

## 14 kV Darbe Gerilimi Üreteci Tasarımı ve Yapımı Design and Construction of 14 kV Impulse Voltage Generator

Özcan Kalenderli, Ersin Ok, Selçuk Çelebi

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul  
ozcan@elk.itu.edu.tr, oker@elk.itu.edu.tr

### Özet

Yüksek gerilim güç aygıtları, yıldırımdan ciddi zararlar görebilir. Bu nedenle karşılaşılabilecekleri yıldırım darbelerine dayanabilecek güç aygıtları üretebilmek ve var olanların davranışını saptayabilmek için yıldırım darbe gerilimi deneylerinin yapılması önemlidir. Bu tür deneyler yapay yıldırım darbe gerilimi üreteçleri ile yapılır. Bu çalışmada, böyle bir amaç için kullanılmak üzere gerçekleştirilmiş 14 kV'luk bir darbe gerilimi üretecinin tasarımı ve yapımı anlatılmaktadır. Çalışma sonucunda standart yıldırım darbesi üreten 14 kV'luk bir darbe üreteci başarıyla tamamlanmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir.

### 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 behaviour of the equipments under the impulse voltage, to develop reliable insulation designs. In this type tests, artificial lightning impulse voltage generators are used. In this study, the design and construction of a 14 kV impulse generator is explained. It is seen that the pulse of 14 kV generator clearly satisfies the values of a standard impulse and got ready for the tests.

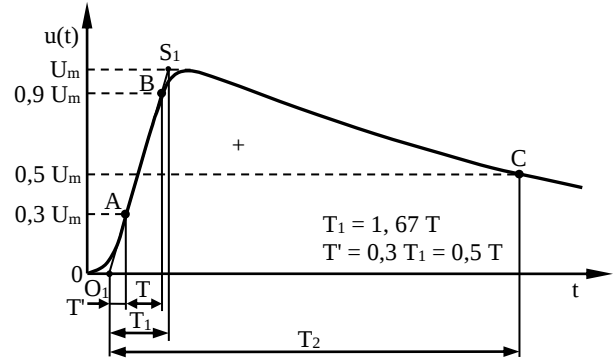
### 1. Giriş

İç ve dış aşırı gerilimdeki zorlanmalar ve delinme olayı ile ilgili temel araştırmalar için yapılan yüksek gerilim deneylerinde, darbe gerilimlerine gereksinim vardır. Darbe gerilimleri; yüksek gerilim kondansatörlerinin, dirençler ve kondansatörler üzerinden çok kez katlı montaj şemaları ile boşalması sırasında üretilir. Yüksek gerilim tekniğinde, darbe gerilimi teriminden pozitif veya negatif kutbiyette bir doğru gerilim darbesi anlaşılır [1-8].

Bir darbe geriliminin zamana göre değişimi ve süresi, üretim şekline bağlıdır. Temel araştırmalar için darbe şeklinde, yaklaşık sabit bir değere kadar yükselen 'dikdörtgen darbe gerilimleri' ve atlama veya delinme oluncaya kadar mümkün olduğunca lineer olarak yükselen 'kama şeklinde darbe gerilimleri' kullanılır. Deney amaçları için üretilen 'çift üstel darbe gerilimleri' standart hale getirilmiştir. Bu gerilimler, önemli titreşimler olmaksızın sıfırdan  $U_m$  tepe değerine kadar hızla yükselir ve daha yavaş bir seyirle tekrar sıfıra inerler.

Darbe gerilimi deneylerinde kullanılan dalga şekilleri, standartlarla tanımlanmış şekillere sahiptir. Bir darbe gerilimi,

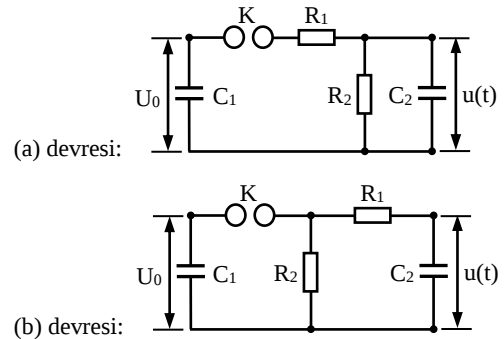
dalga şekli ve onun üzerinden çıkarılan, gerilimin  $U_m$  tepe değeri,  $T_1$  cephe süresi,  $T_2$  sırt yarı değer süresi ve kutbu olmak üzere dört parametre ile tanımlanır (Şekil 1).



