

BİR DİK CEPHELİ DARBE GERİLİMİ ÜRETECİ TASARIMI VE YAPIMI

Aysam AKSES¹ Özcan KALENDERLİ²

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
34469 Maslak, İstanbul

¹e-posta: aysama@yahoo.com ²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

ÖZET

Cephesi nanosaniyeler mertebesinde olan ve dik cepheli darbe veya elektromanyetik darbe olarak adlandırılan darbeler, çok yüksek frekanslı elektromanyetik alanlar yoluyla oluşabilir. Bu darbeler, doğal yolla meydana gelebileceği gibi yapay yolla da oluşturulabilir. Dik cepheli elektromanyetik darbelerin en önemli etkisi, elektronik sistemlerin ve cihazların iletkenlerine girişimde bulunarak bunların içine ulaşması ve sistem veya aygıtların bozulmasına ya da yanlış çalışmasına neden olmasıdır. Cihazların bu tür darbeler karşısındaki davranışlarını incelemek için yapay dik cepheli darbe üreteçleri kullanılır. Bu çalışma kapsamında da farklı dik cepheli darbe üretme şekilleri uygulamalı olarak denenmiştir. Denenen yöntemler içinde en uygunu olduğuna karar verilen tek katlı Marx devresi ilkesi ile çalışan bir darbe üreteci, tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen darbe üreteci ile yaklaşık 50 nanosaniyede tepe değerine ulaşan ve toplamda yaklaşık 1000 nanosaniye süren, 10 kV'a kadar tepe değerli darbe gerilimleri üretilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dik cepheli darbe, Elektromanyetik darbe (EMP), Darbe üreteci, EMP üreteci, Darbe gerilimi.

1. GİRİŞ

Uygulama alanı çeşitliliği, yüksek darbe gerilimi tekniğini, üzerinde en çok çalışılan konulardan biri haline getirmiştir [1]. Füzyon, yüksek güçlü parçacık demetleri ve lazerlerde darbe uygulamaları, gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Darbe gerilimi uygulamaları genelde askeri amaçlar içinde gelişme göstermiştir. Yakın geçmişte, özellikle sıcak savaş döneminin sona ermesinden sonra, bu teknoloji endüstriyel amaçlarla kullanılmış, enerji, uzay, çevre, elektronik ve malzeme bilimlerinde uygulama alanı bulmuştur [2].

Günümüz teknolojilerinde savaş sistemleri insandan çok insanlara kullanım kolaylığı sağlayan sistemleri hedef almaktadır. Yapay yollarla üretilen elektromanyetik darbeler (EMP), hedef aldığı elektronik sisteme zarar vererek haberleşme, enerji üretimi ve iletimi, ulaşım veya askeri silahları kullanılmaz duruma getirebilir. EMP, yıldırım sonucu doğal yolla da oluşabilir. Elektriksel ve elektronik sistemlerin yaygın kullanımı ve bu sistemlere olan yüksek bağlılık, olumsuz bir durumla karşılaşmamak için bu

sistemlerin korunmasını zorunlu kılmıştır. Bu nedenle sistemlerin, kullanıma sunulmadan önce, karşılaşılabilecekleri zamanla hızlı değişen, dik cepheli, geçici işaretler karşısındaki davranışları yapılan deneylerle değerlendirilir [1, 3]. Bu deneylerde, elektromanyetik alan yapay olarak oluşturulup denenecek sisteme uygulanabildiği gibi, oluşan alanın sistemde endükleyeceği akım ve gerilimler doğrudan sisteme uygulanabilir.

