

Karma Yüksek Gerilim Üretim Devrelerinin Tasarımı

Design of Composite High Voltage Generation Circuits

Özcan Kalenderli, Emel Önal

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
kalenderli@itu.edu.tr, eonal@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, İTÜ Maslak Yerleşkesi'ndeki Yüksek Gerilim Laboratuvarı olanaklarını yüksek karma gerilimlerin üretilmesi amacıyla kullanmak için, kurulabilecek karma gerilim üretim devreleri, bilgisayar ortamında benzetimleri yapılarak incelenmiştir. Benzetimlerde, alternatif, doğru ve darbe gerilimi kaynaklarının ikili kullanımları göz önüne alınmıştır. Gerilimin genlik ve zaman parametrelerinin ayarı ve üretimde kullanılan üreteçlerin elektriksel güvenliğinin sağlanması için alınabilecek önlemler araştırılmıştır. Sonuçta deney ve araştırma amaçlı, çeşitli karma yüksek gerilim üretebilecek devreler tasarlanmıştır.

Abstract

In this study, to generate composite high voltages within the facilities of the High Voltage Laboratory at ITU Maslak Campus, the composite voltage generation circuits are examined by using a simulation program on computer. All simulations are based on using a pair of AC, DC and impulse voltage sources. Setting of amplitude and time parameters of the composite voltage and measures can be taken to ensure the electrical safety of the generators used in voltage generation are investigated. As a result, for test and research purposes, various composite HV generator circuits are designed.

1. Giriş

Yüksek gerilim araçları işletme koşullarında çeşitli gerilimlerle zorlanır. Bu yüzden, bu araçlar güç sistemlerinde kullanılmadan önce çeşitli gerilimlere dayanımları denenir, davranışları incelenir [1-3]. Laboratuvar koşullarında tek tip (alternatif, doğru veya darbe) gerilimlerle denenir araçlar gerçek işletmede aynı anda birden fazla gerilime maruz kalabilmektedir. Özellikle doğa olayları sonucunda (hatlara veya trafo merkezlerine yıldırım düşmesi durumları) veya sistemdeki anahtarlama olayları sırasında, araçlar çalıştıkları gerilimler dışında, bu istenmeyen olaylar tarafından meydana gelen gerilimlerle de zorlanırlar [4-6]. Örneğin, AA iletim hatlarına yıldırım düşmesi veya kesicinin açma kapaması sırasında oluşan gerilim darbeleri ve yürüyen dalgalar, yüksek gerilim hatlarında alternatif gerilim varken oluşur. Bu tür durumlarla karşılaşabilecek araçların performansını ve yalıtımındaki boşalma-delinme olaylarını inceleyebilmek için, laboratuvar ortamında farklı gerilimler bir araya getirilerek

uygulamadakine benzer karma gerilimler oluşturulur, araçlara bu gerilimler uygulanır ve kısmi boşalma, atlama ve delinme gibi boşalma olayları incelenir [7-18].

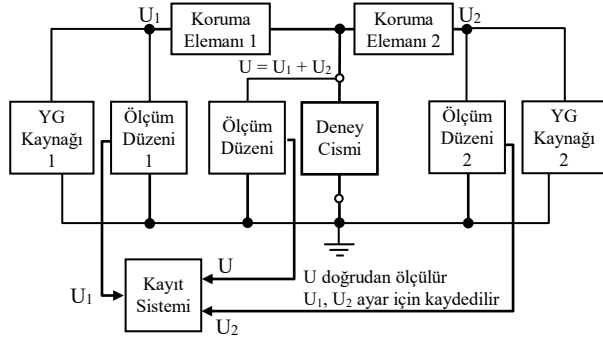
Literatürde karma gerilimler ile ilgili çalışmaların diğer yüksek gerilim konularına göre daha az yer aldığı görülmektedir. Bu durumun nedeni, gerek laboratuvar olanaklarının yetersizliği, gerekse farklı yüksek gerilimlerin aynı anda uygulanmasının ve ölçülmesinin zorluklarıdır. Bu nedenle literatürde bu konudaki boşluk devam etmekte ve çalışmak için motivasyon sağlamaktadır. Bu motivasyonla bu çalışmada, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Maslak Yerleşkesi'ndeki Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nın olanakları ile yüksek karma gerilimlerin üretilmesi amacıyla karma yüksek gerilim üretim devreleri, bilgisayar ortamında benzetimleri yapılarak incelenmiştir. Bu şekilde yüksek gerilimde sadece tek türden gerilimlerle değil, uygulamada olduğu gibi gerçeğe daha yakın koşullardaki gerilimlerle çalışma olanakları araştırılmıştır.