Şekil 1: Darbe gerilimi dalgası ve karakteristik büyüklükleri.

Şekil 1'de A ve B noktalarını birleştiren doğrunun O1 anma başlangıç noktası ile S1 noktaları arasındaki lineer yükselişi darbe geriliminin cephesi olarak kabul edilebilir. Böylece  $T_c$  cephe süresi ve O1 noktasından C noktasına kadar geçen  $T_s$  sırt yarı değer süresi de belirlenmiş olur. Standart yıldırım darbe gerilimlerinde, toleransları ile, cephe süresi  $T_c = 1,2 \mu s \pm \% 30$  ve sırt yarı değer süresi  $T_s = 50 \mu s \pm \% 20$  olduğundan, yıldırım darbe gerilimleri 1,2/50 olarak belirtilirler [9-12].

Darbe gerilimi üretiminde a veya b tipi darbe devreleri kullanılır (Şekil 2) [13-16].

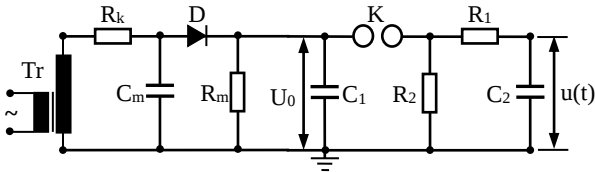


Şekil 2: a ve b tipi darbe gerilimi üreteç devreleri

Bu devrelerde  $C_1$  darbe kondansatörü yüksek değerli bir yük direnci üzerinden  $U_0$  doğru gerilimi ile doldurulur ve K küresel elektrotları arasında atlama olması ile  $C_1$  boşalır. İstenen  $u(t)$  darbe gerilimi,  $C_2$  yük kondansatörünü uçları arasında meydana gelir. a ve b devreleri birbirinden,  $R_2$  boşalma direncinin bir defa  $R_1$  doldurma direncinin arkasında, bir defa da önünde olmaları ile ayırt edilirler. Devre elemanlarının değerleri, darbe geriliminin şeklini belirler.

## 2. Üreteç Yapımı

Yukarıdaki bilgilere göre maksimum 14 kV tepe değerli standart darbe gerilimi üretecek bir darbe üretici tasarımı ve yapımı amaçlanmıştır. b tipi darbe üretici devresine göre tasarlanan üreteç devresi, besleme, koruma, doğrultma, ölçme elemanları ile birlikte Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3: Tasarlanan darbe gerilimi üreteç devresi

Üreteçteki devre elemanlarının değerleri 1,2/50  $\mu$ s'lik standart yıldırım gerilimi üretecek şekilde aşağıdaki gibi seçilmiştir:

Öndirenç,  $R_k = 4 \text{ k}\Omega$ , 100 W  
 Kapasitif gerilim bölücüsü,  $C_m$ : 100 pF, 10 kV (AA)  
 Diyot, D: 30 mA, 14 kV (DA)  
 Ohmik gerilim bölücüsü,  $R_m$ : 14 M $\Omega$ , 14 W  
 $C_1 = 10 \text{ nF}$ , 14 kV (DA)  
 $R_1 = 375 \Omega$ , 33 W  
 $R_2 = 6100 \Omega$ , 33 W  
 $C_2 = 1200 \text{ pF}$ , 14 kV (DA)