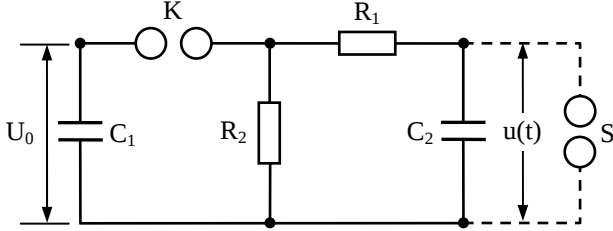
Darbe gerilimleri üzerine yapılan çalışmalar farklı yönlerde doğru hız kazanarak yayılmıştır. Literatürde, üretilen darbelerin cephe sürelerinin nanosaniye ve bazı uygulamalar için pikosaniye mertebelerine düştüğü görülmüştür [4, 5]. Bu derece hızlı darbeler özellikle optik uygulamalarda, uzay teknolojilerinde ve tıbbi amaçlar için üretilmektedir. Mikrodalga kullanımının artması, hızlı darbe gerilimleri üretme çalışmalarının bu amaca yönelmesini de sağlamıştır. İncelenen çalışmaların büyük bölümü lazer için gereken darbeleri üretmektedir. Bu amaçla nanosaniye ve pikosaniye süreli darbeler üretilmektedir. Optik uygulamalarında darbenin etki süresi kadar tekrarlanma frekansı da önemlidir. Güncel çalışmalarda [4, 6, 7], üretilen darbelerin tekrarlanma hızının artırılması amaçlanmaktadır. Hızlı anahtarlama ihtiyacı yarılarken anahtarların kullanımını arttırmıştır. İncelenen çalışmalarda görünen durum, MHz mertebelerinde tekrarlanabilen darbe üretimine ulaşıldığıdır.

Bu çalışmaya konu olan darbeler, elektromanyetik etkiyle oluşması beklenen dik cepheli darbelerdir. Yapay olarak EMP üreteçleri ile üretilen nanosaniye süreli dik cepheli darbeler, genel olarak anten kullanılarak elektrik alanı şekline dönüştürülerek kullanılmaktadır [8]. Dik cepheli darbe gerilimi üretiminde en yaygın kullanılan üreteçler, kablo üreteçleri, LC devreleri ve Marx üreteçleridir. Bazı uygulamalarda birden fazla yöntem bir arada kullanılabilir. Bu üreteçlerin bazıları, bu çalışmada yapımı gerçekleştirilerek denenmiş ve uygulama amacına en uygun olan üretece karar verilmiştir.

Üretilen darbe gerilimlerinin doğru ve duyarlı ölçülmesi başka bir önemli konudur. Teknolojik ilerleme, ölçü aletlerinin ölçme duyarlılığını oldukça geliştirmiştir. Bu çalışmada, elektronik sistemlerin karşılaşılabilecekleri dik cepheli darbe gerilimleri karşısında davranışları incelemek amacıyla gerçekleştirilecek deneylerde kullanılmak üzere bir darbe gerilimi üreteci tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

2. DİK CEPHELİ DARBE GERİLİMİ ÜRETİMİ

Dik cepheli darbe gerilimi üretimi için farklı üreteç türleri göz önüne alınmış ve uygulanabilirliği üzerinde denemeler yapılmıştır.

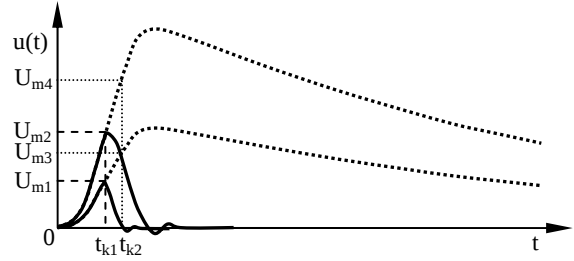


Şekil 1. Tek katlı bir darbe gerilimi üretici devresi

İlk deneme, standart yıldırım darbesi üreten Şekil 1'deki gibi bir üreteçte yapılacak değişikliklerle dik cepheli darbe üretebilmenin araştırılmasıdır. Bir standart yıldırım darbe üreticinin ürettiği darbenin cephe süresi 1,2 μ s, sırt yarı değer süresi 50 μ s'dir. Bu süreler, hedeflenen nanosaniyeler süreli dik cepheli darbeler için fazla uzundur. Bu yüzden eldeki yıldırım darbe üreticinin devre elemanlarının değerlerinde değişiklik yapılmıştır. Üreteç devresindeki kondansatörlerin değerlerini değiştirmeden yalnızca cephe ve sırt dirençlerinin değerlerini değiştirmenin, hedeflenen süreye düşmeye yetmediği ve elde edilen darbe şeklini bozduğu görülmüştür.

