

DC Gerilim Yükseltici Devrelerin Karşılaştırmalı Analizi

A Comparative Analysis of DC Voltage Multiplier

Fatih SERTTAŞ¹, Fatih Onur HOCAOĞLU²

¹ Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü,
Afyon Kocatepe Üniversitesi
serttasf@gmail.com

² Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü,
Güneş ve Rüzgâr Enerjisi Uygulama ve Araştırma Merkezi,
Afyon Kocatepe Üniversitesi
fohocaoglu@gmail.com

Özet

Yüksek gerilim test laboratuvarlarında, nükleer fizik çalışmalarında ve bazı endüstriyel uygulamalarda kullanılan yüksek doğru gerilimler çeşitli yöntemlerle üretilmektedir. Genellikle yarım ve tam dalga doğrultucu devreler ile alternatif (AC) gerilim, doğru (DC) gerilime dönüştürülmektedir. Ardından üretilen DC gerilim yükseltilmektedir. Bu çalışmada, literatürde bulunan gerilim yükseltici-çoğullayıcı devreler incelenmiş, birbirine oranla avantaj ve dezavantajları belirlenmiş ve karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Abstract

DC High Voltage (HVDC) which is used in HV test laboratories, nuclear physics studies and some industrial applications, is able to be generated with several methods. Half-wave and full-wave rectifiers are usually utilized to convert the AC voltage to DC. In this study, voltage booster-multiplier circuits in the literature are investigated, advantages and disadvantages are determined and comparative analysis is realized.

1. Giriş

Yüksek gerilim teknolojisinde, doğru gerilimler temel olarak bilimsel araştırmalarda ve yüksek gerilim DC iletim hatlarında kullanılan ekipmanların testlerinde kullanılmaktadır. Büyük uzunluklarda yüksek gerilim AC güç kablolarının testinde AC gerilim kullanıldığında, kabloların büyük kapasitans değerleri, büyük akımlara yol açmaktadır. Bu tür AC kabloları uygulanan DC testlerin daha ekonomik ve uygun olmasına rağmen, düşük frekansta alternatif gerilimde çalışan AC iletim hattından tamamen farklı sonuçlar doğurabilmektedir. Polietilen yüksek gerilim kablolarının testinde, DC testler kullanılmamaya başlanmıştır[1]. Yalıtımın kalitesini açık olarak göstermemektedir. Yüksek doğru gerilimler çoğunlukla uygulamalı fizik alanında (parçacık hızlandırıcılar[2], elektron

mikroskobu[3] vs.), elektromedikal cihazlarda (röntgen), endüstriyel uygulamalarda (elektrostatik boyama ve toz kaplama[4], termal güç istasyonlarında egzoz gazı filtreleme) ve iletişim elektroniklerinde (TV, yayın istasyonları) kullanılırlar. Bu nedenlerle, yüksek doğru gerilim üretim sisteminin gerilim şekli, seviyesi, akım değeri, kısa ve uzun vadede kararlılığı birbirinden oldukça büyük farklılıklar göstermektedir. Temel üretim prensiplerinin bilinmesiyle, özel uygulamalar için doğru devrelerin seçimini sağlamak mümkündür.

Uluslararası IEC 60060-1 veya IEEE Standart 4-1995'de doğru akım test geriliminin değeri aritmetik ortalama değere göre tanımlanmıştır[5]. Test objesine uygulanan test gerilimi ortalama değerden periyodik olarak sapmaktadır. Bu da bir gerilim dalgalanmasının olduğunu göstermektedir. Dalgalanmanın genliği, maksimum ve minimum değer farkının yarısına eşittir. Dalgalanma faktörü, dalgalanma genliğinin aritmetik ortalama değere oranıdır. Bu faktörün, test gerilimleri için %3'ü geçmemesi gereklidir.