2. Karma Yüksek Gerilim Üretimi

Karma gerilimler, literatürde İngilizce olarak “superimposed voltages” veya “composite voltages” diye geçen, bir gerilimin üzerine, genliği, frekansı, zaman parametreleri, dalga şekli farklı başka bir tür gerilimin binmesi ile oluşan gerilim türleridir [19, 20]. Karma gerilimleri üretebilmek için farklı tür gerilim üreteçlerinin birbirine bağlanması veya deney cismine eş zamanlı olarak bu iki gerilim türünün uygulanması gerekmektedir. IEC 60060-1, karma gerilim tanımlarını ve Şekil 1'deki genel olarak karma gerilim üretici devresini vermektedir [19].

Şekil 1'deki ilke ile karma yüksek gerilimlerin üretilmesinde, iki farklı gerilim üretici aynı anda aynı yere (bir araca, yalıtıkana veya elektrot sistemine) uygulanacağı için, bu iki kaynağın birlikte bağlandığında birbirine olan etkilerinin ve istenen genlik ve zaman parametrelerine ve dalga şekline uygun gerilim üretilip üretilmediğinin bilinmesi gerekir. Bunun yanında, örneğin alternatif gerilim üzerine darbe gerilimi bindirme durumunda, darbenin alternatif gerilimin hangi anında oluştuğu (gerilimin tepesinde, gerilimin sıfır geçişinde veya bu ikisinin arasında olabilir) ve bindirme işleminin nasıl kontrol edileceği de önemlidir. Ayrıca, birleştirilen iki üreticinin birbirine aşırı gerilim veya aşırı akım etkilerinin önlenmesi için kullanılacak koruma elemanlarının veya devrelerinin (filtrelerinin) belirlenmesi için de devre benzetimi

yapılması gerekir. Bu yüzden, deneysel çalışmalara başlamadan önce; kurulacak devrelerin elemanları üzerine düşen gerilimlerin ve geçecek akımların belirlenmesi için devre analizleri yapılmalıdır. Bu çalışmada da bu amaçla bir devre analiz paket programında, kullanılabilecek gerilim üreteçleri ve elde edilebilecek dalga şekilleri incelenmiştir. Bunun için ücretsiz bir yazılım olan PSpice programının öğrenci sürümünden yararlanılmıştır.



Şekil 1: Bir karma gerilim üretici devresi [19].

3. Karma Yüksek Gerilim Üretim Devrelerinin Benzetimi

Bu bölümdeki devre benzetimlerinde, üç farklı (AA, DA ve darbe) gerilim üretici kullanılarak karma gerilimler üretileceği göz önüne alınmıştır. Bunlar;

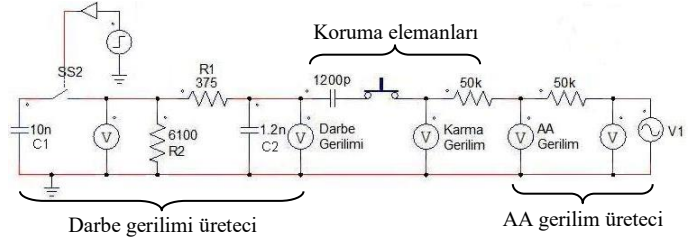
- Alternatif (AA) gerilime bindirilmiş darbe gerilimi üreten karma gerilim devresi,
- Doğru (DA) gerilime bindirilmiş darbe gerilimi üreten karma gerilim devresi,
- Doğru (DA) gerilime bindirilmiş alternatif (AA) gerilim üreten karma gerilim devresidir.

