

DARBE GERİLİMLERİ, YILDIRIM VE EMP ÜRETEÇLERİ

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Aysam AKSES
504991208**

10 13 16

101316

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001

Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Haziran 2001

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ *Özcan*
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN *K. Mardikyan*
Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU (KO.Ü.) *Hasbi*

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Uzun süren çabalar sonunda elde edilen başarılar, insana yaşamın hazzını tattıran duyguların kıvılcımı olsa gerek. Bu duygular paylaşılmalı...

Hazırlamış olduğum tezde bana önderlik eden, saydığım, ama daha da önemlisi sevdiğim hocam Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, bana çok şey kazandırmış olan bu çalışmadan ötürü teşekkür ederim.

Gerek teknik gerek teorik enstitünün tüm olanaklarını önüme açan, UEKAE enstitü müdürümüz Sayın Önder YETİŞ'e, teorik desteğini, bilimsel düşünme tarzını kavratan konuşmalarını, fiziğin verdiği ilhamla yaratıcı fikir üretme yeteneğini benimle paylaşan, konuşmalarımızın her dakikasında yeni birşeyler öğrendiğim, saygı duyduğum, UEKAE enstitü müdür yardımcımız, hocam Dr.S.Temel YALÇIN'a minnettarım.

Çalışmamın her anında bana ışık tutan, her türlü desteği veren, enstitüdeki abilerim Fatih ÜSTÜNER'e ve Hakan KUMBASAR'a, yardıma ihtiyacım olduğunda yanımda gördüğüm UEKAE EMC/TEMPEST Laboratuvarında çalışan tüm dostlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Teknik konularda verdikleri destekle hazırlamış olduğum bu tezde özel bir yere sahip olan arkadaşlarım İsmail PALA ve Sefa OGAN'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

İhtiyacım olan desteği hiç esirgemeyen dostlarım Gökhan, Hamdi ve Karolin'e şükran borçluyum.

Ve son olarak da, sadece bu tez için değil, her zaman yanımda olan, asık suratıma katlanmaktan bıkmayan aileme, kardeşlerim Mases, Aryel ve Serdar'a, biricik anneme, bana yukarıdan destek olan babama ve AYdedem'e teşekkür ediyorum ve bu çalışmamı onlara armağan ediyorum.

Haziran 2001

Aysam AKSES

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. YÜKSEK GERİLİMLERİN ÜRETİLMESİ	4
2.1. Giriş	4
2.2. Yüksek Alternatif Gerilimlerin Üretilmesi	4
2.2.1. Tek Ünite Deney Transformatörü	5
2.2.2. Kaskad Deney Transformatörü	5
2.2.3. Rezonans Transformatörler	6
2.3. Yüksek Doğru Gerilimlerin Üretilmesi	7
2.3.1. Yarım ve Tam Dalga Doğrultucu Devreler	7
2.3.2. Gerilim Katlayıcı Devreler	7
2.3.3. Deltatron Devresi	8
2.3.4. Van de Graaff Generatörü	9
2.4. Darbe Gerilimi Üretilmesi	10
2.4.1. Marx Generatörü	10
2.4.2. L-C Generatörleri	12
2.4.3. İletim Hattı Yığını	12
2.4.4. Darbe Transformatörleri	12
3. DARBE GERİLİMLERİ	13
3.1. Giriş	13
3.2. Tanımlar	13
3.3. Darbe Gerilimlerinin Üretilmesi	15
3.3.1. Darbe Gerilimi Eşdeğer Devreleri	15
3.3.2. Eşdeğer Devrelerin Analizi	16
3.3.3. Çok Katlı Darbe Generatörleri	19

4. YILDIRIM DARBE ÜRETECİ TASARIMI	23
4.1 Eleman Değerlerinin Hesaplanması	23
4.2. Model Devrenin Gerçeklenmesi	26
4.3. 12 kV'luk Üretecin Gerçeklenmesi	30
4.4. Tasarımda Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar	34
4.5. Ölçme Sistemi	36
4.6. Darbe Üreteci Çıkış Dalga Şekli	37
5. DEVRENİN EMU AÇISINDAN İNCELENMESİ	39
5.1. EMU	39
5.2. EMU Testleri	39
5.3. Darbe Üretecine Uygulanan RE Testi	40
5.4. Sonuç	46
6. ELEKTROMAGNETİK DARBE	47
6.1. Giriş	47
6.2. EMP Nedir?	47
6.3. EMP Dalga Şekli ve Etkileri	47
6.4. EMP Üreteçleri	49
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	59

KISALTMALAR

EMP	: Elektromagnetik Darbe (Electromagnetic Pulse)
EMU (EMC)	: Elektromagnetik Uyumluluk (Electromagnetic Compatibility)
EMS	: Elektromagnetik Alınganlık (Electromagnetic Susceptibility)
EMI	: Elektromagnetik Girişim (Electromagnetic Interference)
YG	: Yüksek Gerilim
NEMP	: Nükleer Elektromagnetik Darbe (Nuclear Electromagnetic Pulse)
RE	: Işıma Yoluyla Emisyon (Radiated Emission)
FFT	: Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No:</u>
Tablo 3.1. T_1 , T_2 ile T_c , T_s arasındaki orantı faktörleri	19
Tablo 5.1. Kullanılan Cihazlar	40
Tablo 5.2 Devrenin Oluşturduğu Elektrik Alan Şiddeti Verileri	45



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No :

Şekil 2.1 : Kaskad deney transformatörleri	6
Şekil 2.2 : Doğrultucu, akım ve gerilimi	7
Şekil 2.3 : Gerilim katlayıcı devre	8
Şekil 2.4 : Deltatron devresi	9
Şekil 2.5 : Van de Graaff Generatörü	10
Şekil 2.6 : Darbe generatörleri	11
Şekil 3.1 : Tam darbe gerilimi	13
Şekil 3.2 : Cephede ve sırtta kesik darbe gerilimleri	14
Şekil 3.3 : a ve b eşdeğer devreleri	15
Şekil 3.4 : Çok katlı Marx generatörü	20
Şekil 3.5 : Geliştirilmiş Marx generatörü	21
Şekil 3.6 : Darbe generatörü tetikleme devresi	22
Şekil 3.7 : Trigatronlu tetikleme devresi	22
Şekil 4.1 : Pspice analizi yapılan devre	25
Şekil 4.2 : Pspice ile oluşturulan devre ve çıkış dalga şekli	26
Şekil 4.3 : Model devrenin fotoğrafı	27
Şekil 4.4 : Model devre, simülasyon sistemi ve ölçme cihazı	28
Şekil 4.5 : Gerçeklenen yüksek gerilim darbe generatörünün ilkel hali	32
Şekil 4.6 : Devrenin hazırlandığı masa	33
Şekil 4.7 : Kapasitif gerilim bölücü ile ölçme	36
Şekil 4.8 : Gerçeklenen üretcin çıkış dalga şekli (yükselme zamanı)	38
Şekil 4.9 : Gerçeklenen üretcin çıkış dalga şekli (sırt yarıdeğer süresi)	38
Şekil 5.1 : EMI ölçüm düzeneği	41
Şekil 5.2 : Tam yansız odanın içten görünüşü	42
Şekil 5.3 : Tam yansız odada alınan EMI dalga şekli	43
Şekil 5.4 : İletken odada yapılan RE testi çıkış dalga şekli	44
Şekil 5.5 : Giriş gerilimine göre devrenin oluşturduğu alan şiddeti	45
Şekil 5.6 : 18 kV'luk giriş gerilimi için elektromagnetik girişimin frekans yanıtı ...	46
Şekil 6.1 : EMP dalga şekli	48
Şekil 6.2 : Planlanan EMP üretici blok şeması	50
Şekil 6.3 : ALECS EMP simülatörü	52
Şekil 6.4 : Hücumbotların EMP testi	53

DARBE GERİLİMLERİ, YILDIRIM VE EMP ÜRETEÇLERİ

ÖZET

Elektrik tesislerinde meydana gelen ani gerilim yükselmeleri, birçok sorunu beraberinde getirir. Gerek tesisin kendisi, gerekse cihazlar ani gerilim değişimlerine olumsuz yanıt verir. Dış kaynaklı ani gerilim darbelerinin en önemlisi yıldırım düşmesiyle oluşan darbedir. Yıldırım düşmesi, sistemlere farklı etkilerde bulunur. Doğrudan etkiler, fiziksel tahribat veya yangın şeklinde meydana gelirken, bağıl yük, toprak akımları, elektrostatik boşalma ve elektromagnetik darbe (EMP) gibi etkiler yıldırımın sebep olduğu dolaylı etkilerdendir. Yıldırım darbe gerilimini laboratuvar ortamında üretmek, bu sayılan etkilere tesisin veya cihazların vereceği cevabı önceden tahmin edip gerekli önlemleri alma amaçlıdır. Bu amaçla hazırlanan yıldırım darbe gerilimini üretecek devreler cihazların maruz kalacakları zorlamaları oluşturur. Kullanılan devrelerden en yaygın olanı, Marx Generatörü olarak bilinen devredir. Kondansatörlerin paralel doldurulup seri boşaltılması ilkesine dayanan çok katlı devreler ile, yıldırım darbesini gösteren gerilim dalgası üretilir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışma, Marx ilkesine dayanan tek katlı darbe üreteç devresi tasarlanması ve yapılmasıdır. 25 kV'a kadar doğru gerilim verebilen bir kaynak kullanılarak, 12 kV'luk tek katlı bir darbe üreteci gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan devrenin çıkış darbe gerilimi, 1.2 / 50 µs'lik yıldırım darbe gerilimidir.

Devre çıkış gerilimini ölçme, hem kapasitif gerilim bölücü ile, hem de 1000:1 çevirme oranına sahip modern bir yüksek gerilim probu ile gerçekleştirilmiştir. Dalga şekli, 1 GHz'lik, 4 GSa/s örnekleme yeteneğine sahip dijital osiloskop ile görüntülenmiştir.

Devre yapısında birer adet darbe ve yük kondansatörü, cephe ve sırt sürelerini belirleyen şekil dirençleri, ölçme kondansatörü ve anahtarlama elemanı olarak bir çift küresel elektrot kullanılmıştır. Devrenin 11 kV'luk giriş gerilimi için çıkış gerilimi 10 kV, dolayısıyla verimi %91'dir.

Tez kapsamında, gerçekleştirilen üreteç EMU açısından değerlendirilmiştir. Bu amaçla devrenin ortama yaydığı elektromagnetik kirlilik miktarı belirlenmiş, bu kirliliğin farklı ortamlarda etkileri gösterilmiştir.

Yıldırımın etkilerinden biri olan elektromagnetik darbe, sistemleri iletkenlik yoluyla değil, alan yoluyla etkiler. Bu etki, elektromagnetik uyumluluk testlerini gerçekleştirmek amacıyla laboratuvar koşullarında incelenebilir. Tezde gerçekleştirilen üreteç böyle bir amaçta kullanılmak için hazırlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılacak olan üreteçte karşılaşılabilecek tahmin edilen sorunlar,

gerçeklenen devre üzerinde incelenecektir. Sistemin EMU testlerinde kullanılması için çıkışına darbe gerilimini, darbe alanına çeviren bir anten sistemi tasarlanmalıdır.



IMPULSE VOLTAGES, LIGHTNING AND EMP SIMULATORS

SUMMARY

Instantaneous voltage rises in electrical installations get many problems with. Either the installation itself or the equipments give a negative response to the sudden variations. The most important external impulse voltage is the one formed by lightning. Lightning causes different effects on the systems. The direct effects takes place as physical destruction or fire and the indirect effect can be stated as relative charge, earth currents, electrostatic discharge (ESD) and electromagnetic pulse (EMP). The aim for the generation of lightning impulse voltages in laboratories is for estimation of the response of the systems and equipment and taking the necessary precautions against the effects stated. The generators constructed simulates the forces that the equipments will be faced to. The most popular one of these generators is the one known as Marx Generator. Charging the capacitors in parallel and then discharging them in series forms a multistage generator for lightning impulse voltage.

This thesis depends on the study of design and construction of a single stage Marx generator. A generator of 12 kV is constructed, using a dc power supply with an output voltage of 25 kV. The output voltage of the generator is a lightning impulse voltage with a rise/fall time of 1.2 / 50 μ s.

For the measurement of the output impulse voltage, both capacitive voltage divider and a high voltage probe with a ratio of 1000 : 1 were used. The digital oscilloscope used for scoping the waveform and analyzing has a frequency of 1 GHz and sampling rate of 4 Gsa/s.

In the electrical circuit of the generator, discharge and load capacitors, form resistors for determination of rise and fall durations, voltage divider capacitor and spark gaps are used. For an input voltage of 11 kV, output is 10 kV so the efficiency is 91%.

The generators circuit has been evaluated for EMC. For this purpose, the level of interference from the device is measured and effect of the interference is tested at different environment.

Electromagnetic pulse (EMP), one of the effects of lightning, disturbs the systems with field effect, apart from conducted disturbance. This effect can be observed in laboratories for electromagnetic compatibility tests. The generator constructed is designed to be used for research project of this purpose. The generator is used for facing with the problems estimated to have during the

design of EMP generator. Next step will be the design of an antenna system that will be connected to the output of EMP generator.



1. GİRİŞ

Elektrik, icadıyla beraber kullanımı artmış ve gelişen teknolojiyle kullanıldığı alanlar çeşitlilik göstermiştir. Doğru akım olarak başlayan süreç, alternatif ve darbe akım ve gerilimlerinin avantajları ve bu gerilimlere ihtiyaç duyulmasıyla ivme kazanmıştır. Zamanla üretilen gerilim düzeyleri bazı ihtiyaçları karşılayamadığından gerilim düzeylerini yükseltme çalışmaları başlamıştır. Darbe gerilimi ve akımı, gündelik yaşamımızda sıkça karşılaştığımız elektriksel olaylardır. Yıldırım düşmesi, ani devre açma-kapama durumları, gerilim değişimleri veya elektromagnetik etki ile oluşan gerilimlerin hepsi darbe gerilimi sınıfına girer. Karşılaşılabilecek durumları önceden kestirmek ve alınacak önlemlerin başarısını değerlendirmek için darbe gerilimleri üretilir. Yüksek darbe gerilimini üreten temel devre yapıları 1900'lü yılların başında oluşturulmuştur. Darbe gerilimini üretmenin çeşitli yolları vardır. Yöntemlerin çoğu, enerjiyi bir sistemde depolama ve daha sonra ani olarak bu enerjiyi boşaltma ilkesine dayanır [1].

Marx'ın kullandığı sistem diğer birçok devrenin temelini oluşturur. Kullanılan elemanların bağlantı sıralarını değiştirerek, ateşleme elektrodlarını farklı seçerek veya boşalma devresine eklemeler yaparak günümüze kadar aynı temele dayanan farklı üreteçler hazırlanmıştır. Hazırlanan devrelerin çoğu, yüksek gerilim ile çalışan cihaz ve makinelere, yukarıda sayılan durumların herhangi biri sebebiyle yüksek darbe gerilimi gelmesi, yürüyen darbe dalgası ile karşılaşması durumlarında cihazın vereceği yanıtın kestirilmesi amacıyla yapılmıştır. Temel ilkedan sapmadan, enerjiyi depolayan sistemler ve boşalmayı sağlayan anahtarlarda gelişmeler kaydedilmiştir. Enerji depolayıcı sistem olarak en çok tercih edilen yapı kondansatör bankalarıdır. Zamanla bu yapıda meydana gelen gelişmeler ise, kullanılan kapasitif devrelerdeki endüktansın en aza indirilmesi, böylece daha hızlı ve düzgün bir dolma-boşalma karakteristiğinin elde edilmesidir.