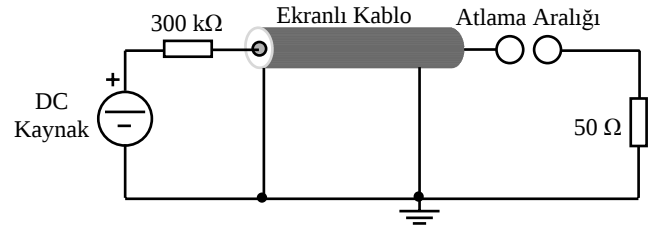
İkinci yöntem olarak eldeki darbe üreticinin ürettiği standart yıldırım darbesinin cephesinde istenen sürede (nanosaniyeler mertebesinde) darbenin kesilmesi denenmiştir. Bu amaçla bir tepe devresi kullanılmıştır. Tepe devresi, darbe üreticinin çıkışına paralel olarak bağlanmış bir atlama aralığıdır (Şekil 1'de S elektrotları). Tepe devresinde atlama aralığının açıklığı, normal koşullarda darbe üreticinin çıkışında var olan standart 1,2/50 μ s'lik darbenin, elde edilmesi istenen dik cepheli darbenin cephe süresine eşit sürede kesilmesini sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Bu durumda darbe üretici çıkışında elde edilecek 1,2/50 μ s'lik darbe, atlama aralığındaki atlama nedeniyle söz konusu anda kesilecektir. Bu şekilde dik cepheli darbenin cephe süresi ve tepe değeri, tepe devresinin küre aralığı değiştirilerek ayarlanır (Şekil 2).

Bu bilgilerle 12 kV'luk bir yıldırım darbe üreticinin çıkışına iki adet 25 mm çaplı küreden oluşan bir küresel elektrot sistemi bağlanmıştır. Açıklanan çalışmalar yapılmış, ancak tepe devresi çıkışında oldukça bozuk dalga şekilli darbeler elde edilmiştir. Tepe devresi ile cephe süresini kısaltma yönteminin başarısız olmasının bir nedeni, çalışmadaki amaçlı düşük gerilim düzeylerinde (6-8 kV), anahtarlama amaçlı kullanılan kürelerin oluşturduğu kararsızlıktır. Düşük gerilim değerlerinde, tepe devresinde kullanılan kürelerin aralığının istenen tepe değerinde atlama yapacak şekilde ayarlanması oldukça zordur ve duyarlı ölçme gerektirir [9, 10].



Şekil 2. Farklı tepe değerli darbelerin farklı sürelerde (t_{k1} , t_{k2}) kesilmesi ile dik cepheli darbe üretimi

Nanosaniye süreli darbe gerilimi elde etmek için başka bir yol olarak kabloların bir kondansatör gibi doldurulup boşaltılması denenmiştir. Kablodan kapasitesi ve yalıtımı ile doğal bir yüksek gerilim yükleme kondansatörü gibi yararlanılmıştır. Buna göre belirli bir gerilim düzeyine kadar yüklenen bir kablo, başka bir kabloya veya kondansatöre, dirençler üzerinden boşaltılmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Kablo kullanılan dik cepheli darbe üretici

Bu amaçla kurulan deneme devresinde bir N tipi kablo kullanılmıştır. İstenen kapasite değerine ulaşmak için doldurma kısmında kullanılan kablonun uzun olması devreyi kullanışsız hale getirir de sonuçta nanosaniye süreli darbe gerilimleri elde edilmiştir (Şekil 4). Ancak, 20 mm dış çapa



Şekil 4. Kablo üretici ile elde edilen bir darbe gerilimi

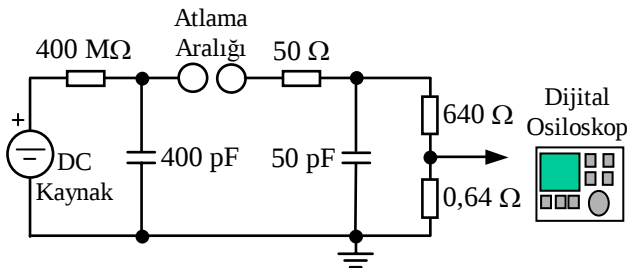
sahip bu kabloda iç iletken ile dış iletken (siper) arasında kullanılan yalıtkan malzemenin izin verilen en yüksek işletme gerilimi kablonun katalogunda 3,6 kV olarak verildiğinden, çalışma sırasında en fazla 4 kV'luk darbe elde

edilecek kadar gerilim yükseltilmiştir. Daha yüksek gerilim elde edebilmek için 36 kV'luk tek damarlı bir kablo ile devrenin gerçekleştirilmesi düşünülmüştür, ancak, söz konusu kablonun hacmi ve ağırlığı ile üreticinin kolay kurulabilir ve taşınabilir olmayacağı görülerek bu uygulamadan vazgeçilmiştir [11].

