

240 KV'LUK YÜKSEK DARBE GERİLİMİ ÜRETECİ TASARIMI VE YAPIMI

¹⁾Özcan KALENDERLİ ²⁾Hasbi İSMAİLOĞLU ¹⁾Aydoğan ÖZDEMİR
ozcan@elk.itu.edu.tr hasbi@kou.edu.tr ozdemir@elk.itu.edu.tr

¹⁾Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik - Elektronik Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi
80626 Maslak/İstanbul

²⁾Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
Kocaeli Üniversitesi
41040 İzmit/Kocaeli

ABSTRACT

The paper presents design criteria and construction study of an impulse voltage generator of 240 kV. The generator is built to produce standard lightning impulse voltages of 1.2/50 μ s and consists three stages.

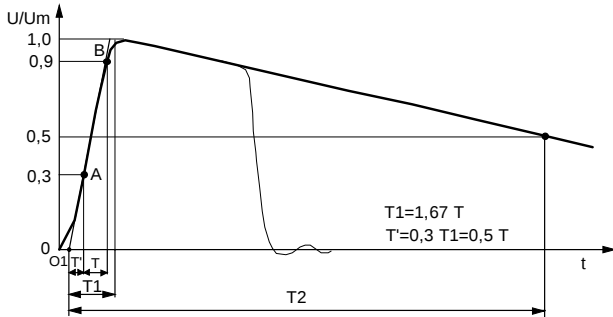
1. GİRİŞ

Yıldırımın yarattığı aşırı gerilimlerin laboratuvar koşullarında üretimi, elektriksel malzeme ve aygıtların, yıldırım aşırı gerilimlerine karşı dayanımını ve davranışını incelemek ve saptamak için gerekli olmaktadır. Yıldırım darbe gerilimlerinin üretimi için yıllar boyu pekçok farklı yapıda darbe gerilimi üretici tasarlanmış, gerçekleştirilmiş ve kullanılmaktadır.

Bu çalışmada da orta gerilim elektromekanik aygıtlarının darbe gerilimi deneylerini yapmaya uygun olarak tasarlanan ve yapılan bir darbe gerilimi üreticinin tasarım aşamaları, yapımı ve özellikleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Sunulan bu çalışma, öncelikle yıldırım darbe geriliminin ve darbe gerilimi üreticilerinin bilinmesini gerektirdiği için önce bu konular açıklanacaktır.

2. YILDIRIM DARBE GERİLİMİ

Yıldırım darbe gerilimi, Şekil 1'deki gibi tek yönlü, periyodik olmayan bir gerilimdir.



Şekil 1. Tam yıldırım darbe gerilimi.
----- Kesik yıldırım darbe gerilimi.

Bu şekliyle tam yıldırım darbe gerilimi, tepe değeri (U_m), kutbiyeti (polaritesi), cephe süresi (T_1) ve sırt yarı değeri süresi (T_2) ile; bir atlama veya delinme sonucu oluşan kesik darbe gerilimleri ise tam yıldırım darbesini tanımlayan büyüklüklere ek olarak kesilme süreleri ile tanımlanırlar. Yıldırımın oluşum biçimine göre, darbe gerilimi pozitif (artı) veya negatif (eksi) kutbiyetli olur.

Yıldırım darbe gerilimini tanımlayan karakteristik sürelerden biri olan T_1 cephe süresi, darbe dalgasının cephesinde tepe değerin %30'u ile %90'ına ulaşılan $T_{\%30U_m}$ ve $T_{\%90U_m}$ anları arasındaki

$$T = T_{\%90U_m} - T_{\%30U_m} \quad (1)$$

T süresinin 1,67 katı olan süre olarak tanımlanır:

$$T_1 = 1,67 T \quad (2)$$

T_2 sırt yarı değer süresi, O_1 anma darbe başlangıç noktasına göre tanımlanır. Anma darbe başlangıç noktası, darbe dalgasının cephesinde tepe değerin %30'una ulaştığı andan $0,3T_1$ kadar önceki noktadır (T_{O1}). Doğrusal zaman eksensli dalga şekillerinde, Şekil 1'deki A ve B noktalarından geçen doğrunun zaman eksenini kestiği noktadır. Buna göre sırt yarı değer süresi, anma başlangıç noktası ile gerilimin darbe dalgasının sırtında tepe değerin yarısına düştüğü $T_{\%50U_m}$ anı arasındaki