Darbe gerilimi üreteçlerinin en önemli elemanlarından biri olan anahtarlama elemanı da teknolojik gelişmeye ayak uydurmuştur. En çok kullanılan yapı,

küresel elektrot sistemidir. Çalışmaları, yatay veya düşey ekseninde karşılıklı yerleştirilen iletken küresel elektrotların, ayarlandıkları gerilimde aralarındaki yalıtkanın delinmesiyle ilettime geçmeleri ilkesine dayanır. Zamanla bu yapı, ilkesi bozulmadan, gaz ortamlar içine taşınmıştır. Boşalma karakteristiği bilinen bir gazın bulunduğu tüp içine konan elektrotlar, farklı yöntemlerle ilettime geçirilmiştir. Elektrotların tetiklenme şekilleri ve kontrolleri, modern sistemlerde güç elektroniği düzeneklerine dayanır. Bilgisayarların teknoloji üzerinde kurduğu hakimiyet, bu düzeneklerin de uzaktan ve bilgisayar yardımıyla kontrolünü sağlamış, kullanılan optik sistemler, insan faktörünü en az düzeye indirmiştir.

Darbe gerilimi üreteçlerinde zamanla gözlenen bir başka gelişme, ölçme sistemlerinin basitleşmesi ve hata miktarının düşmesidir. Darbe gerilimlerinin ölçülmesinde en sık tercih edilen yöntem, gerilim bölücü kullanımıdır. Günümüze kadar yaygın olarak kullanılan kapasitif gerilim bölücülü düzeneklerin yerini artık probalar, yüksek duyarlılığa sahip alıcılar ve analizi kolaylaştıran osiloskop ve analizörler almıştır.

Bu tezde incelenen genel konu, yüksek darbe gerilimlerinin üretilmesi, dik cepheli darbe gerilimlerinin karakteristiğinin belirlenmesidir. Özel olarak tez, yüksek darbe gerilimi üreticinin tasarlanmasını ve gerçekleşmesini içermektedir. Gerçekleşmiş olan üreteç kullanılarak farklı durumların karşılaştırılması yapılacaktır. Tasarımda kullanılan parametreler ve buna bağlı olarak eleman seçimi, mevcut yöntemlerle yapılacaktır. Marx ilkesiyle çalışan tek katlı bir üreteç tasarlanacak ve gerçekleştirilecektir. Üreteçte kullanılacak olan kaynağın dc veya ac olması durumlarında izlenilecek yöntem anlatılacak, üretilen darbe gerilimini ölçme için kullanılan yüksek gerilim probu osiloskop ile gerilim bölücü üzerinden gerilim ölçümü karşılaştırılacaktır. Burada en basit olarak elde edilebilecek kapasitif bölücüyle bir probun vereceği gerilim seviyesi ve şekli arasındaki fark gösterilecektir.

Bu tezde hazırlanan yüksek darbe gerilimi üreticinde, ilkel sistemler ve modern yapılar bir arada kullanılmıştır. Tercih edilen ilke, Marx'ın kullandığı kondansatör sisteminin tek katlı halidir. Anahtarlama elemanı olarak mekanik yapıdaki küresel elektrot sistemi kullanılmış, ama elektronik kontrollü anahtarlama sistemi için ön çalışma başlatılmıştır. Ölçme sisteminde kapasitif gerilim bölücü ve yüksek gerilim probu kullanılmış, ölçme sonuçları osiloskop ve analizörler ile değerlendirilmiştir.

Şimdiye kadar yapılan yüksek gerilim darbe üreticilerinin büyük bir kısmı, gerçek hayatta karşılaşılabilecek darbe gerilimlerinin iletken yoluyla denenecek edilecek cihaza ulaşması, ve bu cihazda elektriksel ve fiziksel birtakım zorlamalara sebebiyet vermesi, dolayısıyla bozulma veya yanlış çalışma durumlarını gözlemlemek amacıyla hazırlanmıştır. Bu tezde tasarımı anlatılacak ve gerçekleştirilecek olan darbe üretici, yıldırımın oluşturacağı elektromagnetik etkileri simüle etme amaçlıdır. Buna göre deney altındaki cihaz iletkenlik yoluyla fiziksel zorlanmaya maruz bırakılmayıp, üretilen darbe geriliminin bir anten sistemine kuple edilmesiyle, cihaza elektromagnetik etki, daha doğru bir terimle “alınanlık” deneyi uygulamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Böyle bir sistem kurarak EMU deneyi yapmak, ileriki bir çalışmanın konusu olacaktır. Tezde hazırlanacak üretici, daha sonraki çalışmalarda sadece yıldırımı değil, daha yüksek frekansa sahip olan NEMP (nükleer elektromagnetik darbe) simülasyonunu sağlamak amacıyla geliştirilecektir. Bu tezde, amaçlanan NEMP çalışmasının temeli verilecek, frekansı yükseltmek için izlenebilecek yöntemlere bakışlar değerlendirilecek ama gerçekleştirilmeyecektir.

Yukarıda sayılanlar doğrultusunda bu tezin akışında yüksek gerilimlerin üretilmesi genel olarak anlatılacak, özel olarak darbe gerilimleri konusunda ayrıntılı bilgi verilecek, yıldırım darbe gerilimini simüle edecek bir üreticinin tasarım aşamaları anlatılacak ve gerçekleştirme yolu gösterilecektir. En son olarak ileriki çalışmalar için bazı temel noktalar belirtilecek ve sırasıyla devrenin EMU açısından değerlendirilmesi, sonrasında da EMP ile ilgili ayrıntılı bilgi verilecektir.

2. YÜKSEK GERİLİMLERİN ÜRETİLMESİ

2.1 Giriş

Elektrik mühendisliği ve uygulamalı fiziğin çeşitli bölümlerinde yüksek gerilime ihtiyaç vardır. Yüksek gerilim deney düzenleri temel olarak araştırma laboratuvarlarında ve deney amaçlı laboratuvarlarda kullanılır. Yüksek gerilimin gerektiği birkaç uygulama sıralamak gerekirse:

- Elektron mikroskobu ve X-ışını üniteleri 100 kV mertebelerinde yüksek dc gerilime ihtiyaç duyar.
- Elektrostatik hızlandırıcılar ve parçacık ivmelendiricileri gibi çoğu sistem birkaç kilovolttan mega voltlar mertebesine kadar çıkabilen yüksek doğru gerilim kullanırlar.
- Güç sistemlerinin yalıtım deneyleri milyon volt seviyelerinde yüksek alternatif gerilim gerektirir duruma gelmiştir.
- Güç sistemlerinde oluşabilecek kısa veya uzun süreli aşırı gerilimlerin simülasyonunda yüksek darbe gerilimleri kullanılır.

Aslında yüksek gerilim mühendislerinin temel ilgisi, çeşitli güç sistemi elemanlarının ac, dc, anahtarlama ve yıldırım darbe gerilimleri karşısındaki yalıtımlarının deneyi üzerinedir. Çalışma gerilimlerinden daha yüksek gerilimlerle deneyler yaparak güvenlik faktörü çıkarılmaya çalışılır. Yüksek gerilim deneylerinde akım genelde küçük değerlerle sınırlanır. Deney akımları 1 A'ın altında olmakla beraber parafudr veya kısadevre dayanım deneylerinde yüksek akım değerlerine çıkılır [1, 2].

2.2 Yüksek Alternatif Gerilimlerin Üretilmesi [1, 2]

Birkaç yüz kilovolttan az olan alternatif gerilimlerin üretimi için tek yükseltici transformatör kullanılır. Daha yüksek gerilimlere çıkıldığında ısınma, yalıtım,

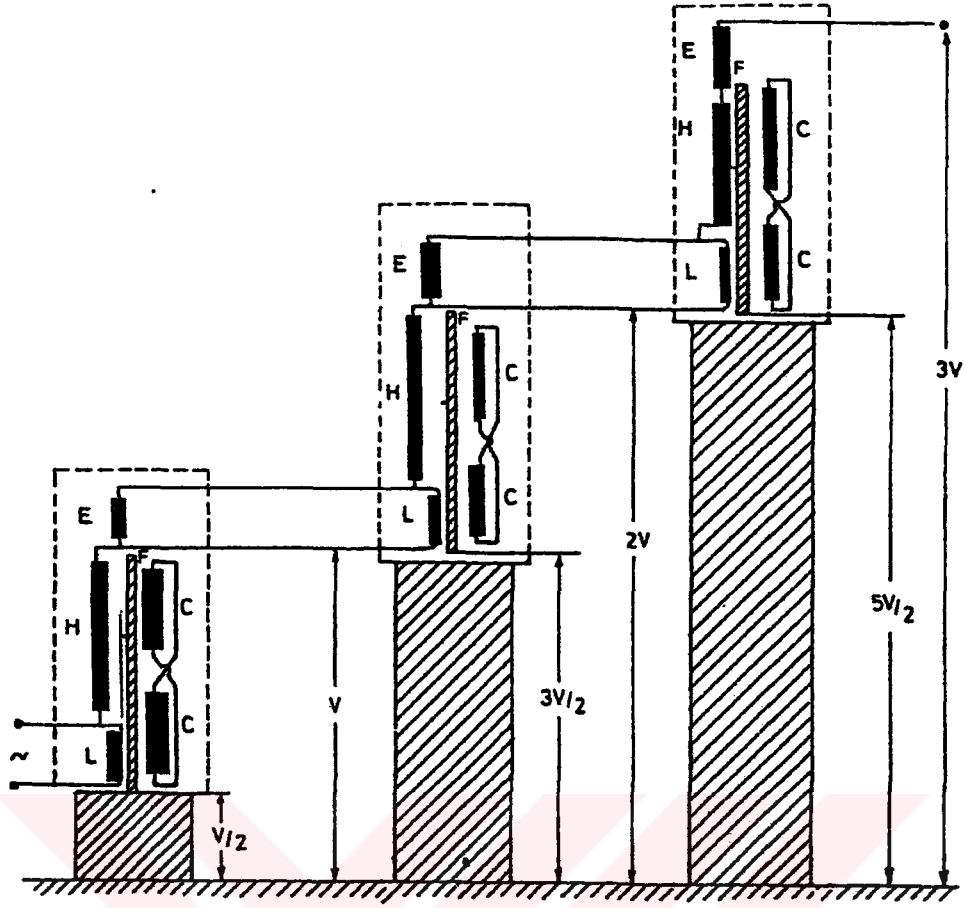
tasarım ve taşıma zorlaşacağından birkaç transformatörün kaskad bağlanması yoluna gidilir.

2.2.1 Tek Ünite Deney Transformatörü

Tek ünite deney transformatörleri tek fazlı güç transformatörleri ile yapı bakımından aynıdır. Deney transformatörlerinde yüksek gerilim sargısı yalıtımına ve mıknatıslama akımının çıkış gerilimi dalga şeklini bozmayacak seviyede küçük olmasına ayrıca özen gösterilir. Güç transformatörlerinden farklı olarak deney transformatörleri güç mertebeleri açısından çok küçük, çıkış gerilimi ve sargı çevirme oranları bakımından çok büyüktür. Genelde transformatörün yüksek ve alçak gerilim uçlarından biri toprak potansiyelinde, öteki tam gerilim potansiyelindedir, ancak bir terminal yerine orta noktaların topraklanıp sargıların yarı gerilim yalıtım seviyesine göre hazırlanması çoğu kez daha ekonomik olur. Yüksek ve alçak gerilim sargıları arasındaki kaçak reaktansa karşı kompanzasyon sargıları kullanılır. Yüksek gerilim sargıları, potansiyeli kontrollü bir şekilde dağıtmak amacıyla tabakalı yapılır.

2.2.2 Kaskad Transformatörler

Kaskad transformatörler ilk olarak Petersen, Dessauer ve Welter tarafından kullanılmıştır. Her katın alçak gerilim sargısı (L), bir önceki katın uyarma sargısı (E) tarafından beslenir. (E) ve (L) sargıları bir üst katın sargısına göre daha fazla yüklenir. Şekil 2.1'e göre son kat P gücündeyse, ikinci kat 2P ve ilk kat 3P gücündedir. Buna karşı, ilk kat çıkış gerilimi V ise, daha sonraki katların gerilimleri, kat sayısı kadar çarpımsal artar. Kaskad transformatörlerle 10 MVA güce ve 2,25 MV gerilimlere çıkılmıştır.



Şekil 2.1 Kaskad deney transformatörü

2.2.3 Rezonans Transformatörleri

Yüksek gerilim deneylerinde tek kat veya kaskad transformatörler direkt kullanılırsa gerek kaynaktan, gerekse transformatörlerin çalışmaları sonucunda harmonik akımları oluşabilir. Bunu önlemenin bir yolu filtreleme, daha teknik ve ekonomik yöntemi ise rezonans devreleri kullanmaktır. Primer veya sekonder devreye paralel reaktörlerin konulması, kapasitif yük akımını azaltır. Alternatif sistem, seri rezonans devresidir. Devreyi şebeke frekansında (50-60 Hz) seri bir reaktör ile rezonansa sokarak harmonik akımlar büyük ölçüde zayıflatılabilir. Bu devrelerin başlıca avantajları saf sinüsoidal çıkış, kaynaktan daha az güç ihtiyacı ve deney altındaki cisim hatasından dolayı oluşabilecek akımların dağılması ile etkisinin azalmasıdır.

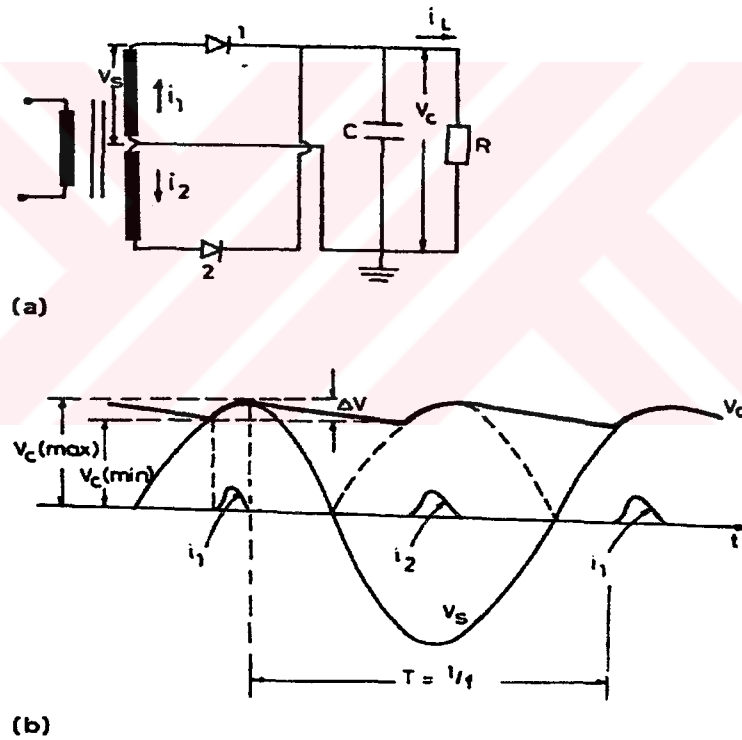
2.3. Yüksek Doğru Gerilimlerin Üretilmesi [1, 2]

Elektrostatik generatörler dışında, genel olarak yüksek doğru gerilimler yüksek alternatif gerilimlerin doğrultulmasıyla elde edilir.