Bu devreler, temel olarak farklı gerilim üreten üreteçlerin aynı anda, aynı deney cismine bağlanmaları ile karma gerilim üreten devrelerdir. Bu şekilde bir düzenek kurulduğunda hem istenen dalga şeklini elde edebilmek için kuplaj elemanları hem de devrelerin birbirlerini etkilememelerini –birbirleri üzerinde istenmeyen gerilimler oluşturmamaları- için koruma elemanları ile birbirlerine bağlanmaları gerekmektedir. Bu elemanları boyutlandırabilmek için her bir deney devresi bilgisayarda Pspice devre analiz programı kullanılarak farklı gerilimler için analiz edilmiş ve bunun sonucunda elde edilmek istenen gerilim seviyelerinde kullanılmak üzere kuplaj ve koruma elemanları belirlenmiştir.

Karma gerilim üretmek için kurulacak benzetim devrelerinde, İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Yerleşkesi'ndeki Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bulunan, alternatif gerilim devresi için 100 kV, 5 kVA'lık deney transformatörü ve 50 kΩ'luk öndirenç; doğru gerilim devresi için 50 kV, 10 kVA'lık deney transformatörü ve 500 kΩ iç dirence sahip diyotlar ve darbe gerilimi devresi için C₁ = 10 nF, R₁ = 375 Ω, R₂ = 6100 Ω, C₂ = 1,2 nF elemanlarından oluşan, 140 kV, 90 J'lık tek katlı darbe gerilim üretici göz önüne alınacaktır.

3.1. AA-Darbe Karma Gerilim Üretici Benzetimi

Şekil 2'de alternatif (AA) gerilim üzerine bindirilmiş darbe gerilimi üretmek için kullanılabilecek bir karma gerilim üreticinin, benzetimde kullanılan devresi görülmektedir.



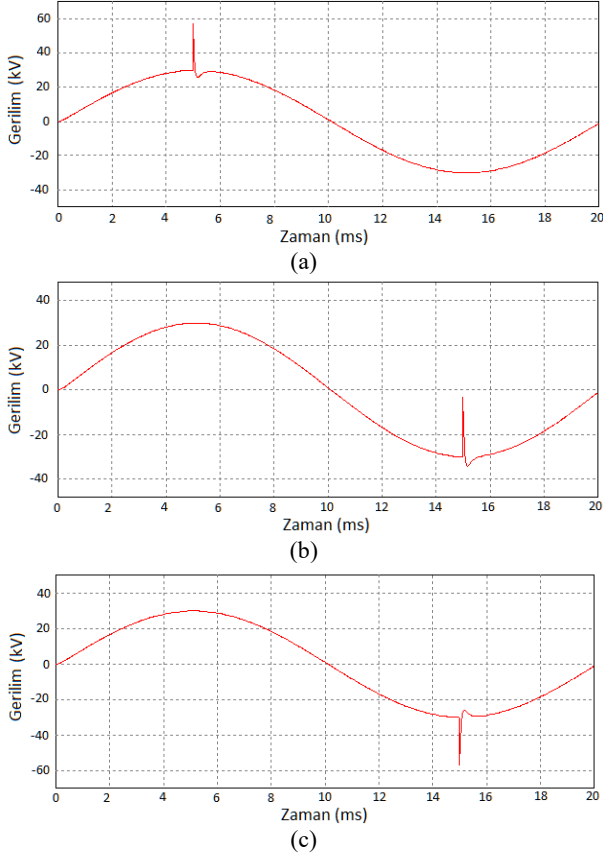
Şekil 2: AA-darbe karma gerilim üretici.

Devrenin alternatif gerilim tarafı, bir ön direnç ile devreye bağlanmış alternatif gerilim kaynağından oluşmaktadır. Darbe üretici kısmı ise darbe gerilimi üretmede kullanılan devrelerden biri olan Marx türü devrenin b bağlantısıdır. Darbe gerilim üreticinin kaynak kısmı dolu bir kondansatör (darbe kondansatörü) ile modellenmiştir. Darbe üreticinin atlama aralığı için gerilim kontrollü bir anahtar kullanılmıştır. Devredeki R₁ ve R₂ dirençleri darbenin cephe ve sırt yarı değer sürelerini belirleyen elemanlardır. 10 nF'lık darbe kondansatörü küreler arasında atlama olacak kadar dolduğunda kürelerde atlama meydana gelir ve darbe kondansatörünün gerilimi ile 1,2 nF'lık çıkış kondansatörü R₁ direnci üzerinden dolar. Küreler arasında atlama bittiğinde ise dolu olan çıkış kondansatörü R₁ ve R₂ üzerinden boşalarak devrenin çıkışında darbe gerilimini oluşturur. Bu iki devrenin birleşimi alternatif gerilim ve darbe geriliminden oluşan karma gerilim üreticini oluşturur.