3. DARBE ÜRETECİNİN TASARIMI VE YAPIMI

Eldeki olanaklarla dik cepheli darbe gerilimi üretmek için en uygun yöntemin, endüktif özelliği mümkün mertebe düşük olan kapasite ve dirençlerle tek katlı Marx devresi kurmak olduğuna karar verilmiştir. İlk kurulan devrede kullanılan nanofarad mertebeli kondansatörün oluşturduğu olumsuzluklar göz önünde bulundurularak yapılan araştırmada darbe gerilimi üretmek için daha uygun, porselen yapıda kondansatörler bulunmuştur. Doldurma kondansatörü olarak kapasitesi 800 pF olan 7 kV'luk iki kondansatör seri bağlanmış ve 14 kV'luk 400 pF kapasiteli eleman elde edilmiştir. Yük kondansatörü olarak 10 kV gerilim değerine sahip 50 pF'luk kondansatör kullanılmıştır. Doldurma kondansatörünün pikofarad mertebesinde olması, dik cepheli darbe gerilimi üretiminde kolaylık sağlamıştır.

Elektrik devresi çözümlemeleri yapmaya uygun Pspice isimli bir bilgisayar programı ile kurulan Marx devresinde cephe süresini belirleyen direnç 50 Ω , sırt süresini belirleyen direnç ise 640 Ω olarak hesaplanmıştır. Devre girişine, devreden akan akımı sınırlamak ve ardışık darbeler arasında üretme ve ölçme için yeterli zaman aralığı elde edebilmek amacıyla herbiri 7,5 kV'luk 200 Mohm değere sahip seri bağlı iki adet öndirenç kullanılmıştır. Tasarlanıp gerçekleştirilen devrenin şeması Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Tasarlanan üreteç devresi

Devre, 0-25 kV arasında ayarlı olarak gerilim verebilen bir doğru gerilim kaynağından beslenmiştir (Şekil 6).

Üretilen dalgaının şeklini görmek ve darbe parametrelerini ölçmek için Agilent marka, Infinium modeli bir dijital osiloskop kullanılmıştır. 4 GSa/s örnekleme hızına sahip 1 GHz'lik bu osiloskop, hızlı değişen işaretleri yakalamak için oldukça duyarlı ve uygundur. Üretilen darbe gerilimini osiloskoba aktarmak için, önce 1000:1 çevirme oranına sahip HP marka bir yüksek gerilim probundan yararlanılmıştır.



Şekil 6. Darbe üretecinde kullanılan doğru gerilim kaynağı

Daha sonra ölçmeler, Marx üretici çıkışına bağlanan hem dirençsel, hem de kapasitif gerilim bölücüler ile tekrarlanmıştır. Dirençsel gerilim bölücü olarak 640 Ω 'luk bir dirençle seri bağlı 0,64 Ω 'luk bir direnç kullanılmıştır (Şekil 5). Kapasitif gerilim bölücü ise, 50 pF'luk yük kondansatörüne seri bağlanan 50 nF'luk kondansatör ile oluşturulmuştur.

Uygulamalı çalışmalardan edinilen deneyim doğrultusunda atlama aralığındaki bir boşalmanın yüksek elektromanyetik ışımaya sahip olduğu bilinmektedir. Oluşan elektromanyetik ışıma, yakın çevresindeki duyarlı aygıtları bir girişime neden olarak etkileyebilir. Bu nedenle gerçekleştirilen devrede anahtarlama elemanı olarak görev yapan küreler, ölçme sistemine etki etmelerine engel olmak amacıyla ekranlama özelliği yüksek sacdan yapılmış bir kutu içine alınmıştır. Ancak yüksek gerilim probu ile gerçekleştirilen ölçmeler sırasında, ölçme sistemine ulaşan işaretlerin tek kaynağının anahtarlama elemanı olmadığı görülmüştür. Devrenin kendi iletkenlerinin şekillenmiş işaretler yaydığı ve bu işaretlerin ölçme probundaki işaret üzerine giriştiği görülmüştür. Bu durum duyarlı ölçmelere engel olduğundan devrenin tamamının ekranlanması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla darbe üreteç devresinin tümü, 1 mm kalınlığında sacdan yapılmış, 20 cm x 20 cm x 20 cm boyutlarında bir metal kutu içine yerleştirilmiştir (Şekil 7).