2.3.1 Yarım ve Tam Dalga Doğrultucu Devreler

Doğrultucu devrelerde genel olarak paralel bir kondansatör (C), iletim süresi boyunca transformator çıkış gerilimi ile doldurulur (Şekil 2.2). Kesim süresinde ise C.R zaman sabitine bağlı olarak yük üzerine boşalır. Elde edilen gerilimde ΔU kadar bir dalgalılık vardır. Yarım dalga doğrultucuda iletim süresi boyunca kondansatörde oluşturulan yük q olmak üzere dalgalılık,

$$\Delta U = \frac{q}{C} = \frac{I_L}{f_c} \quad (2.1)$$

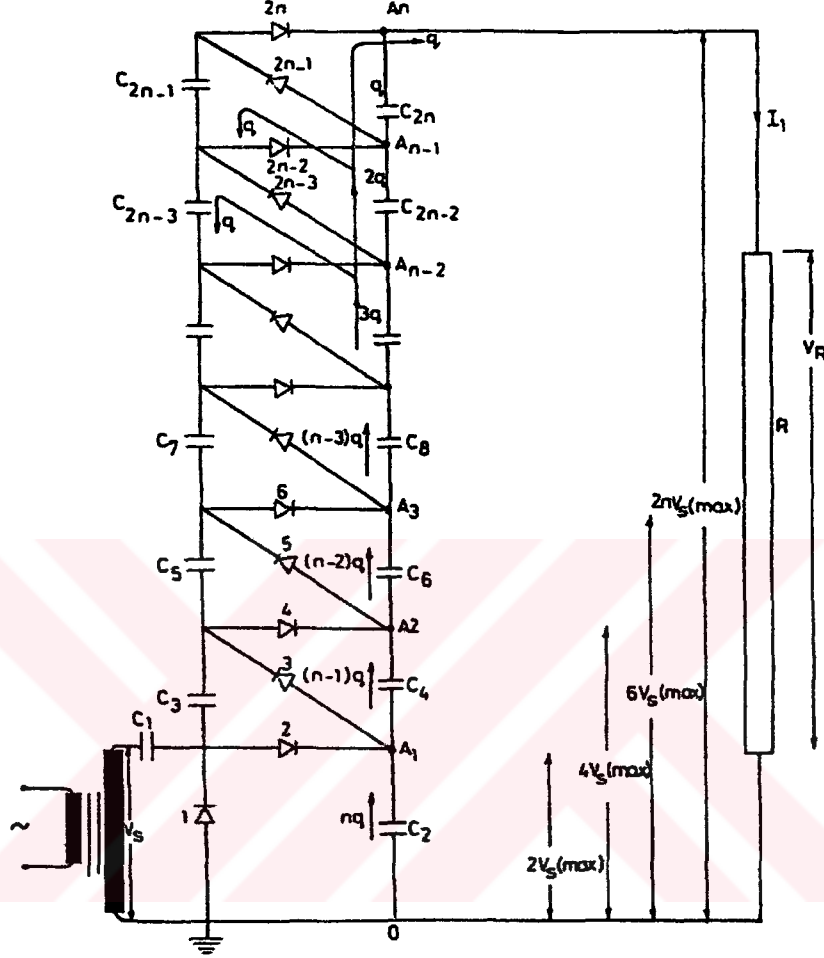


Şekil 2.2 Doğrultucu, akım ve gerilimi

2.3.2 Gerilim Katlayıcı Devreler

Gerilim katlayıcı devreler Cockcroft-Walton prensibini kullanır (Şekil 2.3). İlk kat 1 ve 2 doğrultucuları, C_1 ve C_2 kondansatörleri ve yüksek gerilim transformatoründen oluşur. Bu devrede kondansatörler sonucu maksimum

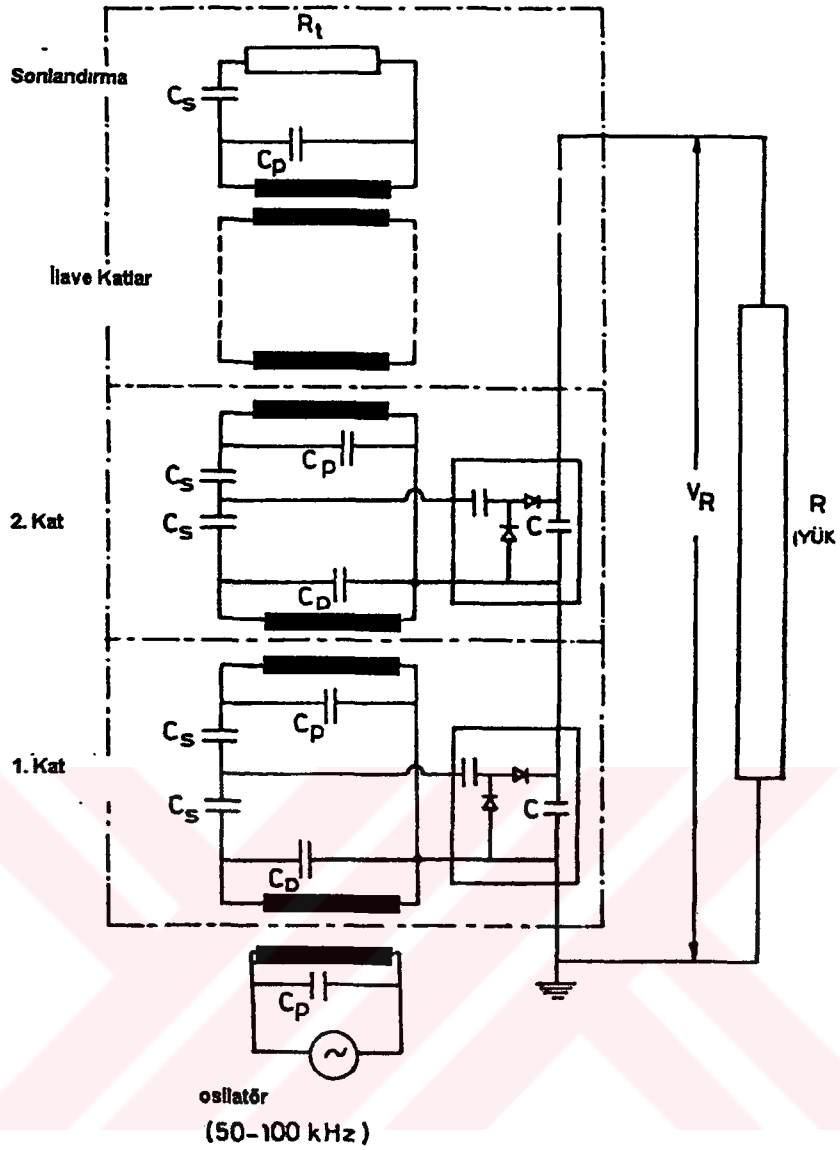
gerilim kadar bir öteleme meydana gelir. Aynı yapının arka arkaya kaskadlanması ile çıkışta kat sayısının iki katı kadar giriş gerilimi elde edilir. Bu tür yapılarla 5 MV-10 mA'lik düzenekler kurulabilir.



Şekil 2.3 Gerilim katlayıcı devre

2.3.3. Deltatron Devresi

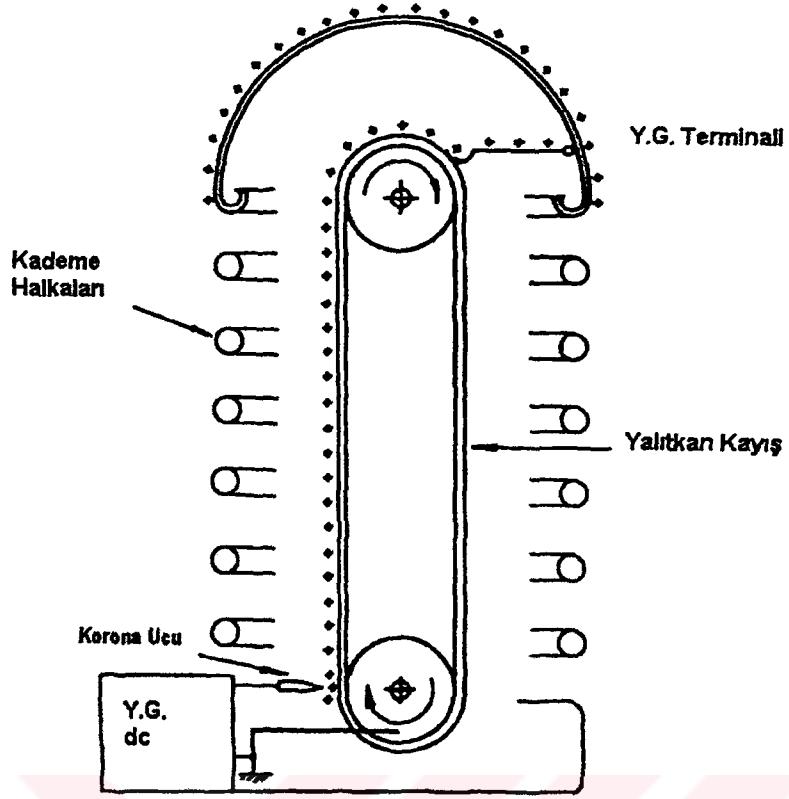
Şekil 2.4'te görüldüğü gibi yüksek dc gerilim, kaskad bağlanmış transformatörlerin arasına Cockcroft-Walton prensibi ile bağlanmış katlayıcı devreler ile de üretilebilir. Bu tür devreler küçük dalgalılık faktörü, kararlı yapıları ve hızlı yanıt verebilme avantajlarına sahiptir. Ne var ki yalıtım zorluğu nedeniyle 1 MV mertebelerinin üzerine çıkamazlar.



Şekil 2.4 Deltatron devresi

2.3.4 Van de Graaff Generatörü

Elektrostatik generatörlerdendir ve mikroamper mertebesinde akıma sahip 5-6 MV gerilim üretebilirler. Elektrotlarda korona ile üretilen iyonlar, yalıtkan bir kayış ile mekanik olarak üst kısımdaki yük toplayıcı terminale taşınırlar. Oluşturulan yük sayısı arttıkça gerilim yükselir. Ucuz ve basit bir yapısı vardır.



Şekil 2.5 Van de Graaff Generatörü

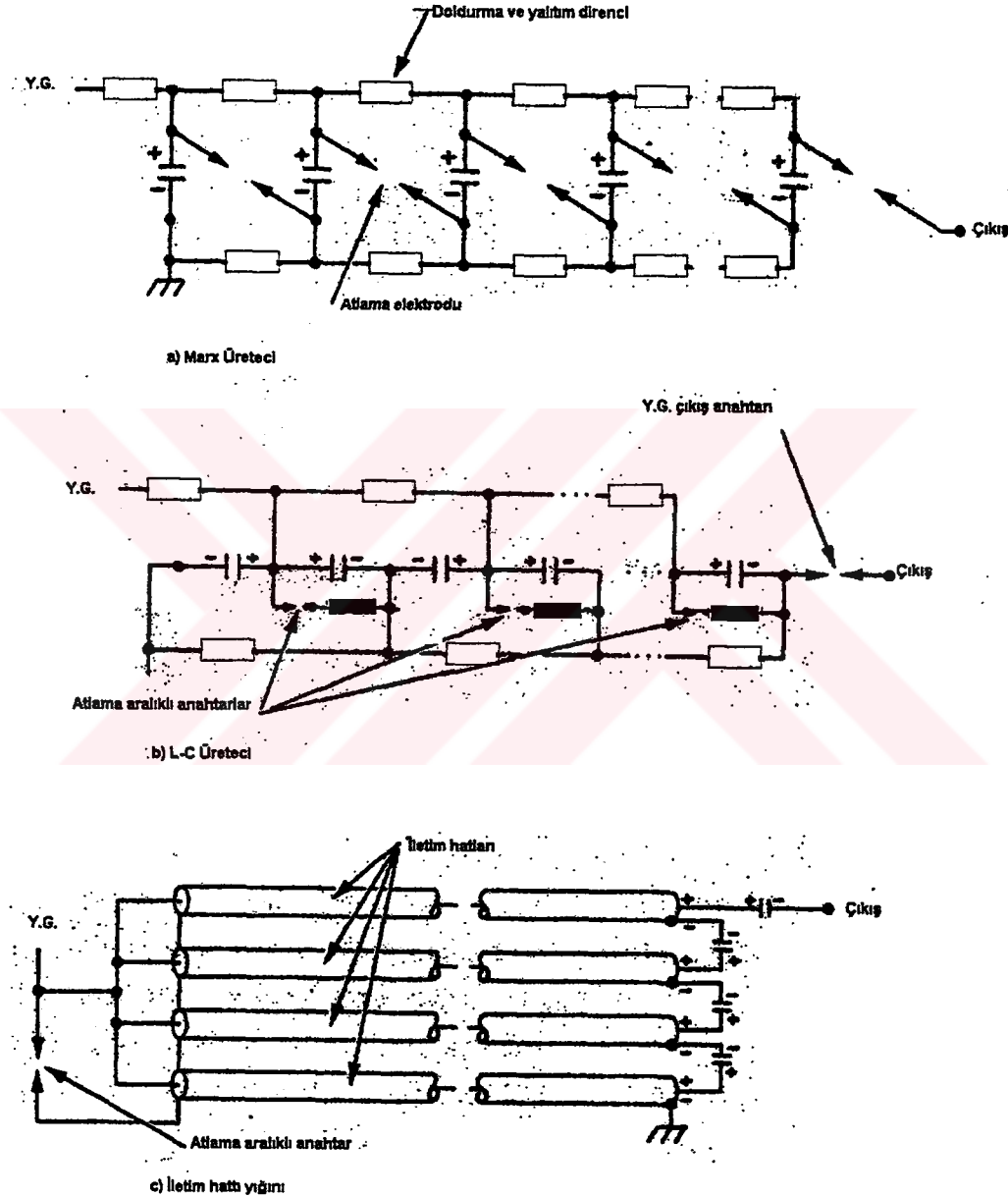
2.4 Darbe Gerilimlerinin Üretilmesi

İletim sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, açma-kapama veya yıldırım düşmesi sonucu oluşan gerilim dalgalarının sistem boyunca ilerleyip tesise (güç transformatörlerine) fiziksel ve elektromagnetik bozucu etkiye bulunduğunu göstermiştir. Darbe gerilimi, hızlı bir şekilde maksimum değerine yükselip sonra daha yavaş biçimde sifıra düşen gerilimdir. Bu nedenle tanım olarak yükselme ve düşme sürelerinin oranı ile ifade edilirler. Darbe gerilimi üretmenin çeşitli yolları vardır (Şekil 2.6) [3, 4].

2.4.1 Marx Generatörü

Bu sistem uzun zamandır yüksek darbe gerilimi elde etmede en çok tercih edilen yöntemdir. Bir grup kondansatör ihtiyaç düzeyine kadar (tipik olarak 100 kV'lar) doğru gerilimle paralel olarak doldurulur ve daha sonra atlama elektrotları ateşlenerek seri bağlı konuma geçmeleri sağlanır.

Şekil 2.6 a'dan da görüleceği gibi kondansatörleri paralel doldurmak için kullanılan gerilimin kondansatör sayısı kadar katı gerilim çıkışta, seri boşalma sonucunda elde edilir. Kullanılacak kondansatör sayısı (kat sayısı) için bir sınırlama olmadığı için çıkış geriliminin büyüklüğü için de bir sınır yoktur. Devrede kullanılan eleman, dolayısıyla bağlama sayısı arttıkça kararlılık ve yalıtım problemlerinin artacağı unutulmamalıdır [5].



Şekil 2.6 Darbe Generatörleri

2.4.2 L-C Generatörleri

Marx sisteminin bir türü olan bu yöntemde boşalma evresinde kullanılan atlama elektrodlarına gereksinim yoktur. Şekil 2.6-b'de görüleceği üzere kondansatörler seri bağlanırlar ve ters kutbiyetle doldurulup bobinler üzerine boşaltılarak darbeyi ters çevirirler. Bu tür sistemlerde darbe ile çalışan çıkış anahtarları gereklidir. Bu devrenin kullanımı pek yaygınlaşmamıştır [5].