Burada önemli olan iki devrenin birbirine bağlandığında birbirlerini etkilememeleridir. Bunun için devreler birbirlerine koruma elemanları üzerinden bağlanırlar. Bu elemanlar devre benzetimleri yapılarak belirlenmiştir. AA-darbe karma gerilim üreticinde; darbe üreticinin alternatif gerilim tarafını etkilememesi için, alternatif gerilim tarafında koruma elemanı olarak büyük değerli (50 kΩ) bir direnç kullanılmıştır. Bu şekilde, oluşan darbe geriliminin bu direnç üzerinde sönümlendirilerek, alternatif gerilim tarafındaki transformatör üzerinde gerilim darbesi yaratmasının önüne geçilmiştir. Benzer şekilde alternatif gerilimin darbe üretici devresinde görülmemesi için alçak frekanslarda yüksek empedans gösteren bir kapasite elemanı kullanılmıştır. Bu şekilde darbe üretici tarafında istenmeyen gerilimlerin oluşmasının önüne geçilmiştir.

Şekil 3'de alternatif ve darbe gerilim devrelerinin bağlanması ile elde edilen karma gerilim üreticinin birkaç örnek gerilim dalga şekli görülmektedir. Örneğin Şekil 3a'da 30 kV tepe değerli alternatif gerilimin tepesine 30 kV tepe değerli darbe gerilimi süperpoze edilerek elde edilen, 60 kV tepe değerine sahip olan bir karma gerilim gösterilmiştir.

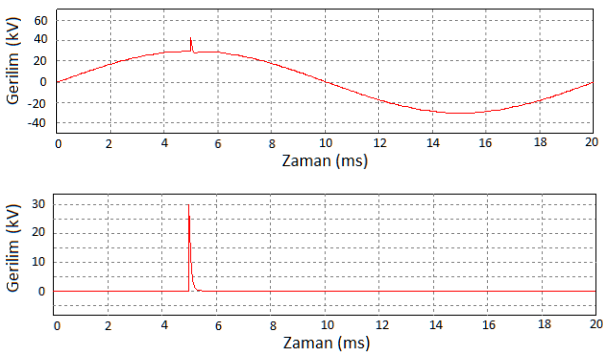
Devre benzetimlerinde koruma elemanları boyutlandırılırken en kötü senaryo olan darbe geriliminin alternatif gerilimin tepe değerinde olduğu durum göz önüne alınmıştır. Devreler en fazla bu durumda zorlanacağı için koruma elemanlarının değerleri belirlenirken bu senaryo kullanılmıştır. Ayrıca



Şekil 3: AA-darbe karma gerilim dalga şekilleri:

- a) AA üzerine pozitif yarıdalga pozitif darbe,
- b) AA üzerine negatif yarıdalga pozitif darbe,
- c) AA üzerine negatif yarıdalga negatif darbe.

gerilim değeri olarak 60 kV tepe değeri sınır değeri olarak kullanılmıştır. AA-darbe karma gerilim üretici için koruma elemanlarının değerleri darbe gerilimi tarafı için 1200 pF ve alternatif gerilim tarafı için 50 k Ω olarak seçilmiştir. Bu elemanlar kullanılarak oluşturulan devrede, gerilim üreticileri taraflarında oluşan gerilimler Şekil 4'te görülmektedir.



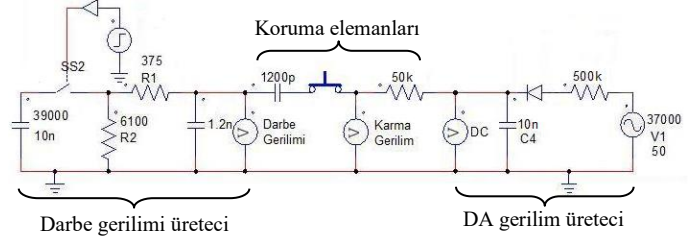
Şekil 4: Karma gerilim durumunda AA (üstte) ve darbe (altta) taraflarındaki gerilimler.