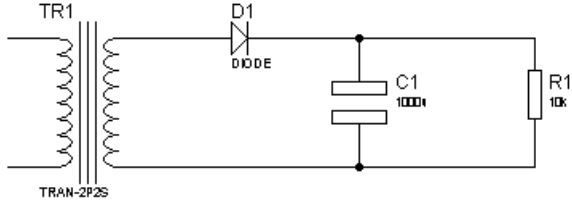
Doğru gerilimler genellikle alternatif gerilimlerin doğrultulmasıyla veya elektrostatik üretimle elde edilmektedir. Bu çalışmada, doğru gerilimleri yükselten-çoğullayan devreler incelenmiştir. Bu nedenle Bölüm 2'de AC-DC doğrultucu devreler, elektrostatik üreteçler ve düşük AC gerilimden yüksek DC gerilim elde etme yöntemleri incelenmiştir. Bölüm 3'de devrelerin avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır. Sonuç olarak DC gerilim çoğullayıcı devrelerden güncel çalışmalar üzerinde karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir.

2. Yüksek Doğru Gerilim Çoğullayıcı Devreler

Yüksek doğru gerilim elde etme yöntemlerinden en verimli kabul edilen alternatif gerilimlerin doğrultulması işlemidir. Kullanılan her devrenin uzun zamandır bilinmesine rağmen, devrelerin ekonomik üretimi oldukça büyük öneme sahiptir.

2.1. Doğrultma Devreleri

Gerilim düzenleyicili, tek faz yarım dalga doğrultucu devre temel devre tipidir. Bir adet gerilim kırıcı diyot ve gerilim düzenleyici kapasiteden oluşur. Şekil 1’de yarım dalga doğrultucu devrenin temel şeması görülmektedir.

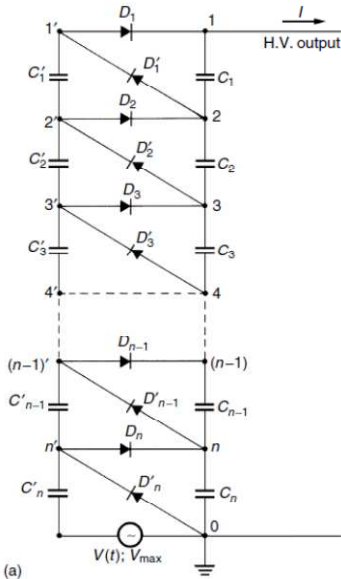


Şekil 1. Yarım Dalga Doğrultucu

Devredeki kapasitenin değerine bağlı olarak gerilimde dalgalanmalar meydana gelmektedir. Bu dalgalanmaları minimuma indirmek için optimum eleman değeri (akım-gerilim) seçimi gerçekleştirilmelidir.

2.2. Cockcroft-Walton Gerilim Çoğultayıcı

Çok yüksek DC gerilimlere fizikçilerin talebinin artmasıyla, doğrultma devrelerine geliştirmeler yapıldı. Günümüzde pek çok standart kaskat devreler AC-DC dönüşümde kullanılmaktadır. Bunlardan Cockcroft-Walton gerilim çoğultayıcı, kapasitörlerin yüklenmesi ve diyot sayesinde ters akımların engellenmesiyle gerilimi katlayarak yükseltmektedir. Literatürde Cockcroft-Walton çoğultayıcı devresiyle ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır[6]–[10]. Örnek bir Cockcroft - Walton kaskat gerilim çoğultayıcı devresi Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Cockcroft - Walton Gerilim Çoğultayıcı

2.3. Elektrostatik Üreteçler

Elektrostatik üreteçler, mekanik enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Elektromanyetik enerji dönüşümüne kıyasla, elektrik yükleri elektrik alanına karşı hareket eder, mekanik enerji harcanırken, yüksek elektrik potansiyel enerjisi kazanılır.

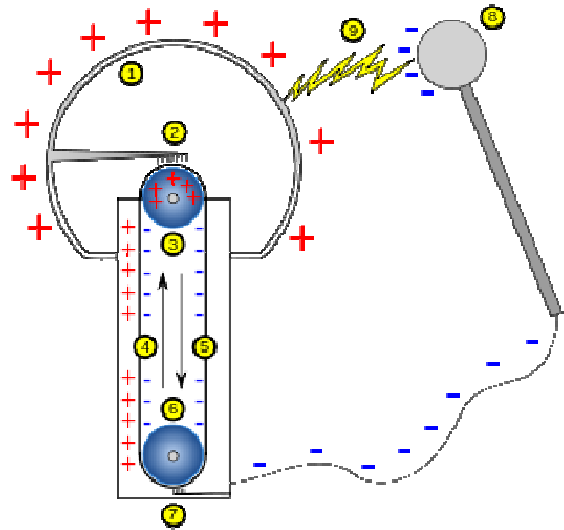
2.3.1. Van De Graaff Üreteci

1931 yılında Van de Graaff tarafından geliştirilen kayış-kasnak sistemli elektrostatik üreteç, halen nükleer fizik araştırma laboratuvarlarında kullanılmaktadır.