2.4.3 İletim Hattı Yığını

İletim hatları veya kabloları da kondansatörler gibi Marx devresi elemanı olarak kullanılabilir. Kabloların geçiş zamanındaki yalıtımları değerlendirilerek, kabloların ucunda ve yükten uzak olmak şartıyla anahtarları toprak potansiyelinde tutma gibi bir avantajları vardır. Yük kısmındaki kablolar seri ve paralel birleşimlerde bağlanarak farklı akım ve gerilim çıkışları alınabilir. Enerji depolama direkt kabloları enjilendirme veya dışardan bir devreyi üzerlerine boşaltma gibi yollarla sağlanabilir [5].

2.4.4 Darbe Transformatörleri

Hava çekirdekli transformatör tasarımları yapıldığı dönemde esinlenilmiştir. Darbe enerjisi elektrostatik olarak sargılarda depolanır [5].

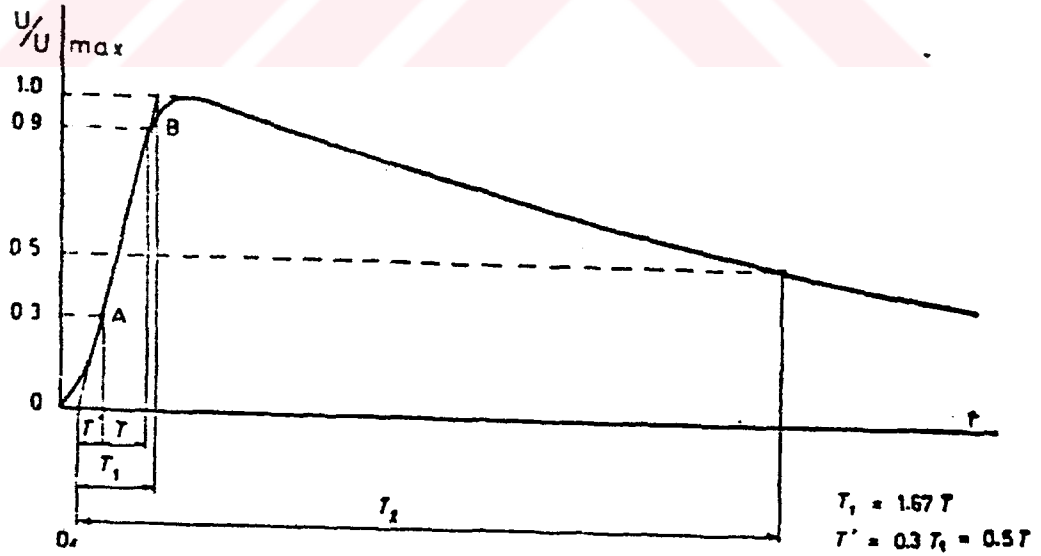
3. DARBE GERİLİMLERİ

3.1. Giriş

Genel olarak darbe gerilimlerinden atmosferik (yıldırım) ve açma-kapama kaynaklı olanlar incelenir. Anahtarlama sonucu oluşan darbe gerilimleri, yıldırım darbe gerilimine benzemekle beraber daha yavaştır. Darbe gerilimlerinin şekli yükselme ve düşme sürelerinin değişmesiyle farklılık gösterir. Bunun yanında herhangi bir anda kesilmesiyle kesik darbe gerilimleri de oluşabilir.

3.2 Tanımlar

Tam darbe gerilimi : Tam darbe gerilimi, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi sıfır değerinden başlayıp tepe değerine kadar hızla yükselen ve sonra yükselme süresine göre daha yavaş biçimde düşen, periyodik olmayan bir geçici gerilimdir [6].



Şekil 3.1 Tam Darbe Gerilimi

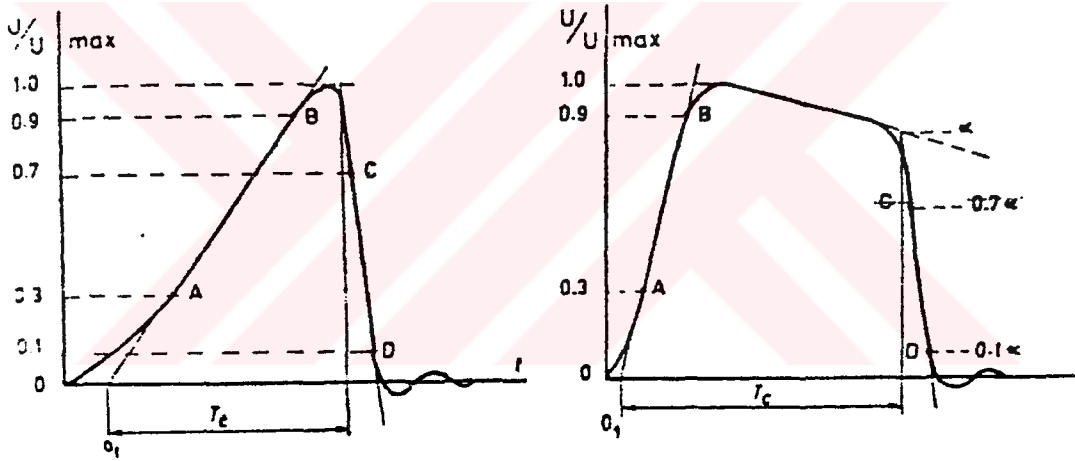
Anma tepe değeri U_{max} : Yükselmekte olan darbenin ulaşabileceği en yüksek değer, başka bir deyişle yükselmesini bitirip düşmeye başladığı değer olarak tanımlanır [4].

Anma cephe süresi T_1 : Darbe gerilimi tepe değerinin %30 ve %90'ının meydana geldiği anlar arasındaki T süresinin 1.67 katıdır [4].

Anma cephe dikliği S : Gerilim tepe değerinin anma cephe süresine oranı olarak tanımlanır ve $kV / \mu s$ olarak ifade edilir [6].

Anma sırt yarıdeğer süresi T_2 : Darbe gerilimin başlangıç noktası ile sırtta gerilim tepe değerinin yarıya düştüğü ana karşılık gelen nokta arasındaki süredir [4].

Kesik darbe gerilimi : Tam darbe geriliminin herhangi bir değerden birden bire yaklaşık olarak sıfır değerine düşmesiyle oluşan darbe gerilimi şeklidir. Kesilme konum olarak cephede veya sırtta meydana gelebilir [6].



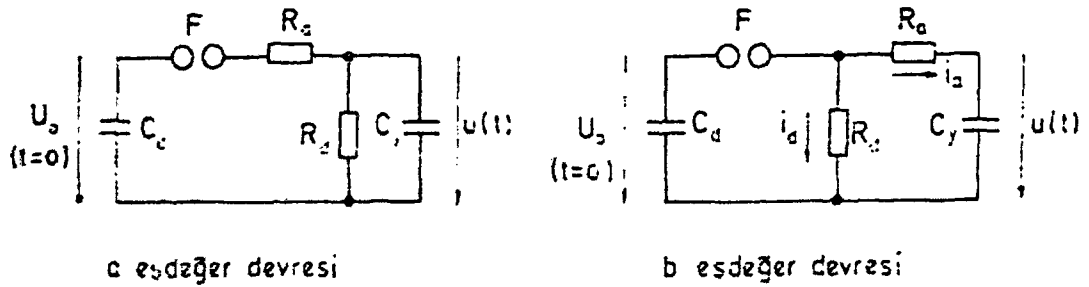
Şekil 3.2 Cephede ve Sırtta Kesik Darbe Gerilimleri

Standart darbe gerilimi : Darbe gerilimlerinin yükselme ve düşme sürelerine göre farklı standartlarda kabul edilen farklı şekilleri vardır. En yaygın olarak kabul edilen tam darbe gerilimi IEC 60-1'deki şekliyle anma cephe süresi $1.2 \mu s \pm \%30$ ve sırt yarıdeğer süresi $50 \mu s \pm \%20$ olan ve $1.2/50$ darbe gerilimi olarak ifade edilen gerilim şeklidir. Simülasyonlarda yıldırım darbe şekli de bu standart darbe değerlerine göre verilir [6, 7, 8].

3.3 Darbe Gerilimlerinin Üretilmesi

3.3.1 Darbe Gerilimi Eşdeğer Devreleri

Darbe gerilimi üretiminde en çok kullanılan devre örnekleri Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 a ve b Eşdeğer Devreleri

a ve b eşdeğer devreleri olarak adlandırılan bu devrelerin ortak çalışma ilkesi şöyledir:

C_d darbe kondansatörü yüksek değerli bir yük direnci üzerinden U_0 doğru gerilimine doldurulur ve küresel elektrodlarda atlama meydana gelmesiyle boşalır. İstenen $u(t)$ gerilimi C_y yük kondansatörü uçları arasında meydana gelir. a ve b eşdeğer devreleri arasındaki fark R_d boşalma direncinin konumundan kaynaklanır. Devre elemanlarının büyüklüğü oluşan darbe şeklini belirler. Cephe süresinin kısa olması, C_y yük kapasitesinin U_m tepe değeriyle hızla dolmasına, sırt süresinin uzun olması ise yük kondansatörün yavaş boşalmasına bağlıdır. Bunun için $R_d \gg R_a$ olmalıdır. Elektrodlardaki atlamanın hemen ardından yani $t=0$ anında her iki eşdeğer devrede U_0 gerilimi seri bağlı R_a ve C_y elemanlarına uygulanmış olur. $U(t)$ gerilimi, R_a C_y terimi ne kadar küçükse, o kadar çabuk tepe değerine erişir. U_m tepe değeri, başlangıçta mevcut olan $U_0 C_d$ elektrik yükünün $C_d + C_y$ kapasitesine bölünmesinden ileri gelen gerilimden daha büyük olamaz. Bu nedenle devrenin η verimi

$$\eta = \frac{U_m}{U_0} \leq \frac{C_d}{C_d + C_y} \quad (3.1)$$

Genel olarak gerilimin U_m tepe değeri verilen bir U_0 yük gerilimine göre mümkün olduğu kadar büyük olması için $C_d \gg C_y$ seçilir. Bundan sonra darbe geriliminin sırtındaki üstel azalma, a eşdeğer devresi için $C_d (R_a + R_d)$ ve b eşdeğer devresi için $C_d R_d$ zaman sabitiyle olur.

Bir boşalmada söz konusu olan darbe enerjisi,

$$W = \frac{1}{2} C_d U_{\max}^2 \quad (3.2)$$

ile ifade edilir. Burada U_0 için mümkün olan en yüksek dolma gerilimi konursa, bir darbe generatörünün en önemli tanım büyüklüğü olan maksimum darbe enerjisi elde edilir.

U_0 gerilimi, elektrotlarda atlama olduğu veya yardımcı bir boşalma ile tuttuğu andaki dolma gerilimidir. Bu nedenle kendi kendine ateşleyen generatörlerde U_m darbe geriliminin tepe değerinde bir yükselme ancak elektrotlar arası açıklığın büyütülmesi ile mümkün olur. Yük direnci önündeki doğru gerilimde bir yükselme ise ancak C_d darbe kondansatörünün U_0 gerilimiyle daha çabuk dolmasını ve elektrotların daha kısa zaman aralıklarıyla kendi kendine çalışmasını sağlar. Böylece üretilen darbe sıklığı artar. [3,9]

3.3.2 Eşdeğer Devrelerin Analizi

Darbe gerilimi devrelerinin boyutlandırılması için devre elemanları ile dalga şeklini belirleyen büyüklükler arasındaki bağıntılara ihtiyaç vardır. Darbe gerilimi üreteç devrelerinden en çok tercih edileni Şekil 3.3'de verilen b eşdeğer devresidir. Bu devrenin analizi yapılırsa;

$$U_0 = \frac{1}{C_d} \int_0^t (i_d + i_a) dt = R_d i_d = R_a i_a + u(t) \quad (3.3)$$

$$i_a = C_y \frac{du(t)}{dt} \quad (3.4)$$

denklemleri yazılabilir. Burada $u(t=0) = 0$ kabul edilmiştir. Laplace dönüşümü yapılırsa

$$\frac{U_0}{s} = \frac{1}{s C_d} [I_d + s C_y U] = R_d I_d = U (s R_d C_y + 1) \quad (3.5)$$

şekline veya

$$U(s) = \frac{U_0}{R_d C_y} \cdot \frac{1}{s^2 + bs + c} \quad (3.6)$$

şekline girer. Burada

$$b = \frac{1}{R_d C_d} + \frac{1}{R_a C_d} + \frac{1}{R_b C_y} \quad (3.7)$$

$$c = \frac{1}{R_d C_y R_d C_d} \quad (3.8)$$

konmuştur. Paydadaki denklemin kökleri

$$s_{1,2} = \frac{b}{2} \left(-1 \pm \sqrt{1 - \frac{4c}{b}} \right) \quad (3.9)$$

Kökler daima sıfırdan küçük ve reeldir. Ters transformasyonla

$$u(t) = \frac{U_0}{R_d C_y} \cdot \frac{1}{s_1 - s_2} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) \quad (3.10)$$

veya

$$u(t) = \frac{U_0}{R_d C_y} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{-t/T_1} - e^{-t/T_2}) \quad (3.11)$$

elde edilir. Burada

$$T_1 = -\frac{1}{s_1} \quad T_2 = -\frac{1}{s_2} \quad (3.12)$$

konmuştur. Buna göre darbe gerilimi, zaman sabitleri T_1 ve T_2 olan iki azalan üstel fonksiyonun farkı olarak belirir. Eğer darbe generatörlerinde genelde mevcut olan $R_d C_d \gg R_a C_y$ koşulu gözönüne alınırsa bulunan çözümde bazı basitleştirmeler yapılabilir. Buna göre

$$b \approx \frac{1}{R_a} \left(\frac{C_d + C_y}{C_d C_y} \right) \quad \text{ve} \quad \frac{4c}{b^2} \ll 1 \quad (3.13)$$

yazılabilir.

Dolayısıyla $s_{1,2}$ nin karekök içindeki ifadesi $(1-2c/b^2)$ şeklini alır ki buradan da kökler ve zaman sabitleri;

$$s_1 \approx -\frac{c}{b} = -\frac{1}{R_d(C_d + C_y)} \Rightarrow T_1 = R_d(C_d + C_y) \quad (3.14)$$

$$s_2 \approx \frac{c}{b} - b \approx -b = -\frac{1}{R_a} \left(\frac{C_d + C_y}{C_d C_y} \right) \Rightarrow T_2 = R_a \left(\frac{C_d C_y}{C_d + C_y} \right) \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Bu durumda verim ifadesi

$$\eta = \frac{C_d}{C_d + C_y} \quad (3.16)$$

Aynı hesaplamalar Şekil 3.3'de verilen a eşdeğer devresi için yapılırsa bulunacak sonuçlar,

$$T_1 \approx (R_a + R_d) \cdot (C_d + C_y) \quad (3.17)$$

$$T_2 \approx \frac{R_a R_d}{R_a + R_d} \cdot \frac{C_d C_y}{C_d + C_y} \quad (3.18)$$

$$\eta = \frac{R_d}{R_a + R_d} \cdot \frac{C_d}{C_d + C_y} \quad (3.19)$$

olur. T_1 ve T_2 zaman sabitleriyle bir darbe geriliminin şekli tam olarak belirlenir. T_c ve T_s cephe ve sırt yarı değer süreleri T_1 ve T_2 sürelerinin birer fonksiyonudur. Aralarındaki bağlantı

$$T_c = k_2 T_2 \quad (3.20)$$

$$T_s = k_1 T_1 \quad (3.21)$$

denklemleriyle verilir. k_1 ve k_2 orantı faktörleri en önemli standart üç darbe gerilimi için Tablo 1'de verilmiştir (VDE 0433) [4, 6].