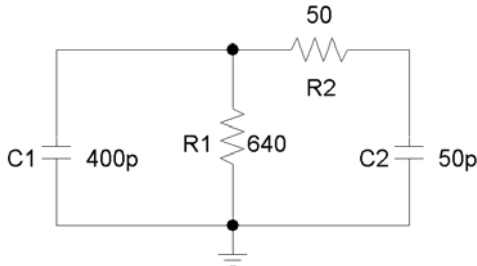


Şekil 7. Gerçeklenen darbe üreteci

Kutuya yüksek gerilim girişi, özel imal ettirilen geçiş bağlacı ile gerçekleştirilmiştir. Kutudan içinden osiloskoba ölçme çıkışı için Huber-Suhner firmasının koaksiyel N tipi şase bağlacı kullanılmıştır. Böylece giriş-çıkış bağlantılarında da, kutu ekranlamasının bozulmamasına dikkat edilmiştir. Kutu kapağının çevresi, kendinden yapışkanlı alüminyum folyo ile desteklenmiş, kutu-kapak birleşim noktalarında elektromanyetik alan kaçağına neden olacak olası aralıklar kapatılmıştır.

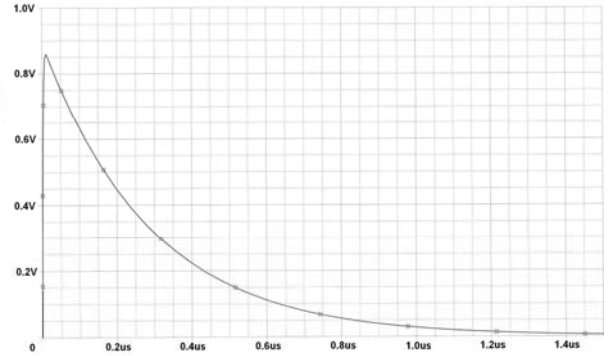
Devrenin kutu içindeki montajı sırasında en önemli konulardan biri elemanların birbiri ile bağlanması, diğeri ise topraklamadır. Elemanlar arasındaki bağlantılar, mümkün olduğunca bağlantı elemanı kullanmadan, uç uca birleştirilerek yapılmıştır. Kullanılan kondansatörlerin ve dirençlerin uçlarının vida-somun ile bağlantıya uygun olması bağlantıları kolaylaştırmıştır. Elemanların birbirlerine doğrudan bağlanamadığı durumlarda, 20 mm genişliğinde, 1 mm kalınlığında bakır şeritler kullanılmıştır. Bağlantılar mümkün mertebe kısa ve sıkı yapılmıştır. Bağlantılarda kablo kullanmak veya uzun bağlantı yapmak, devreye ek kaçak endüktans getirmektedir. Bağlantıların yeterince sıkı olmaması durumunda ise ek empedansın yanı sıra yüksek gerilim ile çalışıldığından uçlarda oluşan korona, küçük aralıklarda meydana gelen ark, çıkış dalga şeklini bozmaktadır. Devre elemanlarının toprağa bağlantıları, bağlantı elemanı kullanılmadan, doğrudan yapılmıştır. Bu amaçla kutu içinde, doğrudan bağlamaya olanak veren bağlama uçları bırakılmış, elemanlar bu uca vidalanarak sabitlenmiştir. Doğrudan bağlama, etkin topraklamayı sağladığı gibi devrenin kutu içinde sabitlenmesine de sağlamıştır. Devrenin eşpotansiyel toprak düzlemi, devreyi içine alan sac kutudur.

Şekil 8 (ölçülmüş endüktanslarını ve eleman değerlerini göz önüne almadan) ideal elemanlarla oluşturulan devreyi ve Şekil 9 bu devrenin Pspice analizi sonucunda çıkışında verdiği (C2'nin uçlarındaki) dalga şeklini göstermektedir.