Bu eleman değerleri ile yapılan darbe üreticinin enerjisi:

$$W = \frac{1}{2} C_1 U^2$$

$$W = \frac{1}{2} 10 \times 10^{-9} \times (14 \times 10^3)^2$$

$$W = 0,98 \text{ J}$$

$T_s$  sırt yarı değer süresi:

$$T_1 = R_2 \cdot (C_1 + C_2)$$

$$T_1 = 68,32 \mu\text{s}$$

$$T_s = k_1 \cdot T_1 = 0,73 \cdot 68,32 = 50 \mu\text{s}$$

$T_c$  cephe süresi:

$$T_2 = R_1 [C_1 C_2 / (C_1 + C_2)]$$

$$T_2 = 0,4 \mu\text{s}$$

$$T_c = k_2 \cdot T_2 = 2,96 \cdot 0,4 = 1,2 \mu\text{s}$$

Darbe üreticinin verimi:

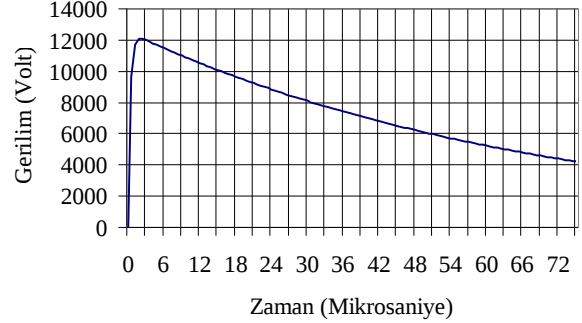
$$\eta = C_1 / (C_1 + C_2)$$

$$\eta = \% 89$$

Göz önüne alınan devrenin çıkış dalgasını denklemi

$$u(t) = \frac{U_0}{R_1 \cdot C_2} \frac{T_1 \cdot T_2}{(T_1 - T_2)} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2})$$

olur [1-8]. Bu denklemde yukarıda sözü edilen ve hesaplanan değerler kullanılırsa tasarlanan devrenin çıkış dalga şekli, Şekil 4'teki gibi olur.

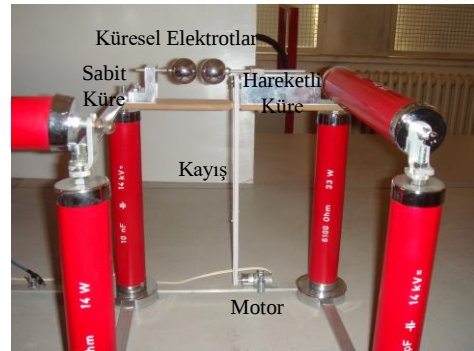


Şekil 4: Darbe üreticinin çıkış dalga şekli.

Darbe üreticinin yapımında, devredeki yüksek gerilim devre elemanları, belirli gerilimlere ve güçlere dayanabilecek şekilde seçilmiş alçak gerilim dirençleri ve kapasitelerinin seri ve/veya paralel bağlanması ile oluşturulmuştur. Bu elemanlar, 50 mm çaplı, 3 mm et kalınlıklı, 300 mm uzunluklu PVC borulara yerleştirilmiştir. Ölçme elemanlarının koyulacağı borulara ölçme kablolarının bağlantıları için BNC giriş uçları takılmıştır. Daha sonra borular boyanıp üzerlerine eleman bilgileri yazılmıştır. Borular içine yerleştirilen elemanlar, boruların uçlarına takılan 50 mm çaplı alüminyum kapaklara tutturularak yapımı tamamlanmıştır.

İkinci aşamada hazırlanan elemanların istenen direnç ve kapasite değerlerini ve devredeki görevlerini karşılayıp karşılamadıklarına, ohmik ve kapasitif gerilim bölücülerin çalışıp çalışmadığına Yüksek Gerilim Laboratuvarı'ndaki deney düzenekleriyle bakılmıştır.

Bir sonraki iş, darbe üreticinde anahtarlama elemanı olarak kullanılacak kat küresi olarak ta söylenen küre-küre elektrot sisteminin yapımı olmuştur. Küre elektrot olarak krom kaplı pirinçten yapılmış, 4 cm çaplı küreler kullanılmıştır (Şekil 5).