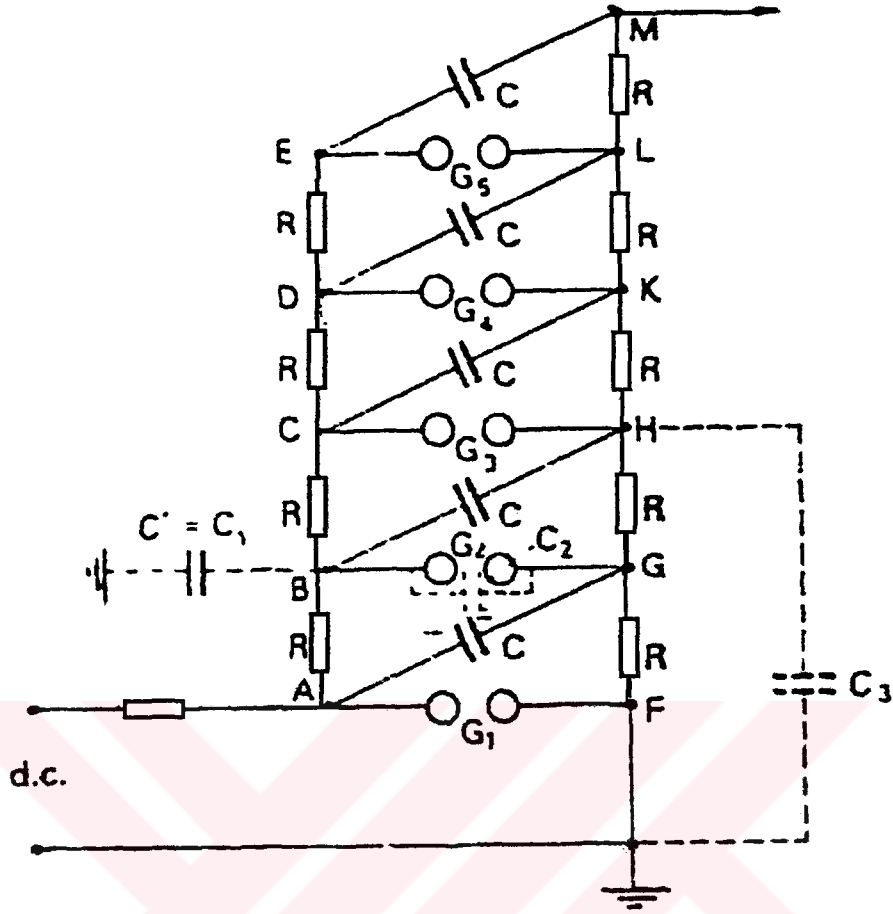
Tablo 3.1 T_1 , T_2 ile T_c , T_s arasındaki orantı faktörleri

T_c / T_s	1.2 / 5	1.2 / 50	1.2 / 200
k_1	1.44	0.73	0.70
k_2	1.49	2.96	3.15

3.3.3 Çok Katlı Darbe Generatörleri

Yüksek darbe gerilimlerine ihtiyaç duyulduğunda tek katlı darbe generatörleri kullanmak birçok açıdan uygun değildir. Devreyi besleyecek olan dc gerilim kaynağının çıkış geriliminin çok yüksek olması gerektiği gibi devrede kullanılan elemanların herbiri tek başına bu yüksek gerilime maruz kalır. Bu nedenle kullanılacak kaynağın ve devre elemanlarının anma gerilim seviyelerinin yüksek olması gerekir. Tek katlı devre kullanmak yalıtım sorunlarını da beraberinde getirir. Çok yüksek çıkış gerilimlerinin gerektiği durumlarda çok katlı darbe devreleri kullanmak uygundur. Bir grup kondansatör paralel olarak doldurulup seri olarak boşaltılarak çıkışta giriş geriliminin basamak sayısı kadar katı gerilim elde edilebilir. Bu ilke 1923 yılında ilk olarak Marx tarafından kullanıldığı için çok katlı darbe generatörlerine Marx Generatörleri de denir. Daha sonra bu generatörler üzerinde çeşitli yenilemeler yapılmıştır [2, 9, 10, 11].

Marx prensibini daha kolay anlamak için Şekil 3.4 üzerinde inceleme yapılabilir. G hava aralıklı elektrotlar açık iken kondansatörler birbirlerine paralel bağlıdır. Kaynak tarafından doğru gerilimin uygulanmasıyla birlikte bu kat kondansatörleri R dirençleri üzerinden dolarlar. Böylece A, B, C, D ve E noktaları toprağa göre +V kaynak potansiyeline ulaşırlar. F, G, H, K, L, M noktaları ise toprak potansiyelindedir. G_1 elektrodunun delinmesiyle A noktası toprak potansiyeline çekilirken AG arasında bulunan C kondansatörünün dolu olması sebebiyle G noktası -V potansiyeline sahip olur. Bu durumda BG arasında 2V değerinde bir potansiyel farkı vardır ve bu gerilimle G_2 elektrotu delinir. Noktalar arasındaki potansiyel farkı böylece katlanarak artar ve son noktada kat sayısı yani kondansatör sayısı kadar giriş gerilim değeri elde edilir [1].

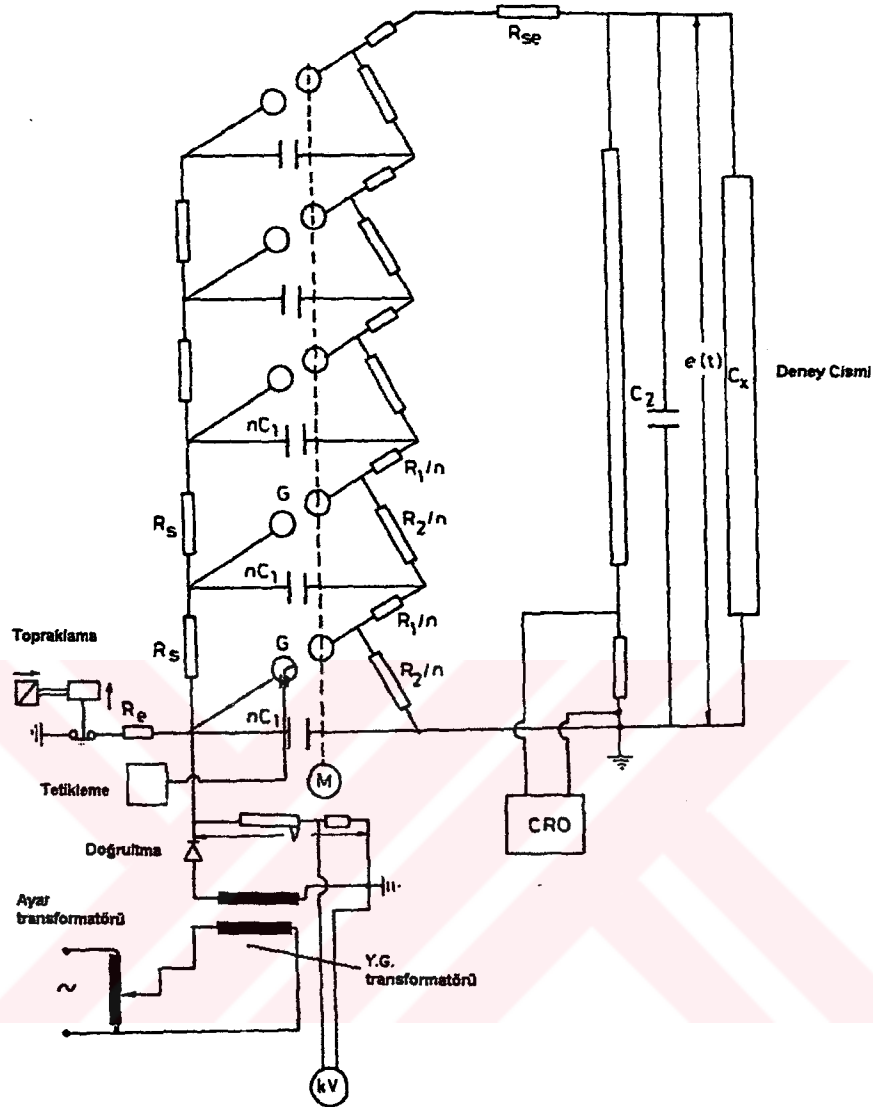


Şekil 3.4 Çok Katlı Marx Generatörü

Şekil 3.5 Marx devresinin yenilenmiş bir halini gösterir. R_1 / n her bir katın G aralığına seri bağlanmışken yine n parçaya bölünmüş olan R_2 direnci kat kondansatörlerinin uçlarına bağlanmıştır. Bu iyileştirmeler generatör büyüklüğünden ve maliyetinden, direnç büyüklüğünden tasarruf sağlayarak yüksek gerilim verimi sağlar. Elektrodların delinme gerilimleri, doldurma gerilimi V 'den biraz daha büyük seçilerek bütün katların bu gerilim seviyesine ulaşması sağlanır. Generatörün çalışması istendiğinde elektrodlar dışardan bir etki ile peşpeşe ateşlenirler. Böylece seri bağlanan kondansatörler dalga şeklini belirleyen dirençler üzerinden deney cismine boşalır. Çok katlı devreler kat sayısı, çıkış gerilimi ve toplam enerjileri ile ifade edilirler [2].

Çok katlı devrelerde genel olarak ilk elektrodun diğer elektrodların ateşlenmesini sağlayan boşalmayı gerçekleştirmesi için elektrot aralığı

diğerlerinden çok az daha küçük bırakılır. Bu ilk elektrot ise boşalma sinyalini dışardan alır.

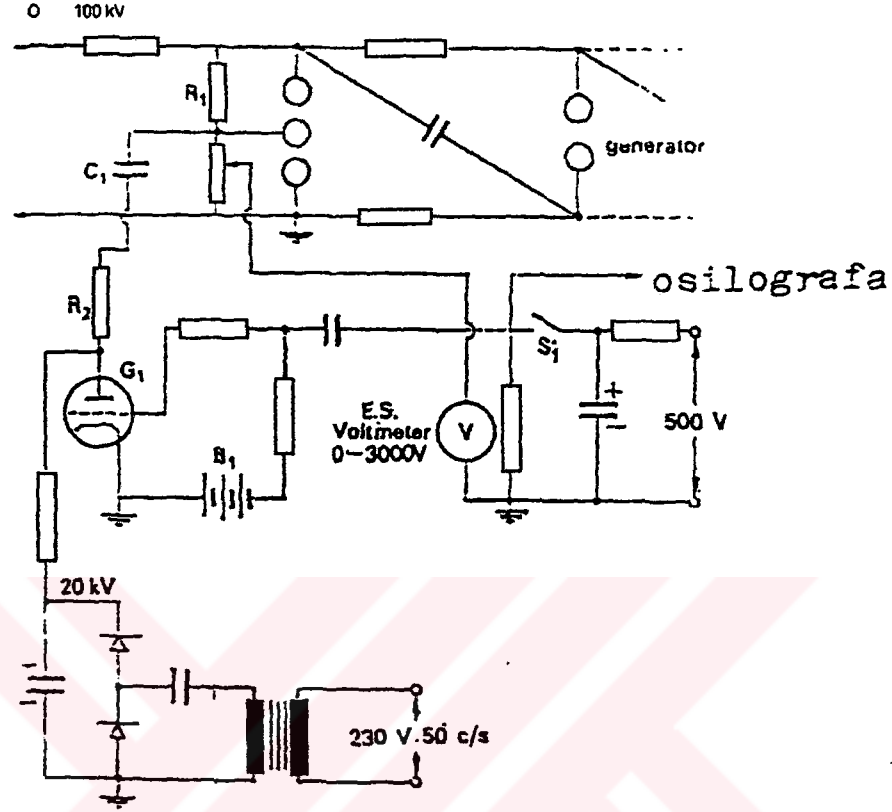


Şekil 3.5 Geliştirilmiş Marx Generatörü

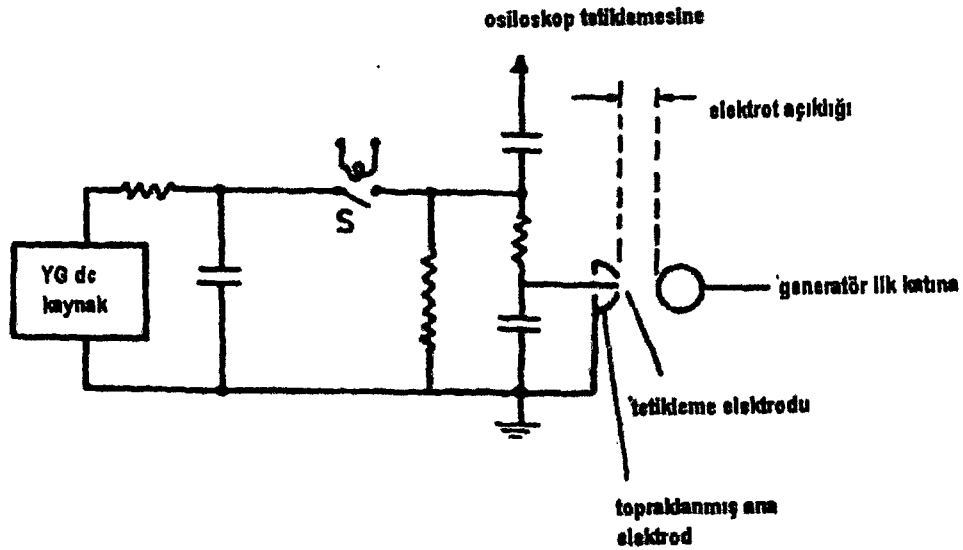
1950'lere kadar en alttaki elektrot, üç-elektrot ilkesine göre yapıılıyordu. Bu üç elektrot, doldurma gerilimi dıştaki elektrotlara uygulanacak şekilde yerleştirilir. Sistem, doldurma gerilimi sınırına ayarlanır ve bu aşamada orta elektroda bir gerilim darbesi uygulanarak sistem tetiklenir. Ortadaki küre topraktan yalıtılmış olup iki hava aralığını eşitleyebilecek şekilde ayarlanmıştır. S_1 anahtarı kapatıldığı zaman sistem ateşlenmiş olur (Şekil 3.6).

Bu sistemin daha gelişmiş hali, trigatronlu boşalma devresidir (Şekil 3.7). Burada ilk katta, topraklanmış yarıküre şeklinde bir elektrodla, normal küre şekilli elektrod temel hava aralığı bırakılarak şekildeki gibi yerleştirilir. Metal çubuk şekilli tetikleme elektrodu yarıkürenin içinde ve ondan yalıtılmış şekilde

yerleştirilmiştir. Bu tetikleme çubuk elektroduna uygulanacak gerilim, topraklanmış ana elektrod üzerinde kıvılcıma neden olarak küresel elektrod sisteminin ateşlenmesini sağlar. Bu tetikleme devresi yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 6].