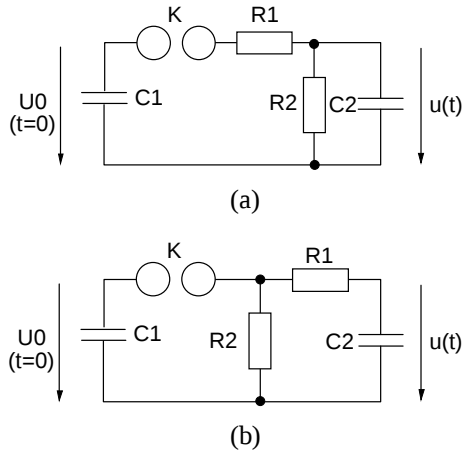
$$T_2 = T_{\%50U_m} - T_{O1} \quad (3)$$

süre olarak tanımlanır. Cephe süresi ve sırt yarı değer süresi için, gerçek yıldırım darbe sürelerini esas alarak standartlaştırılmış birkaç değer bulunmaktadır. Bu değerler içinde cephe süresinin $1,2 \mu s \pm \% 30$, sırt yarı değer süresinin $50 \mu s \pm \% 20$ alındığı 1,2/50'lik standard yıldırım darbe gerilimi en yaygın kullanılan yıldırım darbe gerilimi biçimidir [1-4].

3. DARBE GERİLİMİ ÜRETEÇLERİ

Yıldırım darbe gerilimi üreticileri (generatörleri), yüksek gerilim kondansatörlerinin doğru gerilimle doldurulup bir devre üzerinden boşaltılması ilkesine dayanmaktadır. Şekil

2'de iki temel darbe gerilimi üretici eşdeğer devresi gösterilmiştir. Kısaca bu devrelerin çalışması özetlenirse: önce C_1 kondansatörü U_0 gerilimi ile doldurulur. Uygulanan gerilim, kat küreleri arasında atlama gerilimi değerine ulaştığında küreler arasında atlama olur ve C_1 kondansatörü R_1 direnci üzerinden C_2 kondansatörüne boşalır. C_2 kondansatörü Şekil 2a'daki devrede R_2 direnci üzerinden, Şekil 2b'deki devrede R_1+R_2 dirençleri üzerinden boşalır. Bu iki evrede C_2 uçlarında darbe gerilimi oluşur. Elde edilen gerilimlerin genliğini arttırmak için bu devrelerin ardışık bağlandığı çok katlı darbe gerilimi üreticilerinden yararlanılır [5-7].



Şekil 2. Temel darbe gerilimi üretici eşdeğer devreleri.

- U_0 : Doldurma gerilimi
- C_1 : Darbe kondansatörü
- C_2 : Yük kondansatörü
- R_1 : Cephe direnci
- R_2 : Sırt direnci
- K: Kat küreleri
- $u(t)$: Darbe gerilimi

4. DARBE GERİLİMİ ÜRETECİNİN TASARIMI

4.1. Üreteç Gerilim Düzeyinin Belirlenmesi

Darbe gerilimi üreticinin tasarımına başlamadan önce, üreteç ile denenmesi düşünülen nesnelerin gerilim düzeylerini ve kapasite değerleri aralığını bilmek gerekir. Her aygıtın dayanmak zorunda olduğu gerilim düzeyleri standartlarda açıklanmıştır [8, 9]. Örneğin 36 kV'luk aygıtlar için standartlarda dayanması öngörülen yıldırım darbe gerilimleri değerleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Yıldırım darbesi dayanma gerilimi değerleri.

İşletme gerilimi	Yıldırım darbesi dayanma gerilimi	
	Faz-toprak	Faz-faz arası
36 kV	170 kV _{tepe}	195 kV _{tepe}

Dolayısıyla böyle bir aygıtın darbe deneylerinin yapılabilmesi için kullanılacak darbe gerilimi üreticinin en az bu gerilimleri üretmesi gerekir.