Şekil 4'ten de anlaşılacağı gibi, alternatif gerilim tarafında gerilim kaynağını zorlamayacak kadar küçük bir darbe gerilimi oluşmaktadır. Benzer şekilde darbe gerilimi tarafında alternatif gerilimin herhangi bir etkisi görülmektedir. Buradan

koruma elemanlarının uygun seçildiği görülmektedir. Bu yapılanlar, gerilimlerin farklı kombinasyonları için tekrarlanmış ve devreler üzerinde aşırı gerilim gözlenmemiştir.

3.2. DA-Darbe Karma Gerilim Üretici Benzetimi

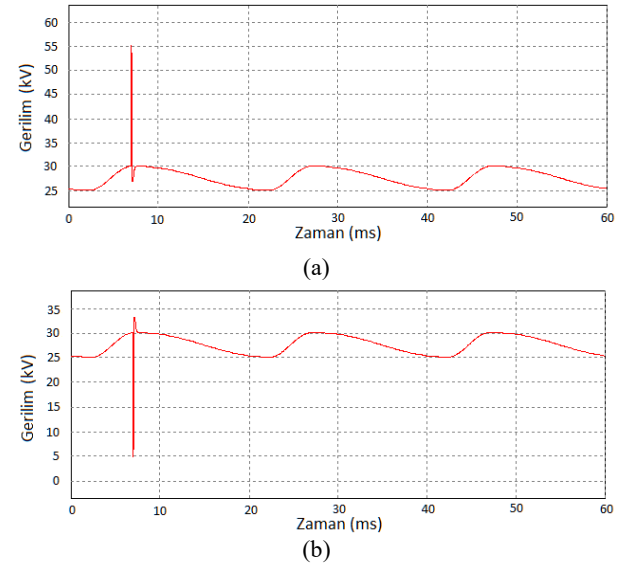
Şekil 5'te doğru (DA) gerilim üzerine bindirilmiş darbe gerilimi üretmek için kullanılabilecek bir karma gerilim üreticinin benzetimde kullanılan devresi görülmektedir.

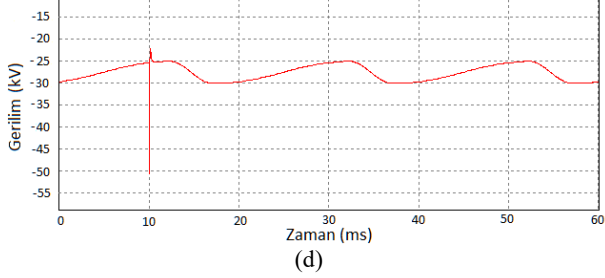
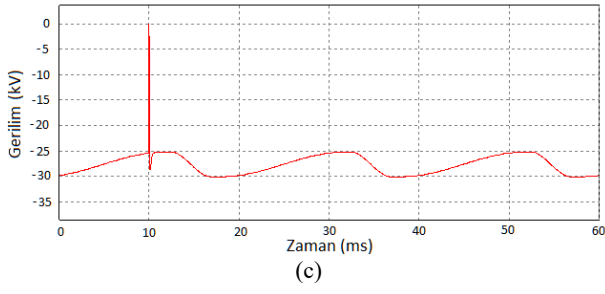


Şekil 5: DA-darbe karma gerilim üretici.

Üreticinin doğru gerilim kısmı 50 kV'luk yüksek gerilim deney transformatörüne bağlı yarım dalga doğrultucudur. Bu doğrultucu 50 k Ω 'luk bir öndirence, 140 kV'luk diyot elemanına ve 10 nF'lık bir düzeltme kondansatörüne sahiptir. Sistemin darbe gerilim kısmı ise AA-darbe karma gerilim üreticinde de kullanılan darbe gerilimi üretici devresinin aynısıdır.

DA-darbe şeklinde oluşturulan yüksek karma gerilimin dalga şekilleri Şekil 6'da görülmektedir. Doğru gerilim yarım dalga şeklinde üretildiği için doğru gerilimin dalga şekli 25 kV ile 30 kV arasında değişen dalgalı biçimdedir. Üretilen doğru gerilimin tepe değeri 30 kV ve ortalama değeri ise 27,62 kV olacak şekilde giriş gerilimi ayarlanmıştır. Darbe gerilimi ise 30 kV tepe değeri verecek şekilde uygulanmıştır. Şekil 6'dan da görüleceği gibi benzetimler en kötü senaryo olan doğru gerilimin tepe değerinde darbe gerilimin uygulanması durumu için yapılmıştır. Yapılan benzetim sonucunda en yüksek değeri 55,3 kV olan bir karma gerilim üretilmiştir.