Şekil 3.6 Darbe Generatörü Tetikleme Devresi



Şekil 3.7 Trigatronlu Tetikleme Devresi

4. YILDIRIM DARBE GERİLİMİ ÜRETECİ TASARIMI

Darbe gerilimi üretici tasarlanırken, 3.3 numaralı konu anlatımında verilen formüllerden yararlanmak uygundur. Tasarım yaparken izlenebilecek bir başka yöntem de elde bulunan olanaklar içinde farklı eleman birleşimlerini denemek ve bu yolla istenen darbeyi verebilecek devreyi oluşturmaktır. Bu ikinci yöntem, gerekli olan eleman sayısının fazla olması, devre üzerinde sürekli değişiklik yapılması, daha da önemlisi devreyi oluştururken birtakım sayısal analizler yapılmadığı için farklı koşullarda devrenin vereceği yanıtların kestirilememesi gibi sebeplerden uygun olmaz. Tasarlanacak olan üreteç, ileri aşamalarda geliştirilecek olan EMP üreteç sisteminin kaynağı için bir prototip oluşturacağından elde edilecek darbenin yüksek enerjili ve çok yüksek gerilimli olmasına gerek görülmemiştir. Yüksek gerilim uygulamalarında devrede kullanılan eleman sayısı arttıkça, bu elemanlar arasındaki bağlamalar sebebiyle çalışma kararlılığında bozulmalar meydana gelir. Marx prensibi kullanarak çok katlı devreler yapılabilir ve bu devrelerle çok yüksek gerilimlere çıkılabilir. Bu tezde amaç çok yüksek gerilime çıkmaktan çok devre çalışma şeklini gerçeklemek ve gerilim düzeyinin yükseltileceği ileri aşamalara ışık tutmak olduğundan devrenin daha az eleman kullanılarak tek katlı yapılmasına karar verilmiştir.

4.1 Eleman Değerlerinin Hesaplanması

Daha önce de sözedildiği gibi bir darbe üreticinin en önemli büyüklükleri gerilim düzeyi ve enerjisidir. Darbe üreticini enerji parametresini temel alarak boyutlandırmak uygun görülmüştür. Buna göre gerçekleştirilecek olan üreticinin daha sonraki uygulamalara temel oluşturması planlandığından enerji düzeyinin joule mertebesinde olması uygundur. Eleman değerlerinin hesaplanmasında kolaylık sağlaması açısından 10 J'lük enerji düzeyine karar verilmiştir. Darbe generatörünün enerjisini belirleyen temel büyüklük C_d doldurma kondansatörü ve bu kondansatörü dolduracak olan U_{max} en büyük gerilim düzeyidir. Üretilen darbenin enerjisi ise darbe gerilim-zaman grafiğinde işlevin zamana göre

integralidir ki bu da grafikteki alana karşı düşer. Tasarıma kaynak kondansatörünün değerinin belirlenmesiyle başlanmıştır. Gerilim seviyesi belirlenirken elde bulunan olanaklar değerlendirilmiştir. Buna göre 20 kV'luk bir darbe üretmek için kullanılabilecek kaynak elde vardır. Maliyeti ve yalıtım sınıfını düşürmek amacıyla 10-15 kV mertebesinde darbe gerilimi üretmenin kolay gerçekleştirilebilir olduğuna karar verilmiştir.

Buna göre 10 J'lük bir üreteç için

$$W = \frac{1}{2} C_d U_{\max}^2 \quad (4.1)$$

$$C_d = \frac{2W}{U_{\max}^2} = \frac{2 \cdot 10J}{(12kV)^2} = 138nF \quad (4.2)$$

elde edilir. Devre gerçekleştirirken (4.2) bağıntısından bulunan değerdeki veya buna en yakın değerdeki kondansatör ile çalışma yapılacaktır. Devre tasarımı sırasında Şekil 3.3'de verilen b eşdeğer devresi gözönüne alınmış ve buna göre devre boyutlandırılmıştır.

Devrede, istenen dalga şeklini elde etmek ve verimi yüksek bir devre elde etmek amacıyla doldurma kondansatörü yük kondansatörüne oranla çok daha büyüktür. Verimin yüksek olması için $C_d = 30 C_y$ olarak seçilmiş, böylece 10 J'lük enerjiye sahip üreteç için belirlenen $C_d = 138 \text{ nF}$ değerine göre $C_y = 4.6 \text{ nF}$ değeri elde edilmiştir.

Darbe gerilimi üreteçlerinde darbenin şeklini, yani yükselme ve düşme sürelerini belirleyen büyüklüklerden ikisi R_s ve R_d dirençleridir. Bu dirençlerin değerlerinin belirlenmesinde, yükselme ve düşme zaman sabitlerinin bağıntıları kullanılmıştır.

Hazırlanacak olan üreteç 1.2/50 μs 'lik yıldırım gerilimi üreteceğinden Tablo 3.1'den bu dalga için $k_1 = 0.73$ ve $k_2 = 2.96$ olduğu bulunur. Bu değerler kullanılarak zaman sabitleri,

$$T_1 = T_s / k_1 \quad T_1 = 68.49 \mu s \quad (4.3)$$

ve

$$T_2 = T_c / k_2 \quad T_2 = 0.405 \mu s \quad (4.4)$$

olarak elde edilir. Zaman sabitlerini devre elemanlarına bağlayan bağıntılar,

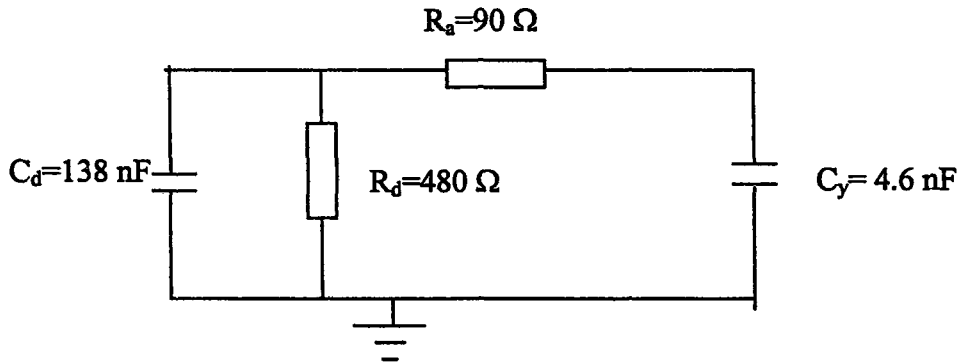
$$T_1 = R_d(C_d + C_y) \quad (4.5)$$

ve

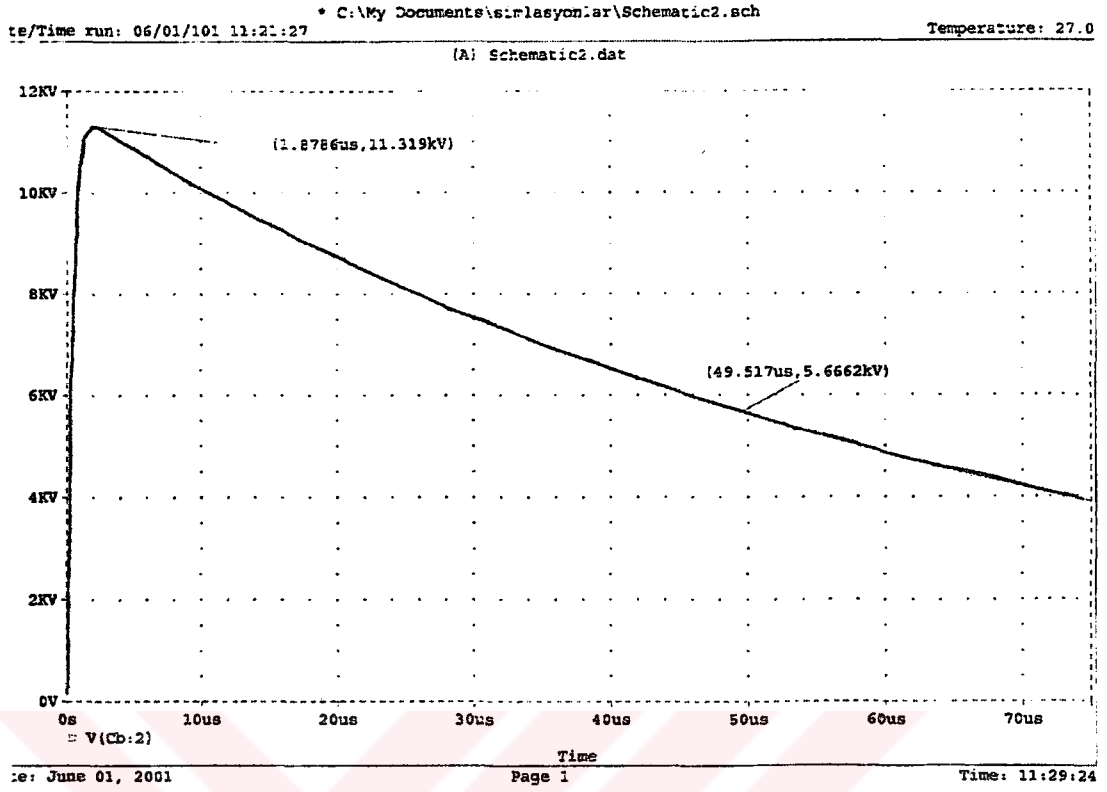
$$T_2 = R_a \frac{C_d \cdot C_y}{C_d + C_y} \quad (4.6)$$

olduğundan, kondansatör değerleri ve zaman sabitleri yerlerine konulduğunda direnç değerleri, $R_d = 480 \, \Omega$ ve $R_a = 90 \, \Omega$ olarak bulunur. Bu formüller yazılırken $C_d \gg C_y$ koşulu gözönüne alınmış ve sadeleştirmeler yapılmıştır. Teoriden elde edilen değerler, genelde pratikte devre elemanlarındaki kaçaklar ve toleranslar nedeniyle tam doğru sonuç vermez. Bunun yanında, sayısal olarak hesaplanan değerlere sahip elemanları temin etmek de çoğu zaman mümkün değildir. Burada hesaplanan değerlere enyakın değerde elemanları temin edip, gerek bilgisayar yardımıyla, gerekse devre üzerinde deneyerek sonuca ulaşmak gerekir.

Tez çalışması sırasında devre analizlerinin çoğunda “Pspice” adlı hazır bilgisayar programı kullanılmıştır. Tasarlanan değerler için programla analiz yapılmış ve çıkışta alınacak darbe şekli incelenmiştir. Yukarıda hesaplanan değerler için Pspice Schematic Editor’da çizilen devre ve analiz sonucu elde edilen çıkış gerilimi dalga şekli, Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Psice Analizi Yapılan Devre



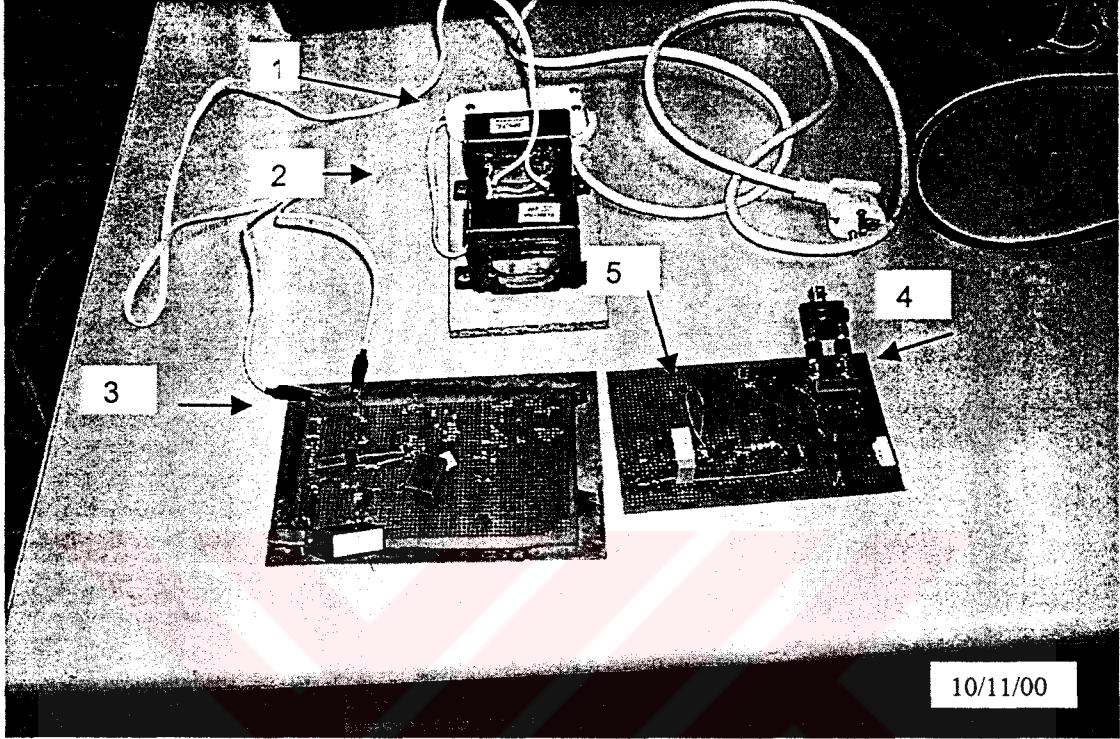
Şekil 4.2 Pspice ile Çözömlenen Devre ve Elde EdilenÇıkış Dalga Şekli

Grafikten göröüleceğı üzere hesaplanan eleman değeri, 1.2/50'lik yıldırım darbe şekline çok yakın bir sonuç vermiştir. Tepe gerilim değeri olan 11.32 kV'un %30 ve %90'ına ulaşma süreleri arasındaki farkın 1.67 katı 1.202 μ s değeri vermektedir. Devre pratikte gerçeklendiğinde çoğu zaman bu sonucu tam olarak vermez. Bu nedenle hesaplanan devrenin oluşturulması ve çalıştırılarak osiloskop çıkışının görölmesi gerekmektedir.

4.2. Model Devrenin Gerçeklenmesi

Darbe üreticinin tasarlanması ve gerçekenmesi çalışmaları boyunca izlenen yöntem, formöl kullanarak sayısal olarak devre elemanlarını yaklaşık hesaplamak, bulunan değere göre Pspice Schematic'te devrenin analizini yapıp çıkışını görmek, istenen çıkış elde edilinceye kadar program kullanılarak devre elemanları değeriğini değıştirmek ve doğru değeri kaydetmektir. Elde edilen değeri gerçeklemeden, kesin değeri olduğunu kabul etmek çoğu zaman yaklaşık doğru sonuç vermektedir. Yüksek gerilim üreticini tasarlanan

her değer için oluşturup gerçeklemek ise oldukça zaman alıcı, bunun yanında maliyetli bir yonemdir. Bu nedenle gerçeklenecek yuksek gerilim devresinin bir alçak gerilim modelini yapıp tasarım değişikliklerini bu model üzerinde deneme yolu izlenmiştir. Kullanılan model devre şekil 4.3'de verilmiştir.