Darbe gerilimi üreticilerinin yüke (deney cismi kapasitesine) bağlı olarak verimleri %80 ile %95 arasında

değiştirdiği de göz önüne alındığında, üreticinin deney geriliminden daha yüksek gerilime göre tasarlanması gerektiği açıktır. Deney cismi kapasitesi küçüldükçe üreteç verimi yükseldiğinden, %95 verime hatta biraz daha yüksek verimlere ulaşılabilir. Bunun yanında darbe deneylerinde yalnızca nesnelerin dayanımı değil, dayanma paylarının da (atlama, delinme değerlerinin de) belirlenmesi amacıyla gerilim yükseltilmektedir. Dolayısıyla darbe gerilimi üreticinin bu gerilimlere çıkabilecek özellikte olması gerekmektedir. Bu son durumda, 170 kV_{tepe} veya 195 kV_{tepe} darbe gerilimlerine dayanması istenen nesnelerin %10-15'lere varan dayanma paylarına sahip olabilecekleri göz önüne alınırsa, bu üreticinin 200-230 kV arasında gerilim verebilecek düzeyde olması gerektiği anlamına gelir. Sonuç olarak, üreteç verimi de dikkate alındığında 240 kV'a göre tasarlanacak bir darbe gerilimi üreticinin, yukarıda sözü edilen isteklere yanıt verebilecek yeterlilikte olacağına karar verilmiştir.

Tasarımda, denenecek cisim kapasitelerinin, güç transformatörü gibi büyük kapasiteli deney cisimleri dışında, genellikle 100-1000 pF arasında değişebileceği göz önüne alınmıştır.

4.2. Devre Elemanlarının Tasarımı

4.2.1. Darbe Kondansatörü

Bir darbe gerilimi üreticinin en önemli elemanı, yüksek gerilim darbe kondansatörüdür. Bu kondansatörün gerilim düzeyi, üreticinin gerilim düzeyine eşit olmalıdır. Bunu sağlamak için genel olarak seri bağlantı ile istenen gerilime uygun kondansatör yapısı oluşturulur.

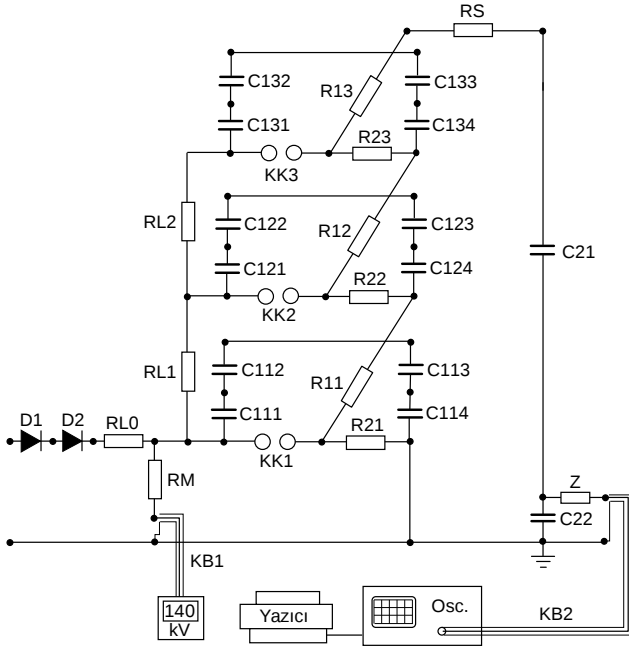
Üreticinin gerçekleştirilmesinde kullanılacak malzemelerin yurt içinden sağlanması ve üreticinin öncelikle ülkemizde bulunabilen malzemelerden yapılmasına çalışılmıştır. Ülkemizde, özel bir imalat yapılmadıkça, var olan kondansatörlerin gerilim düzeyleri ve kapasiteleri ile ilgili seçenekler sınırlıdır. Üreteçte bir fazlı, 0,25 µF, 20 kV'luk kondansatörlerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu seçim, darbe gerilimi üreticinin çok katlı üretilmesini gerekli kılmıştır.

Seçilen kondansatörlerle 240 kV'luk üreteç oluşturulmasına karar verildiği için, üreteçte 240 kV/20 kV = 12 kondansatöre gerek olduğu açıktır (darbe üreticisi çalışırken bütün darbe kondansatörleri seri bağlı durumdadır). Çok katlı darbe üreticilerinde, kat başına düşen kondansatör sayısı farklı şekillerde seçilebilir. Bu seçeneklerden her katta seri bağlı 4 kondansatör kullanma ve böylelikle 3 katlı (yani her katı 80 kV'luk) darbe üreticisi yapma seçeneği tercih edilmiştir. Bu seçimde, besleme transformatörünün gerilim düzeyi, yapılacak eleman sayısı, yapım sonrasındaki sorunlar ve üreteç boyutları gibi etkenler göz önüne alınmıştır.