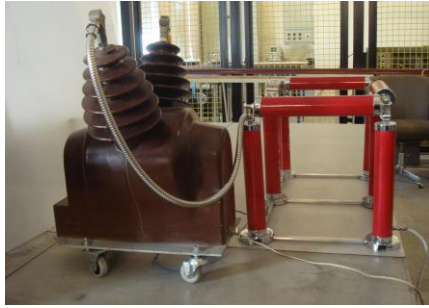


Şekil 5: Darbe üreticinin küresel elektrot sistemi

Kürelerden biri sabit (hareketsiz) tutulmuş ve bir alüminyum ayak üzerine monte edilmiştir. Diğer küre elektrot ise hareket edecek şekilde tasarlanmıştır. Bunun için hareketli kürenin dönmeyen ileri ve geri gitmesine olanak sağlayacak, böylece sabit küreye yaklaşıp uzaklaşmasının yani elektrot açıklığının

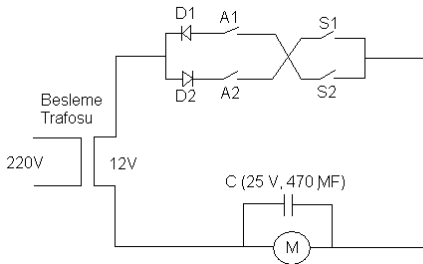
değiştirilmesinin olanaklı olacağı bir alüminyum yatak yapılmıştır. Hareketli küreyi hareket ettirmek için küçük bir doğru akım motoru ve makara-kayış sistemi kullanılmıştır. Bu sayede motoru bir çift yönlü anahtarla kumanda ederek hareketli kürenin sabit küreye yaklaşıp uzaklaşması sağlanmıştır.

Sonraki aşamada, trafonun ve devre elemanlarının oturtulacağı düzen hazırlanmıştır. İTÜ Yüksek Gerilim Laboratuvarı- Maslak'ta bulunan 11000/240 V'luk, 400 VA'lık kuru tip (reçine yalıtkanlı) gerilim ölçü trafosu, devrenin yüksek alternatif gerilim kaynağı olarak kullanılmıştır (Şekil 6). Kullanılan trafo, altına tekerlekler takılarak kolayca hareket edebilir hale getirilmiştir. Devre elemanlarını oturtmak için 20 mm genişliğinde, 5 mm kalınlığında, 350 mm uzunluğunda 7 adet alüminyum çubuk kullanılmıştır. Köşelerine devrenin sabit biçimde durabilmesi için 8 cm çapında, 16 mm yüksekliğinde, dört yöne bağlantı ağızları bırakılan krom kaplama kapaklar konulmuştur.



Şekil 6: Kullanılan, tekerlekli, yüksek gerilim trafosu

Sonraki aşamada darbe üreticinin çok önemli bir kısmı olan kumanda panosunun yapımına geçilmiştir. Pano; plastik kapaklardan, dikkörtgenler prizması şeklinde yapılmıştır. Şebeke gerilimini sağlayan fiş panonun arka kısmından girmekte ve sigorta üzerinden ana giriş anahtarına bağlanmaktadır. Panonun içinde ilk olarak yüksek gerilim trafosuna istenilen gerilimi verebilmek için bir adet ototransformatör yerleştirilmiştir. Bu ototransformatörün çıkış gerilimi; iki anahtar, şebekeden beslenen 220 / 12 V'luk bir trafo, trafonun çıkış alternatif gerilimini doğrultmak için iki diyot ve çıkış doğru gerilimini düzeltmek için kullanılan kapasiteden oluşan bir devre ile kontrol edilmektedir (Şekil 7).