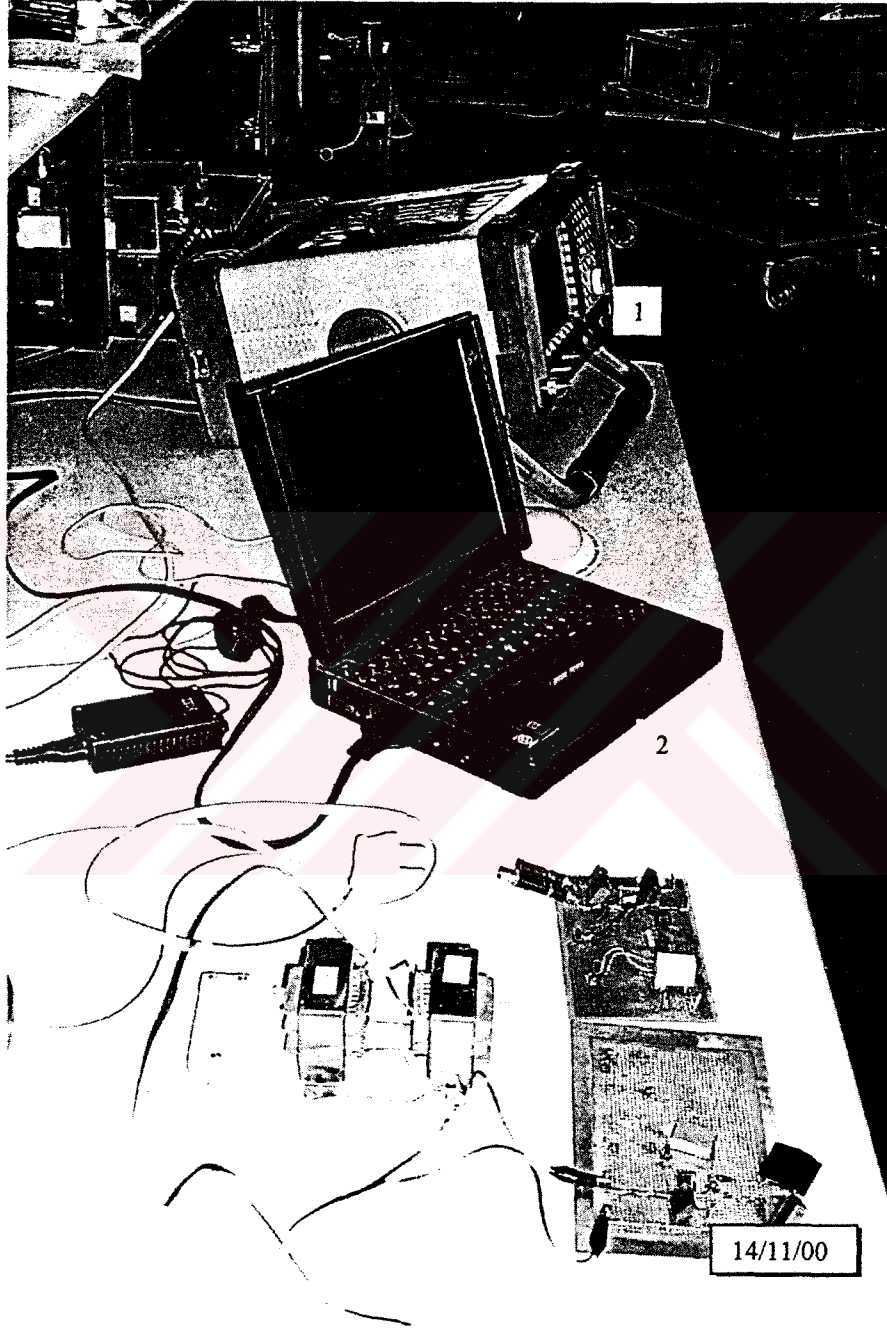
şekil 4.3 Model Devrenin Fotoğrafı

1. Gerilim ayarı için dimmer
2. Yalıtım transformatörleri
3. Devre giriş uçları
4. Devre ıkış ucu
5. Tetikleme anahtarı

Model devre, gerçeklenmesi planlanan 12 kV'luk darbe gerilimi devresi ile her bakımdan aynı eleman değerlerine sahip olmakla beraber, gerek elemanların, gerekse kaynağın gerilim düzeyi, planlananın yüzde biridir. Buna göre 20 kV seviyelerine çıkabilen kaynak yerine 220 V seviyesine kadar ayarlanabilen bir kaynak, 17.5 kV'luk kondansatör yerine 250 V'luk kondansatörler kullanılmıştır.

Devre, 220 V'luk alternatif gerilimle beslenmektedir. Birbirine ters bağlanan 25 VA'lık bir çift transformatör ile bu gerilim önce 110 V'a düşürülmekte, sonra tekrar 220 V'a yükseltilmektedir (şekil 4.3 / 2). Bu transformatör çiftinin görevi, iletimsel yalıtımı sağlamak, güvenli çalışma ortamı yaratmak ve doğrultulduktan

sonra gerilimin pozitif-negatif kutup karışmasını engelleyerek bir hataya sebebiyet vermemektir. Transformatör çiftinin çıkışına 0-220 V arası gerilim ayarı yapabilen dimmer monte edilmiştir (Şekil 4.3 / 1). Böylece devre ayarlı gerilim kaynağından beslenmiş, çıkışta alınacak darbe geriliminin tepe değeri kontrol altına alınmıştır.



Şekil 4.4 Model Devre, Simülasyon Sistemi ve Ölçme Cihazı

1. Dijital analizör
2. Simülasyon bilgisayarı

Ayarlı alternatif gerilim, bir çift krokodil yardımıyla bağlantı yapılarak devre girişine uygulanmıştır (Şekil 4.3 / 3). 250 V seviyesine kadar çalışabilen bir adet diyot ile alternatif gerilimi doğru gerilime çeviren, yarım dalga doğrultucu oluşturulmuştur. Devrenin amacı darbe gerilimi elde etmek olduğundan, devrede akacak olan akımın mümkün mertebe küçük tutulması gerekmektedir. Devrede akacak olan akımı sınırlamak, devre elemanlarını korumak ve dolma zaman sabitini belirlemek amacıyla doğrultucudan hemen sonra 20 k Ω 'luk bir öndirenç bağlanmıştır.

Devrenin bu aşamadan sonraki kısmı, Şekil 3.3'te verilen b eşdeğer devresidir. Şekilde gösterildiği üzere girişte kaynağa göre paralel konumda C_d doldurma kondansatörü bağlanmıştır. C_d için hesaplanan değer 138nF olmasına rağmen, uygulamada bu değerde kondansatör bulunamadığından 150nF'lık bir kondansatör bağlanmıştır. Kondansatör dolduktan sonra boşalması için anahtarlama, yüksek gerilim devrelerinde küresel elektrodlarla yapılmaktadır. Model devrede gerilim yüksek olmadığından küresel elektrodları kullanmak mümkün değildir. Bu nedenle modelde anahtar olarak tristör kullanılması uygun görülmüştür. Devreye seri olarak giren tristörün çalışması için gerekli olan tetikleme, bacaları arasına bağlanan, elektronik kartlarda kullanılan mekanik yapıdaki mikro anahtar ile sağlanmıştır (Şekil 4.3 / 5). Darbe şeklini belirleyen dirençlerden, sırt süresini belirleyen R_d direnci anahtardan sonra, devreye paralel olarak bağlanmıştır. Bağlanan direncin değeri hesaplandığı üzere 480 Ω 'dur. Aynı şekilde cephe süresini belirleyen 90 Ω 'luk R_a direnci tristöre seri olarak monte edilmiştir. $C_y = 4.6$ nF değerli kondansatör bulunamadığından 5 nF'lık yük kondansatörü, devre çıkışında paralel olarak bağlanmıştır. Yük kondansatörünün uçlarından osiloskop ile çıkış almak için uygun bir uç bağlantısı yapılmıştır (Şekil 4.3 / 4).

Devrenin çalışma ilkesi kısaca şöyledir:

Besleme ünitesi 220 Vac kaynağa bağlanır ve transformatörlerin çıkışında, besleme geriliminin değeri bir multimetre yardımıyla ölçülür. Besleme gerilimi devrenin giriş uçlarına bağlanır ve böylece devreye gerilim verilmiş olur. Doğrultucu diyot veya öndirenç çıkışında doğru gerilimin değeri okunur. Okunacak olan bu değer, transformatör çıkışında okunan değer $\sqrt{2}$ katıdır. Devre çıkışında istenen gerilime göre dimmer yardımıyla doğrultucu çıkışındaki doğru gerilim ayarlanır. Verimi hesaplamanın kolaylaşması açısından giriş gerilimi 100V düzeyine ayarlanmıştır. 100 voltluk gerilimle dolmakta olan C_y

kondansatörü, mikro anahtara basılarak ateşlenen tristör üzerinden devreye boşalır. Cephe direnci üzerinden dolan yük kondansatörü, cephe ve sırt dirençleri üzerinden boşalır ve böylece yük kondansatörünün uçlarında dik cepheli bir darbe gerilimi meydana gelir. Çıkışta oluşan darbe, 500 MHz'lik osiloskop yardımıyla izlenmiştir.

Devrede kullanılan elemanlar ile istenen 1.2/50 μ s'lik değere ulaşamadığı görülmüştür. Bundan sonraki aşama, istenen değeri okuyuncaya kadar bilgisayarda analiz yapmak, daha sonra da bulunan sonuçlar doğrultusunda model devredeki elemanların değerlerini değiştirmektir. İstenen değerlerden küçük sapmaların sebebi, devre elemanlarının toleransları ve gerilim altında ve farklı frekanslarda değer değiştirmeleridir.

Model devrede kullanılan dirençler, karbon dirençlerdir. Kondansatörler ise X2 tipi metal-film kondansatörlerdir.

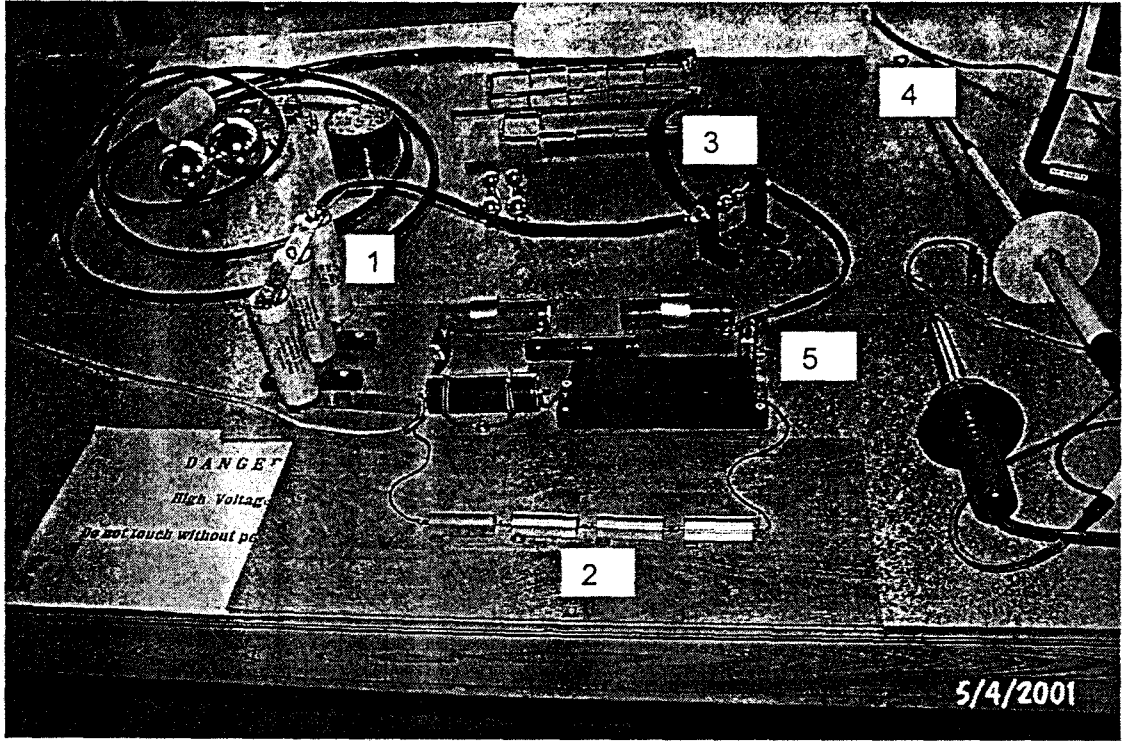
4.3 12 kV'luk Darbe Gerilimi Üreticinin Gerçeklenmesi

Model devre üzerinde yapılan çalışmalar ile saptanan eleman değerleri ile 12 kV'luk üreteç yapım aşamasına geçilmiştir. Buna göre doldurma kondansatörünün değeri 150 nF olarak belirlenmiştir. Doldurma kondansatör bloğu, üç adet 50 nF'lık kondansatörün paralel bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Bunun için yağlı tip, silindirik kondansatörler kullanılmıştır (Şekil 4.5 / 7). Kondansatörlerin giriş ve çıkış uçları kendi aralarında 2 cm eninde 1 mm kalınlığa sahip bakır plakalarla kısadevre edilmiştir. Bağlantılar vida-somun sistemi ile yapılmıştır. Kondansatörlerin herbiri 17500 Vdc gerilim seviyesine sahip olduğundan uygulanacak 12 kV'luk gerilim toleranslar dahilinde kalmaktadır. Bağlantıların bakır plakalarla yapılmasının sebebi bağlantı direncini düşürmek, kararlılığı yükseltmek ve en önemlisi raslantısal endüktans etkisini mümkün olduğunca azaltmaktır. 35 mm çapında ve 105 mm yüksekliğindeki silindirik kondansatörler yan yana ve tabana dik olarak monte edilmiştir.

Yapılan hesaplar ve model devredeki denemeler sonucunda yük kondansatörü için 4.7 nF'lık kondansatörün uygun geleceği saptanmıştır. Bunun için katı yalıtkanlardan oluşan, 30 kVdc gerilim seviyesine sahip, dikdörtgenler prizması şeklinde 140 x 45 x 40 mm boyutlarında bir kondansatör kullanılmıştır (Şekil 4.6 / 8).

Cephe ve sırt sürelerini belirleyen dirençler için model devreden belirlenen değerler sırasıyla 90 Ω ve 600 Ω 'dur. Devrede kararlılığı sağlamak amacıyla belirlenen direnç değerleri, mümkün olduğunca az eleman kullanılarak gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Kullanılan dirençler, boru tipi seramik dirençlerdir ve geçebilecek sürekli yüksek akımlarda ısınma problemi ile karşılaşmamak için 100 W güç değerinde seçilmiştir. Dirençler arasındaki bağlantı, uçlardaki bağlantı noktalarında vida-somun sistemi ile yapılmıştır.

Devrede anahtar olarak kullanılan küresel elektrot sistemi, 15.6 mm çaplı, çelikten yapılmış bir çift küreden oluşmaktadır. Küreler, PVC'den yapılmış, aralarında 60 mm aralık bulunan ve elektrot eksenini, monte edildikleri zeminden 57 mm yüksekte tutabilen ayaklara bağlanmıştır (Şekil 4.6 / 4). Bağlantı için elektrotların içine girebilen vidalar kullanılmıştır. Elektrot açıklıkları, elektrotlarla yalıtkan ayaklar arasına konulan pul sayısının değiştirilmesiyle ayarlanmaktadır. Buna göre, kalınlığı 1 mm olan iletken pullardan bir tane eklemek veya çıkarmak, elektrod açıklığını 1 mm arttırmakta veya azaltmaktadır. Bu sistem kullanılarak elektrod açıklığı 0-10 mm aralığında değiştirilebilmektedir. Elektrodlar arası mesafe, kompas kullanılarak ölçülmektedir. Küre seçiminde dikkat edilen bir konu, korona boşalması meydana getirmemek ve atlama kararlılığı için uygun çaplı küreler kullanmaktır. Seçilen küre çapları, bu bakımdan 12 kV'luk sistem için uygundur. Küreler yatay pozisyonda yerleştirilmiştir.



Şekil 4.5 Gerçeklenen Yüksek Gerilim Darbe Generatörünün İlkel Hali

1. Üreteç temel devresi
2. Yük dirençleri
3. Küresel elektrotlar
4. Topraklama çubuğu
5. Yüksek gerilim probu

Devrede akan akımı sınırlamak için kullanılan öndirenç için 300 k Ω değeri belirlenmiştir. Bu değer seri ve paralel bağlı dirençlerden oluşan bir blok yardımıyla sağlanmıştır. Ahşap yapıda iki katlı olarak hazırlanan kaide üzerine, herbir kata 11 adet direnç bağlanmıştır. Katlardaki dirençler birbirlerine seri, katlar arasında ise paralel bağlı durumdadırlar. Seri bağlama direnç değerini yükseltirken, paralel bağlama ile taşınabilecek akım değeri, dolayısıyla güç arttırılmıştır (Şekil 4.6 / 3).

