağlar.

YSA ile optimizasyon probleminin çözümünde sonuçlar, eğitimde kullanılan veri sayısına ve öğrenme algoritmasına bağlıdır. Kullanılan veri sayısı yeterli değilse, YSA öğrenmede sorun yaşar ve doğru sonuçlar üretmez. Farklı öğrenme algoritmaları da denenerek, daha uygun sonuçlar araştırılabilir.

FIS, anlaşılması ve uygulaması YSA'ya göre daha kolay bir yöntemdir. FIS'te çözüme ulaşmak için YSA'daki gibi bir eğitim sürecine gerek yoktur. Bu sebeple, YSA'dan çok daha hızlıdır. FIS giriş ve çıkış arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi daha kolay ifade eder. Ancak doğru sonuçlara ulaşabilmek için kural tabanının uygun şekilde oluşturulması gerekir.

YSA ve FIS ile bulunan optimum izolatör biçimleri karşılaştırıldığında, iki yöntemin birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 4). Aralarındaki küçük fark, problem tanımlama, veri sayısı ve algoritmadan kaynaklanmaktadır. İncelenen örnekte YSA'nın daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. FIS için karar, kural ve değişken sayısı arttıkça, doğruluk artacaktır.

Sonuçlardaki uyum, kullanılan yöntemlerin bu tür optimizasyon problemleri için uygunluğunu göstermektedir.



Şekil-4. Belirlenen optimum izolatör biçimleri.

KAYNAKLAR

- [1] Liu, J., Sheng, J., "The Optimization of the High Voltage Axisymmetrical Electrode Contour", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 24, No.1, pp. 39-42, 1998.
- [2] Stih, Z., "High Voltage Insulating System Design by Application of Electrode and Insulator Contour Optimization", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol. EI-21, No. 4, pp. 579-584, 1986.
- [3] Bhattacharya, K., Chakravorti, S., Mukherjee, P. K., "Insulator Contour Optimization by a Neural Network", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insul.*, Vol. 8, No. 2, pp. 157-161, 2001.
- [4] Chatterjee, A., Rakshit, A. and Mukherjee, P. K., "A Self-Organizing Fuzzy Inference System for Electric Field Optimization of HV Electrode Systems", *IEEE Trans. on Dielec. and Electrical Insulation*, Vol. 8, No. 6, pp. 995-1002, 2001.
- [5] Meeker, D., FEMM 4.0 Finite Element Method Magnetics Software, 17 June 2004.
- [6] Spetch, D. F., General Regression Neural Network, *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 2, No. 6, pp. 568-576, 1991.
- [7] Rutkowski, L., Generalized Regression Neural Networks in Time-Varying Environment, *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 15, No. 3, pp. 576-596, 2004.
- [8] Zadeh, L. A., "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.
- [9] Balog, E., Berta, I., "Fuzzy Solutions in Electrostatics", *Journal of Electrostatics*, No. 51-52, pp. 409-415, 2001.