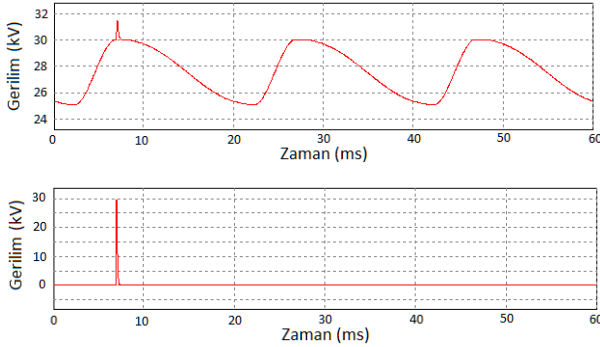




Şekil 6: DA-darbe karma gerilim dalga şekilleri:

- Pozitif DA üzerine pozitif darbe,
- Pozitif DA üzerine negatif darbe,
- Negatif DA üzerine pozitif darbe,
- Negatif DA üzerine negatif darbe.

Koruma elemanı olarak darbe gerilimi tarafına 1200 pF değerinde bir kondansatör konularak darbe tarafında gerilimin yükselmesi önlenmiştir. Benzer şekilde doğru gerilim tarafı ise darbe geriliminin etkilerini sönmündirebilmek için 50 k Ω 'luk bir direnç ile darbe gerilimi devresine bağlanmıştır. Koruma elemanlarının bulunduğu durumda iki devrede oluşan gerilim karakteristikleri Şekil 7'de görülmektedir.



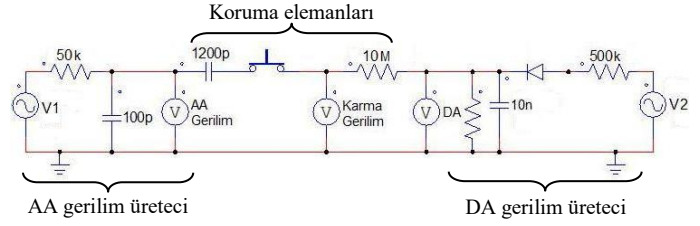
Şekil 7: DA-Darbe karma gerilim durumunda DA (üstte) ve darbe (altta) taraflarındaki gerilimler.

Darbe gerilimi üretici tarafının yapılan koruma yardımıyla doğru gerilim tarafından hiç etkilenmediği gözlemlenmiştir. Doğru gerilim tarafında ise darbe gerilimi büyük ölçüde sönmündirelmesine rağmen doğru gerilim üzerinde 1,5 kV'luk bir darbe oluşmaktadır. 50 kV'luk bir kaynak üzerinde oluşan bu gerilim devrenin çalışmasında bir sorun oluşturmayacağı için kabul edilebileceği söylenebilir.

3.3. DA-AA Karma Gerilim Üretici Benzetimi

Şekil 8'de doğru (DA) gerilim üzerine bindirilmiş alternatif (AA) gerilim üretmek için kullanılabilecek bir karma gerilim üreticinin benzetimde kullanılan devresi görülmektedir.

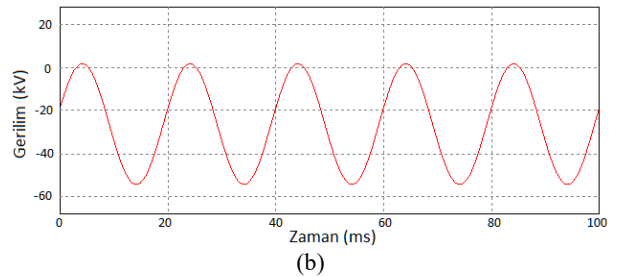
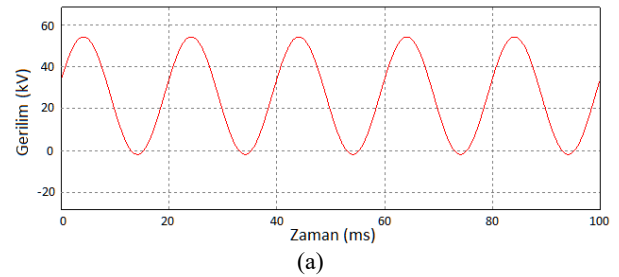
DA-AA karma gerilim üretici, alternatif ve doğru gerilim üreticilerinin birbirlerine bağlanması ile oluşturulmuştur.