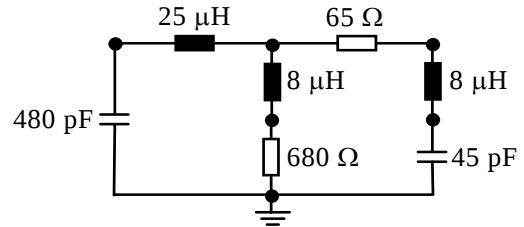
Şekil 8. İdeal elemanlarla oluşturulan darbe devresi

Gerçeklenen devrenin çıkışı ile ideal durumda hesaplama yapan bilgisayar programlarının verdiği sonuçlar şüphesiz tam anlamıyla uyumlu olmayacaktır. Bu nedenle HP 4194A empedans analizörü kullanılarak her elemanın düşük ve yüksek frekanstaki empedans değerleri incelenmiştir.

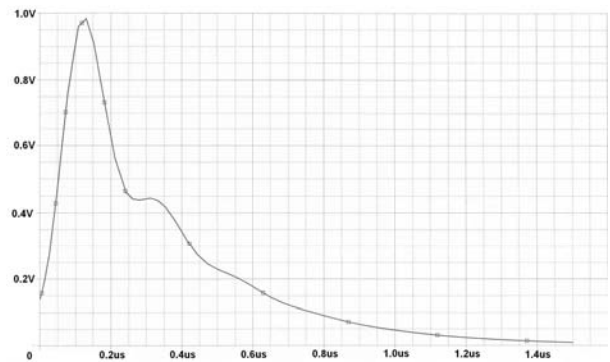


Şekil 9. Şekil 8'deki devrenin Pspice analizi çıktısı

100 ns'lik bir darbe, 10 MHz'lik bir işarete karşılık gelir. Gerçeklenen devre elemanlarının bu frekanstaki direnç, endüktans ve kapasite değerleri ölçülmüş, atlama aralığı kürelerinin de endüktans özellikleri yaklaşık tahmin edilerek Şekil 10'da gösterilen devre şeması elde edilmiştir. Devre elemanlarının 10 MHz'teki karakteristikleri göz önüne alınarak hazırlanan bu devrenin Pspice analizinin verdiği darbe gerilimi (Şekil 11), uygulamada elde edilen darbe gerilimi ile çok büyük benzerlik göstermiştir.

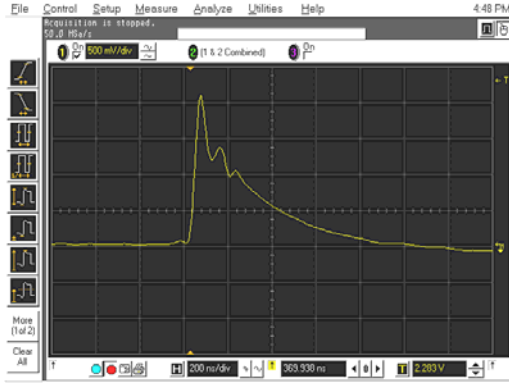


Şekil 10. Gerçeklenen darbe üreticinin 10 MHz'deki eleman değerleriyle devre şeması