4.2. Dirençler

Katlardaki kondansatör yapısına karar verdikten sonra, sıra katlarda kullanılacak direnç değerlerini belirlemeye gelir. Bunun için de önce, darbe gerilimi üreticinin prensip bağlantı şekline karar vermek gerekmektedir.

Tasarımda, veriminin yüksekliği nedeniyle eşdeğer devresi Şekil 1b'deki devreye uygun çok katlı bir darbe gerilimi üretici yapılmasına karar verilmiştir (Şekil 3). Bu devrenin bilgisayarda Pspice programı ile çözümlenmesinden direnç değerleri hesaplanmıştır. Buna göre her katta 60 ohm'luk cephe direnci ve 1100 ohm'luk sırt direnci yapılmasına karar verilmiştir. Ayrıca üreticinin çıkışına, üreteçle yük kondansatörü arasına bağlanmak üzere 450 ohm'luk ek direnç yapılması düşünülmüştür. Ek direncin değeri, darbe cephe süresini toleranslar içinde elde edebilecek şekilde seçilmiştir.



Şekil 3. 240 kV'luk darbe gerilimi üreticinin devresi.

D1, D2: Diyet, 140 kV, 500 kohm

RL0: Ön direnç, 1 Mohm, 10 W, 100 kV

RL1, RL2: Doldurma direnci, 50 kohm, 3 W, 100 kV

RM: Doğru gerilim ölçü direnci, 140 Mohm, 140 kV

C111-C134: Kat darbe kondansatörü, 0,25 μ F, 20 kV

KK1, KK2, KK3: Kat küresi, ϕ :125 mm

R11, R12, R13: Kat cephe direnci, 60 ohm, 100 kV

R21, R22, R23: Kat sırt direnci, 1100 ohm, 100 kV

RB: Dış seri direnç, 450 ohm, 100 kV

C21: Yük kondansatörü, 650 pF, 300 kV

C22: Ölçme kondansatörü, 0,66 μ F, 1000 V

Z: Uyum empedansı, 75 ohm, 1 W

KB1, KB2: Eşksenli ölçme kablosu, 75 $\pm$ 2 ohm, 8 m

Osc.: İki kanallı dijital osiloskop, 60 MHz

kV: Dijital yüksek doğru gerilim voltmetresi

Cephe ve sırt dirençleri ve dış ek direnç, yalıtkan bir kaide üzerine bifiler şekilde sarılmış direnç telinden yapılmıştır.

Kat kondansatörleri, doldurma dirençleri üzerinden doldurulur. Üç katlı üreticinin katları arasında iki doldurma direncine gereksinim vardır. Bu amaçla, karbon

dirençlerden iki adet 50 kohm, 100 kV'luk doldurma direnci yapılmıştır.

Devre içindeki tüm bağlantılar, bağlantı iletkenlerinden gelebilecek endüktans en aza indirmek için, bakır lamalarla yapılmıştır.

4.3. Yük kondansatörü, Gerilim Bölücü

Darbe üreticinin çözümünden, devrenin çıkışındaki yük kondansatörünün değeri 650 pF olarak hesaplanmıştır. Bu kondansatör aynı zamanda üretilen darbe gerilimini ölçmek için kapasitif gerilim bölücü olarak kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarımda, gerilim bölücünün çevirme oranı, darbe geriliminin bir osiloskop yardımıyla ölçülmesi düşünülerek belirlenmiştir. Yük kondansatörü alçak gerilim kondansatörlerinden yararlanılarak yapılmıştır.

4.4. Kat Küreleri

Darbe gerilimi üreteçlerinde devreyi anahtarlama ve gerilimin tepe değerini ayarlamak amacıyla kat küreleri kullanılır. Gerçeklenen üç katlı darbe gerilimi üreticinde, bakırdan yapılmış, 125 mm ϕ çapında, yarım küre şeklinde kat küreleri kullanılmıştır. Küre ϕ çapı, çalışılan gerilim aralığında küreler arasında kararlı atlama elde edilebilecek şekilde seçilmiştir. Kat kürelerinden biri sabit tutulmuş, diğeri uzaktan motor kumandası ile eksenel hareket edebilecek şekilde tasarlanmıştır.