Kayış, ortalama 15-30 m/s hızla, bir motor tarafından hareket ettirilmelidir. Yük, yalıtılmış hareketli kayış üzerine korona deşarj noktaları (doğrudan kontak) vasıtasıyla püskürtülür. Toprak potansiyeline göre 10 kV’ a kadar gerilim çıkar.

Şekil 3’de örnek bir Van De Graaff üreteci görülmektedir. Sırasıyla numaralandırılmış kısımların açıklamaları aşağıda listelenmiştir [11].

- 1) Metal, içi boş küre
- 2) Üst elektrot, kayışa çok küçük bir mesafede ama asla dokunmaz
- 3) Üst rulman, metal
- 4) Kayışın pozitif yüklü tarafı
- 5) Kayışın negatif yüklü tarafı
- 6) Alt rulman
- 7) Alt elektrot
- 8) Negatif yüklü küre
- 9) Potansiyel farkından dolayı oluşan kıvılcım.



Şekil 3. Van De Graaff Üreteci

Üretecin yüksek gerilim terminalindeki akım Denklem 1 ile belirtilmiştir.

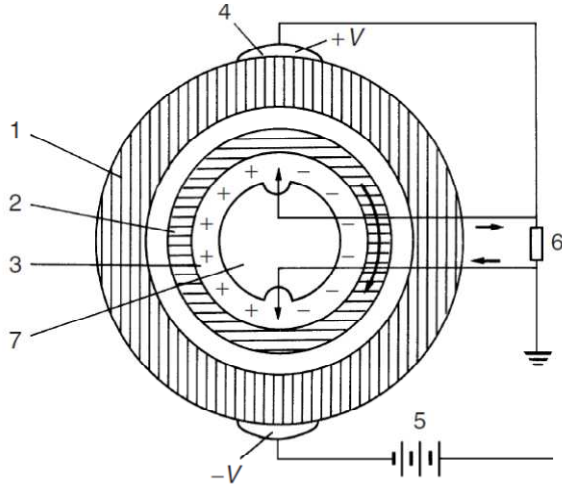
$$I = S'bv \quad (1)$$

Burada S' yük yoğunluğu (Coulombs/m²), b metre cinsinden genişlik ve v m/sn cinsinden kayış hızıdır [1].

Van De Graaff üretecinin, yük yoğunluğu kapasitesi ve kayış hızları sınırlı olduğundan, akım taşıma kapasitesi oldukça düşüktür. Çok yüksek gerilimlerde dahi çok düşük akımlar üretmektedir.

2.3.2. Felici Üreteci

Van De Graaff üretecinin kısıtları nedeniyle geliştirilmiştir. İçerisinde yalıtılmış silindirik rotor bulunan ve yüksek hızlarda dahi iyi bir kararlılıkla hareket eden Felici üreteci Şekil 4'de temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. Felici üretecinin şematik gösterimi

Şekil 4'de 1 numara ile gösterilen kısım silindirik stator kısmıdır. Makinenin hareketsiz parçası olan statorun içinde hava boşluğunun ardından 2 numara ile gösterilen yalıtılmış rotor bulunmaktadır. İyonlaştırıcı kısım 3, metalik kontak segmanları 4, yardımcı üreteç 5, yük 6 ve sabit yalıtımlı çekirdek ise 7 ile gösterilmiştir.

2.3.3. Sames Üreteci

Fransız Sames, 2 kutuplu Felici üretecini geliştirmiştir. Üreteç, 600 kV çıkış gerilimi ve 4 mA çıkış akımına sahiptir. Parçacık hızlandırma, röntgen, elektrostatik sprey boya ekipmanları için uygun bir üreteçtir.