Şekil 8: DA-AA karma gerilim üretici.

Kullanılan devreler, AA-darbe ve DA-darbe üreticilerinde kullanılan alternatif ve doğru gerilim devreleridir. Şekil 8'de alternatif gerilim üretici 50 kV'luk deney transformatörü ile, doğru gerilim ise 100 kV'luk deney transformatöründen yarım dalga doğrultularak elde edilmiştir.

Benzetimlerden elde edilen DA-AA karma gerilim dalga şekilleri, Şekil 9'da görülmektedir. Örneğin Şekil 9a'da 30 kV tepe değerli alternatif ve doğru gerilimlerin süperpoze edilmesi ile etkin değeri 32,87 kV, tepe değeri 54,09 kV ve ortalama değeri 26,25 olan karma gerilim elde edilmiştir.



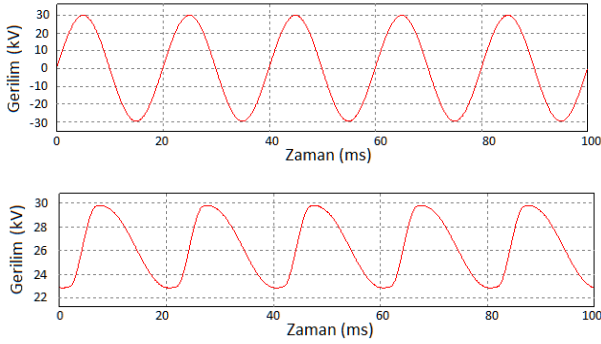
Şekil 9: DA-AA karma gerilim dalga şekilleri:

- Pozitif DA üzerine AA gerilim,
- Negatif DA üzerine AA gerilim.

DA-AA karma gerilim üreticinin doğru gerilim kısmını korumak için 10 M Ω 'luk bir direnç kullanılmıştır. Alternatif gerilim kısmında ise koruma amacı ile devreye 1200 pF değerinde bir kondansatör bağlanarak karma gerilim üretici oluşturulmuştur. Koruma elemanları devredeyken doğru ve alternatif gerilim kaynaklarında oluşan gerilimler Şekil 10'da görülmektedir. Eklenen bu koruma elemanları sayesinde alternatif ve doğru gerilim devreleri, birbirlerinden etkilenmemiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, çeşitli karma yüksek gerilimlerin üretimi için kullanılacak gerilim üreticilerinin, öncelikle kendi dalga



Şekil 10: AA-DA karma gerilim durumunda AA (üstte) ve DA (altta) taraflarındaki gerilimler.

şekillerini doğru ürettiği, devre benzetimleri ile doğrulanmıştır. Herbir üreteçten istenen dalga şekillerinin elde edildiği anlaşıldıktan sonra, bu üreteçler istenen karma gerilimi (AA-darbe, DA-darbe veya DA-AA) üretecek şekilde bağlanarak istenen çıkış gerilimi şeklini verip vermedikleri kontrol edilmiştir. Özellikle alternatif gerilim üzerine darbe gerilimi bindirme durumunda, darbe geriliminin alternatif gerilimine binme anının ve bindirme işleminin kontrolü önemlidir. Benzetim yardımıyla özellikle bu kontrol probleminin çözümleri aranmıştır. Bunlardan başka birleştirilen iki üreteçten birinin diğer üreteç üzerinde etkilerinin gözlemlenebilmesi için benzetimler yapılmış ve devrelere etkiyen gerilimler ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan bu benzetimler sonucunda her bir deney devresinde kullanılacak olan elemanlar değerleri ile belirlenmiş ve karma gerilim üretim deney setleri kurulabilir hale gelmiştir.

Bilgisayardaki devre analizlerinde üreteçlerden istenilen dalga şekillerinin elde edildiği anlaşıldıktan sonra bu üreteçler istenilen karma gerilimi (AA-darbe, DA-darbe veya DA-AA) üretecek şekilde programdaki bağlantıları yapılarak istenilen çıkış gerilim şeklini verip vermedikleri uygulamalı olarak kontrol edilmelidir.