4.5. Yüksek Doğru Gerilim Katı (Besleme Katı)

4.5.1. Kumanda Masası

Darbe gerilimi üreticini beslemek amacıyla yüksek doğru gerilim beslemesine gereksinim vardır. Yüksek doğru gerilim, yüksek alternatif gerilimin doğrultulmasıyla elde edilir. Tüm deney devresinin beslemesi, ölçmeler, kontrol ve kumanda, deney alanı dışına yerleştirilen bir kumanda masasından yapılır. Kumanda masasında, yüksek gerilim transformatörünün giriş gerilimini ayarlamak için bir değişken transformatör (varyak), bu giriş gerilimini gösteren voltmetre, devreden çekilen akımı gösteren bir ampermetre, yüksek doğru gerilim voltmetresi, darbe gerilimi dalgasını almak ve darbe büyüklüklerini belirlemek için bir osiloskop, kat küreleri arası açıklığı ayarlamak için düğmeler ve devre açma-kapamaya yarayan anahtarlar bulunur. Çalışmada yukarıda sayılan özellikte bir kumanda masası tasarlanmış ve kullanılmıştır.

4.5.2. Yüksek Gerilim Transformatörü

Üretici beslemek için 80 kV'luk doğru gerilime gereksinim vardır. Bu gerilimin sinüsoidal alternatif gerilimden doğrultularak elde edileceği düşünülürse, $80 \text{ kV} / \sqrt{2} = 56 \text{ kV}$ luk bir transformatör kullanılmalıdır. Buna karşılık, çalışmada, mevcut 0,22/100 kV, 5 kVA'lık tek fazlı bir transformatörden yararlanılmıştır.

4.5.3. Diyetler

Darbe gerilimi üreticini beslemek için tek yollu, yarım dalga doğrultucu şeklinde bir yüksek doğru gerilim katı tasarlanmıştır. Doğrultucuda 140 kV, 500 kohm'luk iki

diyot kullanılmıştır. Yüksek gerilim diyotları, seri bağlı alçak gerilim diyotlarından yapılmış, seri bağlı direnç yapısı ile diyotlardan geçen akım sınırlanmıştır. Diyotlar, yüzeyel boşalmaları önlemek ve soğutma amacıyla içi yağ dolu bir yalıtkan boru içine konmuştur.

4.5.4. Ön Direnç

Besleme devresi için 1 Mohm, 100 kV'luk bir öndirenç tasarlanmıştır. Bu öndirencin görevi, doğru gerilim katının ve darbe gerilimi üreticinin çektiği akımı sınırlamak, darbe üreticinin doldurma direnci görevini yapmaktır. Öndirenç, 10 kohm'luk karbon dirençlerden yapılmıştır.

4.6. Yüksek Doğru Gerilimin Ölçülmesi

4.6.1. Yüksek Doğru Gerilim Ölçü Direnci

Yüksek doğru gerilim katının çıkışına, seri direnç-ampermetre ilkesi ile yüksek doğru gerilimi ölçmek için 140 Mohm, 140 kV'luk bir yüksek gerilim ölçü direnci tasarlanmıştır [5-7]. Yüksek doğru gerilim ölçme devresinin seri direnci karbon dirençlerden yapılmıştır.

4.6.2. Ampermetre (Voltmetre)

Yüksek doğru gerilimi ölçmek için bir dijital ampermetre kullanılmıştır. Kumanda masasına yerleştirilen bu ampermetre, ölçü direncine eşeksenli bir ölçü kablosu ile bağlanmış ve Ohm yasasına göre dirençten geçen akımla uygulanan gerilimin doğru orantılı olmasından yararlanarak ve doğrudan uygulanan yüksek doğru gerilimi gösterecek şekilde ölçeklenmiştir.

4.7. Yüksek Darbe Geriliminin Ölçülmesi

Deney devresinin çıkışındaki kapasitif gerilim bölücünden alınan darbe gerilimi, bir tepe değer voltmetresi ile ölçülebilir. Fakat deney devrelerinde, darbe gerilimini ölçmek, dalga şeklini görmek, dalga büyüklüklerini saptamak ve doğrulamak ve deney sonunda deney cisminde dayanma-atlama-delinme durumunu değerlendirmek için osiloskop kullanımı yaygındır. Çalışmada bu düşünce ile 60 MHz'lik bir dijital osiloskop kullanılmıştır. Ayrıca, osiloskop bir yazıcıya bağlanarak yazılı çıkış alma olanağı bulunmuştur.