3. Karşılaştırmalı Güncel Çalışmalar

Axelrod ve Berkovich (2016), çok yüksek gerilim kazancına sahip yükseltici tip dönüştürücüyü analiz

etmişlerdir [12]. Şema, anahtarlama kuplajlı endükte yükseltici DC dönüştürücü ve diyot-kapasitör Cockcroft- Walton çoğullayıcıya sahiptir. Anahtarların ve diyotların haberleşmesi gerçekleştirilmiştir. Yine bir diğer çalışmalarında (2015), yükseltici tip DC dönüştürücünün Cockcroft-Walton gerilim çoğullayıcısıyla harici karakteristiğini belirlemişlerdir [13]. Geliştirdikleri yöntem ile Cockcroft-Walton gerilim çoğullayıcısına sahip yükseltici tip DC dönüştürücünün çıkış gerilimini, devrede bulunan kapasitör ve yüklerin değerlerine göre hesaplayabilmişlerdir. Su ve arkadaşları (2006), yüksek kararlılıkta, düşük gerilim dalgalanmasına sahip bir yüksek gerilim Cockcroft - Walton yüksek gerilim güç beslemesi geliştirmişlerdir. Bu üreteç, nötron jeneratöründe kullanılmıştır. 600 kV yüksüz durumda gerilime ve 15 mA akım, 550 kV gerilime yüklü durumda erişebilmektedir.

Inokuchi ve arkadaşları (2009), küçük boyutta, endüstriyel uygulamalarda kullanılmak için güç üreteci geliştirdiler[14]. Yüksek gerilim ve düşük güç üretmek için tasarlanan, nanosaniyeler mertebesinde yükselme zamanına sahip, BJT transistörler kullananminyatür Marx üreteci 19 katmana sahiptir.

Rentzsch ve arkadaşları (2008), seri-paralel rezonans tanka sahip, 3 kademeli Cockcroft Walton çoğullayıcı, asimetrik anahtarlama D tipi dönüştürücünün analitik modelini geliştirmişlerdir [10]. MATLAB kullanarak benzetimi gerçekleştirilen ve SIMPLORER ile sonuçları karşılaştırılan DC dönüştürücünün kontrolü FPGA (Field Programmable Gate Array- Alan Programlamalı Kapı Dizisi) modülü olan Xilinx Spartan-3E ile gerçekleştirilmiş ve kararlılık seviyesi yüksek sonuçlar alınmıştır.

Yarım dalga Cockcroft-Walton gerilim çoğullayıcı en yaygın kullanılan AC-DC adım yükseltici topolojisidir. Çok yüksek gerilim kazancı ve yüksek verimliliğe sahiptir. Kobougias ve Tatakis (2008) geliştirdikleri özgün tasarım ile çıkışta meydana gelen gerilim dalgalanmalarını minimuma indirmek için devreye aynı değerde kapasitörler yerine farklı değerlerde kapasitörler eklemişlerdir. Teorik analizleri PSPICE ile ve deneysel çalışmaları laboratuvarında gerçekleştirerek başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

4. Sonuçlar

Doğru akım yüksek gerilimler, fizik ve mühendislik uygulamalarında, test laboratuvarlarında kullanılmaktadır. Pek çok üretim yöntemi bulunmasına karşın, her bir üretim yönteminin farklı dezavantajları ve farklı uygulama yöntemleri mevcuttur. Elektrostatik üreteçler ile, çok yüksek gerilimler elde edilebilmesine karşın, dielektrik kapasitelerden ve mekanik sınırlamalardan dolayı çok düşük akım değerlerine

ulaşılabilmektedir. Kaskat bağlı devreler ile yüksek doğru gerilim eldesinde, katmanlar artırıldıkça gerilim dalgalanmaları artmakta ve pratikte üretilen gerilimin değeri de gitgide düşmektedir. Tam dalga doğrultucu devrelerde fazla devre elemanı olmasına karşın üretilen DC gerilim daha kararlı durumda olmaktadır. Kaskat trafolarla ise, trafo kayıpları üretimi etkilemekte ve katmanlar artırıldıkça bu kayıp değerleri artmaktadır. Sonuç olarak uygulamaya ve ihtiyaca göre yüksek doğru gerilim seçilmesi gereklidir.