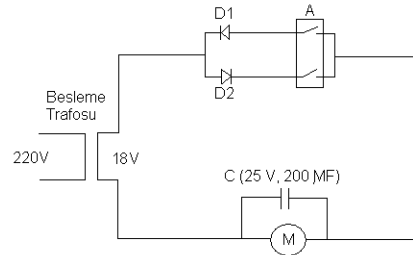


Şekil 7: Ototransformatör motoru besleme devresi

Ayrıca devreye bağlanan iki adet sınır kontak sayesinde, motorun beslemesi ototrafonun çıkış gerilimi minimum ve maksimum değerlerine ulaştığında kesilerek motorun zorlanmasının önüne geçilmiştir. Devrenin çalışması şu şekildedir: Besleme trafosunun çıkışında D1 ve D2 diyotları ile doğrultulan gerilim, motorun sağa ve sola dönmesini

sağlayarak ototransformatör çıkış geriliminin ayarlandığı A1 ve A2 anahtarlarına bağlıdır. Bu anahtarlar da S1 ve S2 sınır kontaklarına bağlıdır. Anahtarlardan birine basıldığında devre tamamlanarak motor doğrultulmuş ve C kapasitesi sayesinde düzeltilmiş gerilimle sınır kontaklar açılıncaya kadar beslenir. Bu sayede çıkış gerilimi 0 / 220 V arasında istenilen değere ayarlanabilmektedir.

Panoda ayrıca küre motorunun hareketini sağlayan devre de bulunmaktadır. Bu devreyi 220 / 9 V'luk bir başka trafo beslemektedir. Devre tamamlandıktan sonra motor panonun dışında olduğu için panodan bir çıkış alınmıştır. Devrenin çalışması ototransformatör motorunun çalışmasına benzerdir. Farkları; besleme trafolarının ve gerilim doğrultma kapasitelerinin farklı olması dışında, ikinci devrede sınır kontakların olmaması ve iki ayrı anahtar yerine çift yönlü bir anahtar kullanılmasıdır (Şekil 8).



Şekil 8: Küre motoru besleme devresi

Şekil 9'da görülen panoda ölçüm için üç adet AA ve bir adet DA voltmetre bulunmaktadır. İlk AA voltmetre şebeke giriş gerilimini göstereceğinden ölçüm uçları, şebeke giriş kablusunun panoya girip sigortadan geçtikten sonra bağlandığı ana anahtara bağlanmıştır. İkinci AA voltmetre ise ototransformatör çıkış gerilimini göstereceğinden ototransformatörün çıkış uçlarına bağlanmıştır. Üçüncü AA voltmetre ise yüksek gerilim trafosunun çıkışını gerilim bölücü üzerinden göstereceğinden ölçüm uçları panonun arka kısmındaki BNC girişine bağlanmıştır. DC voltmetre, yüksek gerilim trafosunun sekonder geriliminin doğrultulmuş halini diğer gerilim bölücü üstünden gösterecektir. Bu yüzden bu voltmetrenin uçları da panonun arka kısmındaki BNC girişine bağlanmıştır.



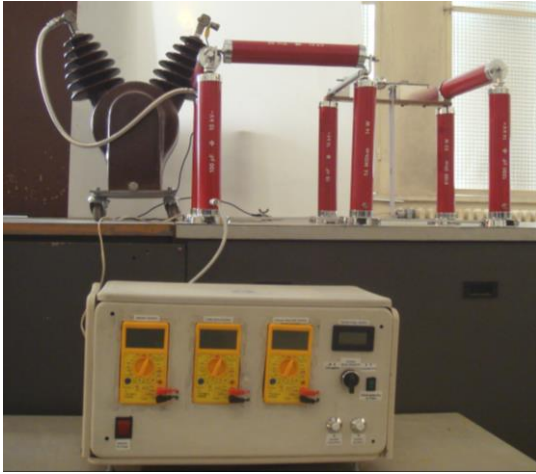
Şekil 9: Yapılan kontrol ve kumanda panosu.

Bütün voltmetrelerin beslemeleri küre motorunun beslemesini sağlayan trafodan sağlanmaktadır. 12 V çıkışlı bu motor, voltmetrelerin yanı sıra yan kapaktaki fanı da beslemektedir. Panonun diğer yan kapağına da hava dolaşımının sağlıklı olarak yapılıp, pano içindeki elemanlarının soğutmasının düzgün olarak yapılabilmesi için pencere yapılmıştır.