4.8. Darbe Gerilimi Üreticinin Diğer Özellikleri

Bir darbe gerilimi üreticinin önemli parametrelerinden birisi de darbe enerjisi. Darbe enerjisi,

$$W = \frac{1}{2} C_1 U_0^2 \quad (4)$$

bağıntısından hesaplanır. Buna göre yapılan üreticinin darbe enerjisi, maksimum doldurma gerilimi $U_0 = 240$ kV ve eşdeğer darbe kapasitesi $C_1 = 20,83$ nF olduğuna göre 600 J'dür.

Üreticinin verimi, çıkış gerilimi tepe değerinin doldurma gerilimine oranıdır ve

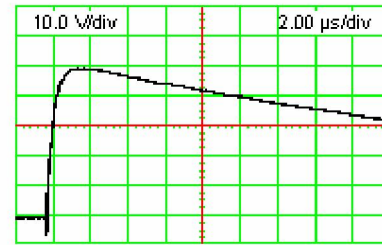
$$\eta = \frac{U_m}{U_0} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (5)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Gerçeklenen üreticte $C_1 = 20,83$ nF ve $C_2 = 650$ pF = 0,65 nF olduğuna göre verim yaklaşık %97 dir.

Tasarım ve gerçekleştirme sonunda ortaya çıkan yıldırım darbe gerilimi üreticinin yüksekliği 2 m, kapladığı taban alanı 2×1 m² ve toplam ağırlığı 250 kg olmuştur. Bu tür üreticler genelde sabit (hareketsiz) düzenler olarak üretilirlerse de, yapılan üretic yer değiştirme kolaylığı bakımından tekerlekli (hareketli) bir taban üzerine yerleştirilmiştir.

5. DENEYLER

Darbe gerilimi üreticisi tasarımı ve yapımı tamamlandıktan sonra üretic karakteristیکlerinin deneysel olarak çıkarılması ve kontrolü amacıyla deneyler yapılmıştır. Bunun için üretic çalışma gerilimi aralığında çalıştırılmış, boşalma ve yalıtım sorunu olup olmadığı gözlenmiş ve çıkış dalga şekilleri osiloskop üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 4'te gerçekleştirilen darbe gerilimi üreticinden elde edilen bir dalga şekli örneği gösterilmiştir. Üreticten, şekilden de görüldüğü gibi, parazitsiz, anma parametrelerine toleransları içinde uygun bir dalga şekli elde edilmiştir.



Şekil 4. Deneysel olarak elde edilen darbe gerilimi şekli.

6. SONUÇ

Darbe gerilimi üreticileri, yüksek gerilim teknolojisi gerektirmesi, az sayıda üretilmeleri, özel amaçlar için kullanılmaları nedeniyle pahalı düzenlerdir. Yüksek darbe gerilimi üreticisi yapan ve satan özellikle yurt dışında birçok firma vardır. Ülkemizde bu üretimin profesyonel olarak yapılmaması nedeniyle elektromekanik sanayimiz bu gereksinimini genellikle yurt dışındaki bu firmalardan, büyük paralar ödeyerek karşılamaktadır. Bu çalışma bu tür üreticilerin yurt içinde yapılabilme olanağını ve üretimin sorunlarını sunmaktadır.

7. KAYNAKÇA

- [1] TS 350, Darbe Gerilimi, *Türk Standardı*, Mart 1996.
- [2] IEC 60060-1: High Voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions on Test Requirements, November 1989.
- [3] IEC 60060-2: High Voltage Test Techniques, Part 2: Measuring Systems, November 1994.
- [4] TS 3008, Yüksek Gerilim Deney Yöntemleri-Bölüm 1: Genel Tanımlar ve Deney Koşulları, *Türk Standardı*, 1990.

- [5] Özkaya, M., *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt 2, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1996.
- [6] Naidu, M. S., Kamaraju, V., *High Voltage Engineering*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 1990.
- [7] Kind, D. (çeviren: Rumeli, A.), *Yüksek Gerilim Deney Tekniğine Giriş*, Vieweg-ODTÜ, Ankara, 1992.
- [8] IEC 71-1, *Insulation Coordination, Part 1: Terms, definitions, principles and rules*, 1993.
- [9] TS 855, *Yalıtım Koordinasyonu, Türk Standardı*, Nisan 1984.