Fizikte, parçacık hızlandırma deneylerinde, literatürde de görüldüğü üzere genellikle elektrostatik üreteçler kullanılmaktadır. Aynı şekilde boyama endüstrisinde elektrostatik üreteçler tercih edilmektedir. Bununla birlikte yüksek gerilim test laboratuvarlarında, akım ihtiyaçlarından dolayı kaskat devreler ve trafolar tercih edilmektedir.

Yüksek gerilim üretim devreleriyle ilgili çalışmalar incelendiğinde, bu tür devrelerin uzun zaman önce geliştirildiği, güncel çalışmaların ise sayı olarak beklenen değerden yetersizliği görülmektedir. Bu da çalışma konularının artırılması gerekliliğini doğurmaktadır. Kaskat bağlı sistemlerde diyot-kapasitör değerleri ve sayıları değiştirilerek, bu tür devrelere farklı kontrol mekanizmaları eklenerek, üretim kararlılığı artırılmalı ve akım değerleri ayarlanabilmelidir. Yüksek gerilimde Ar-Ge maliyetinin yüksek olması gibi bir dezavantaj olmasına karşın uygulamaların kalitesini artıracak çalışmalara gidilmelidir. Güncel bazı çalışmalar göstermektedir ki gerilim çoğullayıcı devreler bazı dönüştürücü devrelerle hibrit kullanılarak daha verimli yükseltme ve dönüştürme oranları elde edilebilmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High voltage engineering : fundamentals*. Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000.
- [2] T. K. Chan, J. Song, T. F. Choo, and M. B. H. Breese, "Sub-100keV ion beam generation with a Van De Graaff accelerator using an external DC voltage supply," 2011.
- [3] T. Tanigaki, T. Akashi, Y. Takahashi, T. Kawasaki, and H. Shinada, "Quest for Ultimate Resolution Using Coherent Electron Waves: An Aberration-Corrected High-Voltage Electron Microscope," in *Advances in Imaging and Electron Physics*, 2016.
- [4] J.-H. Choi, B. J. Hyon, J.-H. Kim, and J. S. Park, "Development of single phase PFC module for electrostatic coating machine applications," in *2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2015, pp. 1751–1754.
- [5] IEC, "60060-1:2010," 2010.
- [6] R. Kato and T. Kōno, "A 200-kV Cockcroft-Walton type accelerator using selenium rectifiers," *Nucl. Instruments Methods*, vol. 15, no. 2, pp. 197–199, 1962.
- [7] B. Mitra, H. N. Raha, and B. Ghose, "A 250 kV Cockcroft-Walton voltage multiplier employing small selenium rectifiers and high frequency power-input," *Nucl. Instruments Methods*, vol. 32, no. 2, pp. 242–244, 1965.
- [8] E. Hara, "A high power symmetrical cockcroft-Walton type voltage multiplier circuit using silicon diodes," *Nucl. Instruments Methods*, vol. 54, no. 1, pp. 91–97, 1967.
- [9] I. C. Kobougias and E. C. Tatakis, "Optimal design of a Half-Wave Cockcroft-Walton Voltage Multiplier with minimum total capacitance," in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1104–1109.
- [10] M. Rentzsch, F. Gleisberg, H. Guldner, F. Benecke, and C. Ditmanson, "Closed analytical model of a 20 kV output voltage, 800 W output power series-parallel-resonant converter with Walton Cockcroft multiplier," in *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2008, pp. 1923–1929.
- [11] "Van de Graaff jeneratörü - Vikipedi." [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff_jenerat%C3%B6r%C3%BC.
- [12] B. Axelrod and Y. Berkovich, "Cockcroft-Walton voltage multiplier combined with switched-coupled-inductor boost converter," in *2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 2016, pp. 1–5.
- [13] B. Axelrod and Y. Berkovich, "External characteristics of the boost-converter with Cockcroft-Walton voltage multiplier," in *2015 International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, 2015, pp. 48–53.
- [14] M. Inokuchi, M. Akiyama, T. Sakugawa, H. Akiyama, and T. Ueno, "Development of Miniature Marx Generator using BJT," in *2009 IEEE Pulsed Power Conference*, 2009, pp. 57–60.