Devre elemanlarının, yüksek gerilim trafosunun, küre düzeneğinin, devre elemanlarının oturacağı düzlemin ve panonun tamamlanması ile birlikte darbe üretici çalışmaya ve deneylere hazır duruma gelmiştir.

### 3. Sonuçlar

Yapılan bu çalışma ile 1,2 / 50  $\mu$ s cephe ve sırt yarı değer sürelerine ve 0,98 J enerjiye sahip 14 kV'a kadar yıldırım darbe gerilimleri üretebilir, laboratuvar deneyleri için kullanıma uygun bir darbe gerilimi üretici tasarlanmış ve yapılmıştır (Şekil 10). Yapısının piyasadaki bulunabilir malzemelerden yapılmış olması, elemanlarının kolay sökülür-takılır olması, boyutlarının küçük, ağırlığının az olması ve taşınabilir olması üreticinin olumlu özelliklerindendir. Ayrıca, motor kontrollü giriş gerilimi ve küre açıklığı ayarlama ve yüksek alternatif ve yüksek doğru gerilim ölçme olanaklı bir kontrol ve kumanda panosu üreticinin kullanım kolaylığını arttırmıştır. Üreteçle, temiz, kararlı ve her iki kutupta (pozitif ve negatif) darbe gerilimleri üretilmektedir. Yapılan bu üreteçle yüksek gerilim ara bağlantı elemanlarının, kabloların, trafoların deneyleri başarıyla yapılabilir.



Şekil 10: Yapımı ve montajı tamamlanan darbe üretici

### 4. Kaynakça

- [1] M. Özkaya, *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt II, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [2] M. Özkaya, *Yüksek Gerilim Tekniğinde Ölçme*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1966.
- [3] Ö. Kalenderli, A. Özdemir, *Yüksek Gerilim Laboratuvarı Deneyleri*, İTÜ EEF Ofset Matbaası, İstanbul, 1990.
- [4] D. Kind, (Çeviren: A. Rumeli), *Yüksek Gerilim Deney Tekniğine Giriş*, Vieweg-ODTÜ, Ankara, 1992.
- [5] D. Kind, K. Feser, *High-Voltage Test Techniques*, SBA Publ./Vieweg, 1999.
- [6] M. S. Naidu, V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2004.
- [7] C. L. Wadhwa, *High Voltage Engineering*, New Age International Ltd, New Delhi, 1994.
- [8] E. Kuffel, W. S. Zaengle, J. Kuffel, *High Voltage Engineering, Fundamentals*, Pergamon Press, Oxford, 2000.
- [9] IEC Publication 60-1, High-Voltage Test Techniques, Part 1: General definitions and test requirements, 1989.
- [10] IEC Publication 60-2, High voltage testing techniques, Part 2: Measuring systems, 1994.
- [11] IEC Publication 60-3, High voltage testing techniques, Part 3: Measuring Devices, 1976
- [12] TS 350, Darbe Gerilimi, 1966.
- [13] Zhou, J. Y., Boggs, S. A., "Low energy single stage high voltage impulse generator", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 4, Aug. 2004, pp. 597 - 603.
- [14] Changjiang Wang, Zhang, Q. H., Streaker, C., "A 12 kV solid state high voltage pulse generator for a bench top PEF machine", The Third International Power Electronics and Motion Control Conference, IPERC 2000, Vol. 3, 15-18 Aug. 2000, pp. 1347 – 1352.
- [15] Dymoke-Bradshaw, A. K. L., Hares, J. D., Kellett, P. A., "The development of high repetition rate, fast, high voltage pulse generators", The IEE Pulsed Power symposium, 8 Sept. 2005, pp. 1/1 - 1/3.
- [16] Novac, B. M., Smith, I. R., Goh, S. E., "An economic compact high voltage pulse generator", IEE Symposium Pulsed Power 2000, 3-4 May 2000, pp. 6/1 - 6/3.