Bu çalışmada da belirtildiği gibi, karma yüksek gerilimlerle yalıtım davranışlarını, boşalma olaylarını incelemek için geniş bir çalışma alanı bulunmaktadır. Bu çalışmaların ilk adımı karma gerilim üretimidir. Bu tür gerilimlerin ölçülmesi ve elektrik alan incelemeleri de yapılabilecek çalışmalardır.

5. Kaynaklar

- [1] Kuffel, E., Zaengl, W. S., and Kuffel, J., *High Voltage Engineering Fundamentals*, Butterworth-Heinemann, New York, 2000.
- [2] Naidu, M. S. and Kamaraju, V., *High Voltage Engineering*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2004.
- [3] Ryan, H. M., *High Voltage Engineering and Testing*, Peter Peregrinus Ltd., London, 2001.
- [4] Bayram, M., *Elektrik Tesislerinde Aşırı Gerilimler ve Bunlara Karşı Koruma*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1984.
- [5] Bewley, L. V., *Travelling Waves on Transmission Systems*, Dover Publ. Inc., New York, 1963.
- [6] Malik, N. H., Al-Arainy, A. A., and Qureshi, M. I., *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1998.
- [7] Mosinski, F., Wodzinski, J., "Electrical strength of paper-oil insulation subjected to composite voltages", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 4, pp. 615-623, 1994.
- [8] Raghuveer, M. R., Kolaczowski, Z., Weifang, J., Kuffel, E., "Surface electric strength of processed pressboard under composite AC and DC and conventional stresses", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No 2, pp. 341-350, 1990.
- [9] Sha, Y., Zhou, Y., Zhang, L., Huang, M., and Jin, F., "Measurement and simulation of partial discharge in oil-paper insulation under the combined AC-DC voltage", *J. Electrostatics*, Vol. 71, pp. 540-546, 2013.
- [10] Sarathi, R. and Koperudevi, G., "UHF technique for identification of partial discharge in a composite insulation under ac and dc voltages", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 6, pp. 1724-1730, 2008.
- [11] Cao, L., Zanwar, A., and Grzybowski, S., "Electrical aging phenomena of medium voltage EPR Cables energized by ac voltage with switching impulses superimposed", *IEEE Electric Ship Technologies Symp. (ESTS)*, Alexandria, Virginia, USA, April 2011.
- [12] Murata, Y., Katakai, S. and Kanaoka, M., "Impulse breakdown superposed on AC voltage in XLPE cable insulation", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 3, pp. 361-365, 1996.
- [13] Kamata, Y., Endoh, K., Furukawa, S., Endoh, F., Nonmmura, K., Iwata, Y., Horiuchi, S., and Takasu, N., "Dielectric strength of oil-immersed transformer insulation with superimposed AC and lightning impulse Voltage", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, pp. 683-687, 1990.
- [14] Sletbak, J., Rein, A., and Haraldsen, S., "Breakdown strength of transformer oil with impulse voltage superimposed AC voltage", *1st Int. Symp. High Voltage Eng. (ISH)*, Paper H-7, 1972.
- [15] Rajan, J. S., Dwarakanath, K. and Moorching, S. N., "Comparative evaluation of dielectric strength of paper-oil insulation under AC, DC, combined, composite AC/DC and impulse voltage", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, Atlanta, USA, pp. 236-239, 1998.
- [16] Grzybowski, S. and Kuffel, E., "Electrical breakdown strength of polypropylene film oil-immersed under combined AC-DC voltage", *IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 516-521, Oct. 1986.
- [17] Takahashi, E., Tsutsumi, Y., Okuyama, K., and Ogata, F., "Partial discharge characteristics of oil-immersed insulation systems under DC, combined AC-DC and DC reversed polarity voltage", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vol. 95, pp. 411-420, 1976.
- [18] Birle, M., Leu, C., "Breakdown of polymer dielectrics at high direct and alternating voltages superimposed by high frequency high voltages", *11th IEEE Conference on Solid Dielectrics*, July 2013.
- [19] IEC 60060-1: High-voltage test techniques, General definitions and test requirements, 2010.
- [20] IEEE Std 4: Standard Techniques for High Voltage Testing.