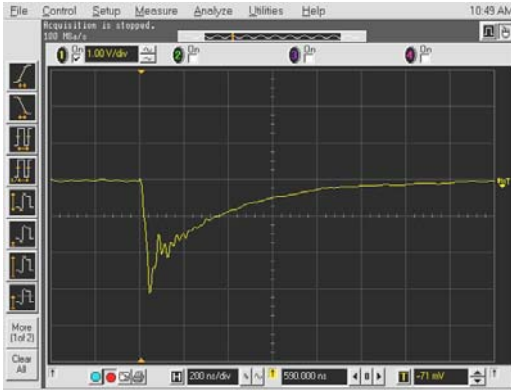


Şekil 11. Şekil 10'daki devrenin Pspice analizi çıktısı

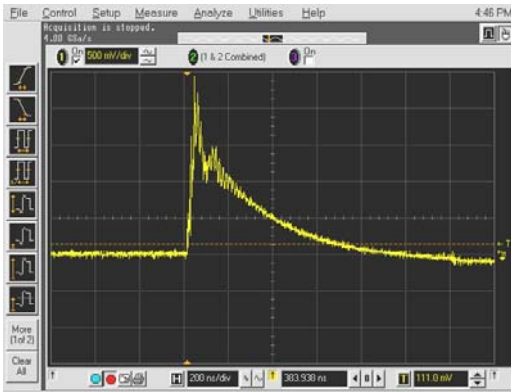
Gerçeklenen üreteç devresi hem pozitif hem negatif darbe gerilimi üretebilmektedir. Bu amaçla giriş doğru gerilim kaynağının kutupları değiştirilebilmektedir. Şekil 12 ve Şekil 13 sırasıyla elde edilen pozitif ve negatif darbeyi göstermektedir. Şekil 14'te de üretilen darbe geriliminin 4 GSa/s örnekleme hızındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 12. Üretilen pozitif darbe gerilimi (500 mV/div, 200 ns/div, 100 MSa/s)



Şekil 13. Üretilen negatif darbe gerilimi (1 V/div, 200 ns/div, 100 MSa/s)



Şekil 14. Üretilen bir pozitif darbe geriliminin 4 GSa/s örnekleme hızında görüntüsü

4. SONUÇ

Hızlı değişen, dik cepheli darbe gerilimi üretmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Çalışmadaki denemelere göre tepe devresi ile cephe süresini kısaltma yöntemi, 5 - 10 kV mertebelerinde, anahtarlama elemanının çok hassas ayarlanmasını gerektirdiğinden uygulanması oldukça zor bir

yöntemdir. Nispeten düşük gerilimlerde tek katlı Marx devresi kullanarak doğrudan nanosaniyelik darbeler üretilebilir. Ancak bu yöntem, hassas hesaplama ve doğru tasarım ölçütlerine gereksinim duymaktadır. Devrede eleman değerlerinin ve kaçak parametrelerinin bilinmesi tasarımı kolaylaştırmaktadır. Buna dikkat edilerek gerçekleştirilen darbe üretici ile yaklaşık 50 nanosaniyede tepe değerine ulaşan ve toplamda yaklaşık 1000 nanosaniye süren, pozitif ve negatif kutuplu 10 kV'a kadar tepe değerli darbe gerilimleri oldukça düşük gürültüyle üretilebilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] A. Akses, Darbe gerilimleri, yıldırım ve EMP üreteçleri, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [2] H. Akiyama, "Pulsed power in Japan", 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, New Mexico, Vol. 1, pp. 13-16, 3-6 July 1995.
- [3] A. Akses, Ö. Kalenderli, A. İ. Yürekli, A. H. Kumbasar, "Design and construction of a 12 kV impulse generator", EMC Europe 2002 Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Sorrento, Italy, pp. 257-260, Sept. 2002.
- [4] I. V. Grekhov, S. V. Korotkov, A. L. Stepaniants, et al., "High-power semiconductor-based nano and subnanosecond pulse generator with a low delay time", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 33, No. 4, pp. 1240-1244, 2005.
- [5] G. H. Rim, E. P. Pavlov, J. S. Kim, "Nanosecond pulse generation with nonlinear capacitors and magnetic power compression", 13th Int. Pulsed Power Conf., Las Vegas, Nevada, 2, pp. 1287-1289, 18-22 June 2001.
- [6] V. Efanov, S. Korenev, "Nanosecond Marx pulsed generator with semiconductor switches", 26th Int. Power Modulator Symposium, San Francisco California, pp. 520-525, 23-26 May 2004.
- [7] R. Verma, A. Shyam, S. Chaturvedi, et al., "A transmission line based compact repetitive and portable cascaded Blumlein pulser", 26th Int. Power Modulator Symposium, San Francisco California, pp. 526-529, 23-26 May 2004.
- [8] J. C. Martin, "Nanosecond pulse techniques", Proc. of the IEEE, Vol. 80, No. 6, pp. 934-945, 1992.
- [9] G. F. Basov, A. N. Bostrikov, B. M. Koval'chuk, et al., "High power megavolt pulsed generator with nanosecond rise time", 10th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque, New Mexico, Vol. 2, pp. 1426-1431, 3-6 July 1995.
- [10] C. Gilman, S. K. Lam, J. T. Naff, et al., "Design and performance of the FEMP-2000: a fast risetime, 2 MV EMP pulser", 20th IEEE Int. Pulsed Power Conf., Monterey, California, Vol. 2, pp. 1437-1440, June 1999.
- [11] P. W. Smith, *Transient Electronics Pulsed Circuit Technology*, John Wiley & Sons, London, 2002.