Darbe üretici girişinden ayarlı dc gerilim verebilen bir kaynak tarafından beslenmiştir (Şekil 4.6 / 1). Kaynak, ayarlı transformatör yardımıyla gerilimi yükselten bir ünite ile doğrultucu katından oluşmuştur. Kaynağın pozitif ucu canlı uç, negatif ucu ise toprak olarak uygulanmıştır. Devresinde sigorta dışında, asıl ve yedek olmak üzere çift koruma vardır. Akım algılayıcı, ayarlı olduğu düzey üstündeki akımlarda ve 25 kV'un üzerindeki gerilimlerde devreyi

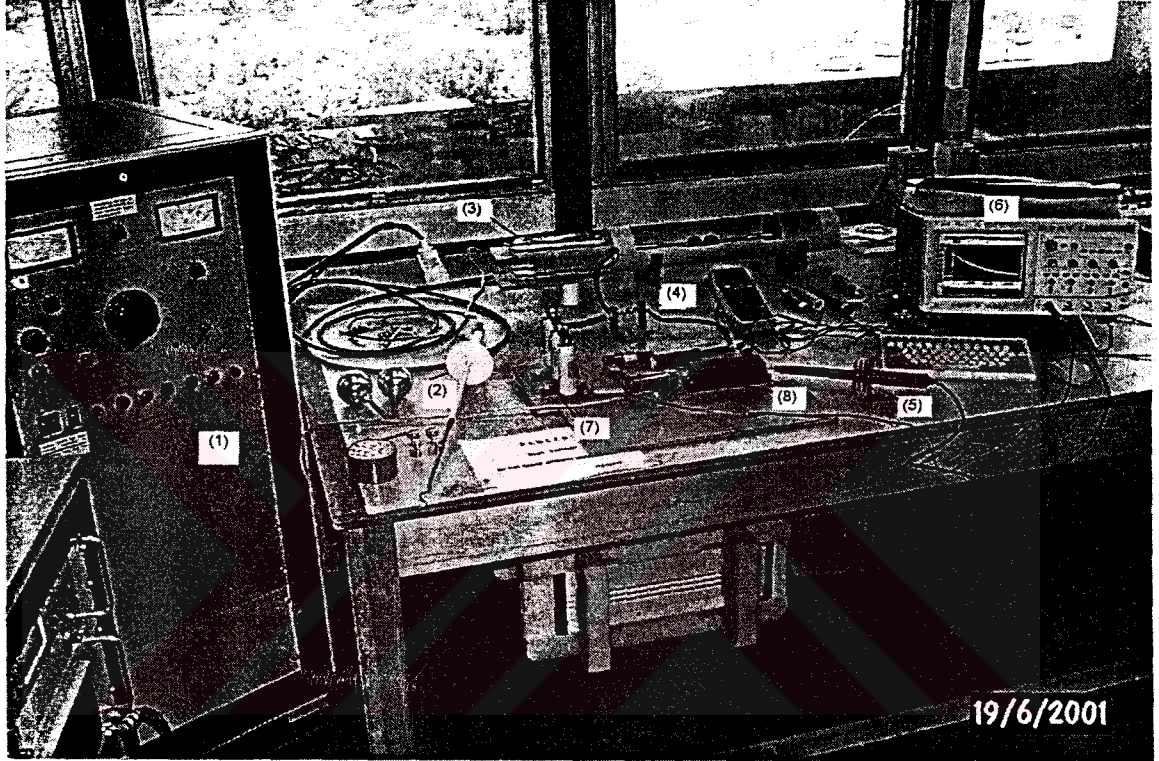
kesecek açma özelliğine sahiptir. Mobil yapıya sahip kaynak, oluşturulan üretcin de taşınabilir olmasını sağlamıştır. Kaynağın en belirgin teknik özelliklerini sıralarsak,

Giriş : 220 V, 50 Hz, 15 A

Çıkış : 25 kV, dc, 100 mA

Kutbiyet : Değişken

Dalgallılık : 2% rms



Şekil 4.6 Devrenin Hazırlandığı Masa (dc gerilim kaynağı ile beraber)

1. dc gerilim kaynağı
2. Topraklama çubuğu
3. Ön direnç
4. Küresel elektrodlar
5. Yüksek gerilim probu
6. Osiloskop
7. Doldurma kondansatörü
8. Yük kondansatörü

4.4 Tasarımda Dikkat Edilmesi Gereken Noktalar

Daha önceki bölümlerde de söz edildiği gibi, çoğu zaman sayısal olarak veya bilgisayar yardımıyla hesaplanan devre elemanları, pratikte oluşturulan devrede istenen çıkışı veremez. Bunun ilk sebebi elemanların hesaplamalarda düşünüldüğü gibi her durumda ideal davranmamasıdır. Seçilecek elemanların, devrenin çalışma koşullarında verecekleri cevaplar önceden kestirilmeli veya denenmelidir. Buna göre gerçekleşen devre, oda koşulları referans alınarak tasarlanmıştır. Anahtar eleman olarak kullanılan küresel elektrodların farklı nem, sıcaklık ve basınç durumlarında, atlama gerilimlerinin değişeceği gözönüne alınmalıdır. Oda koşullarına göre tasarlanan elektrotların farklı hava koşullarında ilgili düzeltme katsayıları ve eşitlikleri kullanılarak çalışma değerleri belirlenmelidir.

Kullanılan diğer devre elemanlarının, yüksek gerilim ve frekanslarda cevapları da hesaba katılmalıdır. Özellikle kondansatörler, farklı frekanslarda ve farklı yüklerde toleranslar dahilinde sapmalar gösterebilir. Bu aşamada elemanların tolerans değerleri önem kazanır. Kondansatörlerin ve dirençlerin sınır değerlerde çalışmaları durumunda çıkışta alınacak dalga şekilleri değişiklik gösterebilir. Bu durum doğrultusunda devre tasarlanırken, elemanların farklı birleşimlerinde çalışma durumlarına karşılık gelen dalga şekilleri denenerek seçim yapılmıştır.

Yüksek gerilim çalışması yapılırken şüphesiz en önemli konu güvenliğin sağlanmasıdır. Hazırlanan tez çalışmanın ilk aşamasından son aşamasına kadar, her türlü tehlike önlemi alınarak hareket edilmiştir. Devre elemanları, en az yeri kaplayacak şekilde, ama aralarında güvenlik açıklıkları bırakılarak monte edilmiştir. Montaj esnasında, yüksek gerilim altındaki yalıtkan PVC ayaklara oturtulmuş, bütün sistem ise ahşap plaka üzerine yerleştirilmiştir. Çalışma alanına gerekli uyarı işaret ve yazıları asılmış, bölge mümkün olduğunca kontrol altında tutulmuştur.

Yüksek gerilim sistemlerinde önemli bir konu, topraklamadır. Daha önce sözü edildiği gibi kaynağın negatif ucu olarak toprak seviyesi kullanılmıştır. Kaynak kasası, 6 mm çaplı standart topraklama kablosuyla laboratuvar topraklama barasına bağlanmıştır. Tüm laboratuvarı dolaşan toprak barası, toprağa geçiş direnci 0.75Ω olan topraklama plakasıyla sonlandırılmıştır. Gerçeklenen devrede alınan güvenlik önlemlerinden bir tanesi de, kondansatörlerin tam

boşalmamasından kaynaklanabilecek yüksek gerilim tehlikesine yöneliktir. Bu amaçla harici koruma topraklaması yapabilecek iletken çubuk hazırlanmıştır (Şekil 4.6 / 2). 75 cm uzunluğunda, 6.9 mm çapa sahip bakır çubuğun tutacak çevresine kauçuk geçirip, 30 mm çaplı plastik koruma kılıfına konularak hazırlanan bu alet, üreticin çalıştırılmasından sonra kondansatör uçlarına değiştirilerek harici boşaltmayı sağlama işlevini görmüştür. Yalıtım amacıyla çubuktaki boşluklar silikon ile doldurulmuştur. Çubuk, tutacak kısmından topraklama kablosu ile toprak barasına bağlanmıştır.

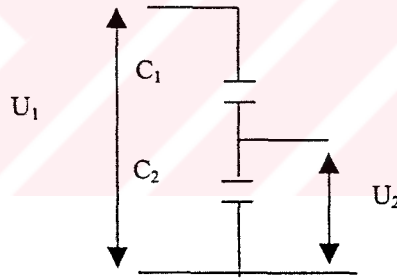
Üreticin çıkışında alınan darbe şeklinin mümkün mertebe salınımsız olması gereklidir. Elde edilen dalga şeklindeki osilasyonların başlıca sebebi endüktanstır. Devrede istem dışı endüktans, kaynaktan veya yükten oluşabilir. Devre endüktansın varlığıyla analiz edilirse, endüktanstan gelen üstel terimin salınımına sebep olduğu görülebilir. Meydana gelen salınımlar dalga şeklinin değişmesinin yanı sıra cephe süresinin uzamasına sebep olur. Dalga şeklinde meydana gelecek salınım genliği ve frekansı IEC 60-1 standardınca sınırlanmıştır. Devrede endüktif etki yaratan faktörlerin en önemlisi bağlantı elemanlarıdır. Devre elemanları arasında yapılan uzun bağlantılar, kablolarda meydana gelen bükülmeler sonucu endüktans gibi davranır. Bu bilgi doğrultusunda, gerçekleştirilen üreteç devresinde bağlantılar mümkün mertebe kablo kullanılmadan yapılmıştır. Kondansatörlerin kendi aralarında ve dirençlerle aralarındaki bağlantılar, bakır şerit plakalarla yapılmıştır. Dirençlerin kendi aralarındaki bağlantı ise ek bir eleman kullanmadan, uçlarındaki kulakçıkları vida-somun sistemi ile tutturarak gerçekleştirilmiştir. Bir bağlantı elemanının gerekli olduğu yerlerde (kaynak-küre-devre arası) kablo yerine örgülü esnek bakır bara kullanılmıştır. Bağlantılar kısa ve bükümsüz yapılmıştır. Endüktif etkinin bir başka kaynağı devredeki dirençlerdir. Tel sararak oluşturulmuş dirençler saf omik değil, bir miktar endüktif etki de gösterir. Bu sorunu aşmak için devrede kullanılacak dirençler, direnç telinden, helezonik sargı yerine tam tur tamamlamadan bifiler şekilde sarılabilir.

Yapılacak bağlantıların yeterince sıkı olması, atlama riskini ve ek bağlantı direncini düşürür [12].

4.5 Ölçme Sistemi

Tasarlanan ve gerçekleştirilen devrede farklı ölçme sistemleri kullanmak mümkündür. Girişte kaynak olarak kullanılan dc gerilim kaynağı, bir voltmetre ve bir ampermetreye sahiptir. Voltmetre kullanılarak üç farklı aralıkta ölçme yapılabilir. Buna göre düşük skala 0-5 kV, orta skala 0-10 kV ve yüksek skala 0-25 kV ölçme sınır değerlerine sahiptir. Kaynağın voltmetresinin ölçüm değerleri, daha yüksek duyarlılığa sahip bir multimetre ve yüksek gerilim probu kullanılarak doğrulanmıştır. Bu sistem giriş gerilimini ölçmede kullanılmıştır. Kaynağın üzerinde bulunan ampermetre ise, kaynak çıkışındaki akımı mA cinsinden ölçmektedir. Ampermetrenin göstergesi düşük skalada 0-25 mA, orta skalada 0-50 mA ve yüksek skalada 0-100 mA sınır değerleri arasında ölçme yapabilmektedir.

Üretcin çıkışında elde edilen darbe gerilimini ölçmenin farklı yöntemleri vardır. Devre gerçekleştirildikten sonra ilk tercih edilen yöntem, kapasitif gerilim bölücü yardımıyla darbe gerilimi ölçmesidir. Bu yöntemin ilkesi (4.7 – 4.8) numaralı formülle ve 4.7 numaralı şekille verilmiştir.



Şekil 4.7 Kapasitif Gerilim Bölücü İle Ölçme

$$U_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot U_2 \quad (4.7)$$

$$\ddot{u} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (4.8)$$

Bu çevirme oranı bağıntısına göre, üretcin çıkışındaki yük kondansatörüne seri olarak 1µF'lık ölçme kondansatörü bağlanmıştır. Elde edilen çevirme oranı

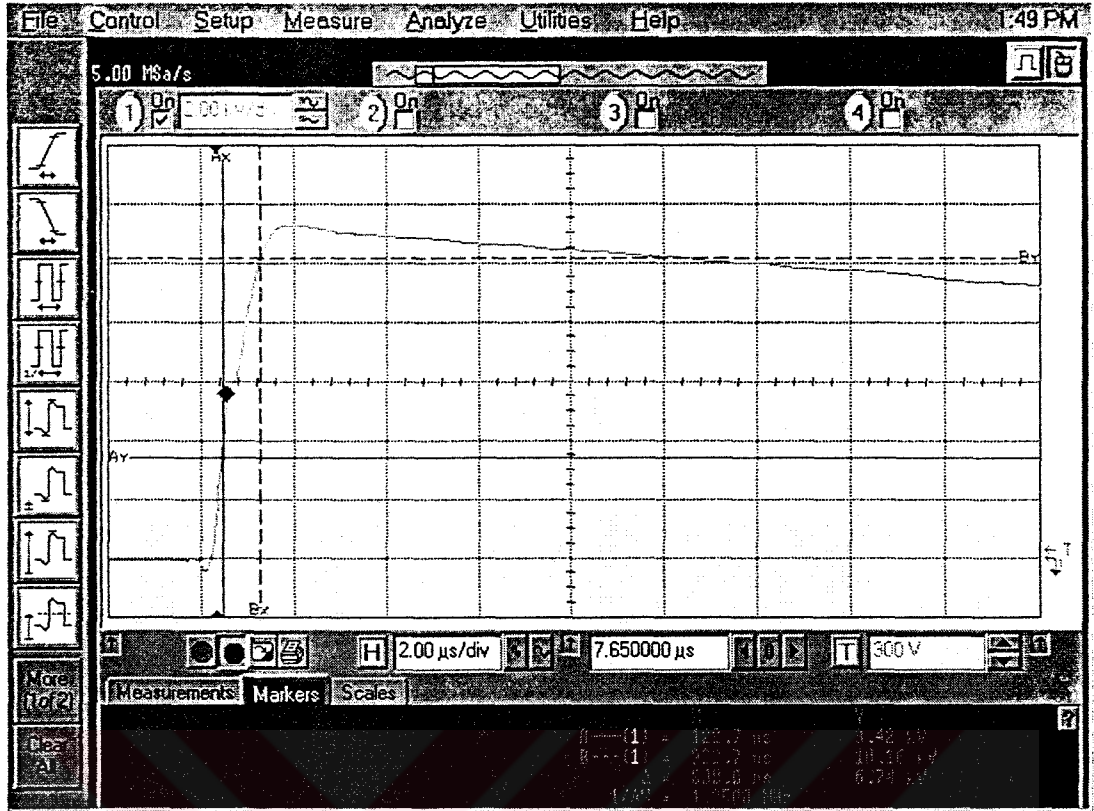
$$\ddot{u} = \frac{1000nF}{5nF} = \frac{U_1}{U_2} = 200 \quad (4.9)$$

olmuştur. Çıkış dalga şekli HP 54615B 500 MHz'lik osiloskop ile gözlenmiştir. Osiloskop ölçme kondansatörü uçlarına bağlanmış, okunan genlik değerinin 200 katı, çıkışta alınan gerçek değeri vermiştir.

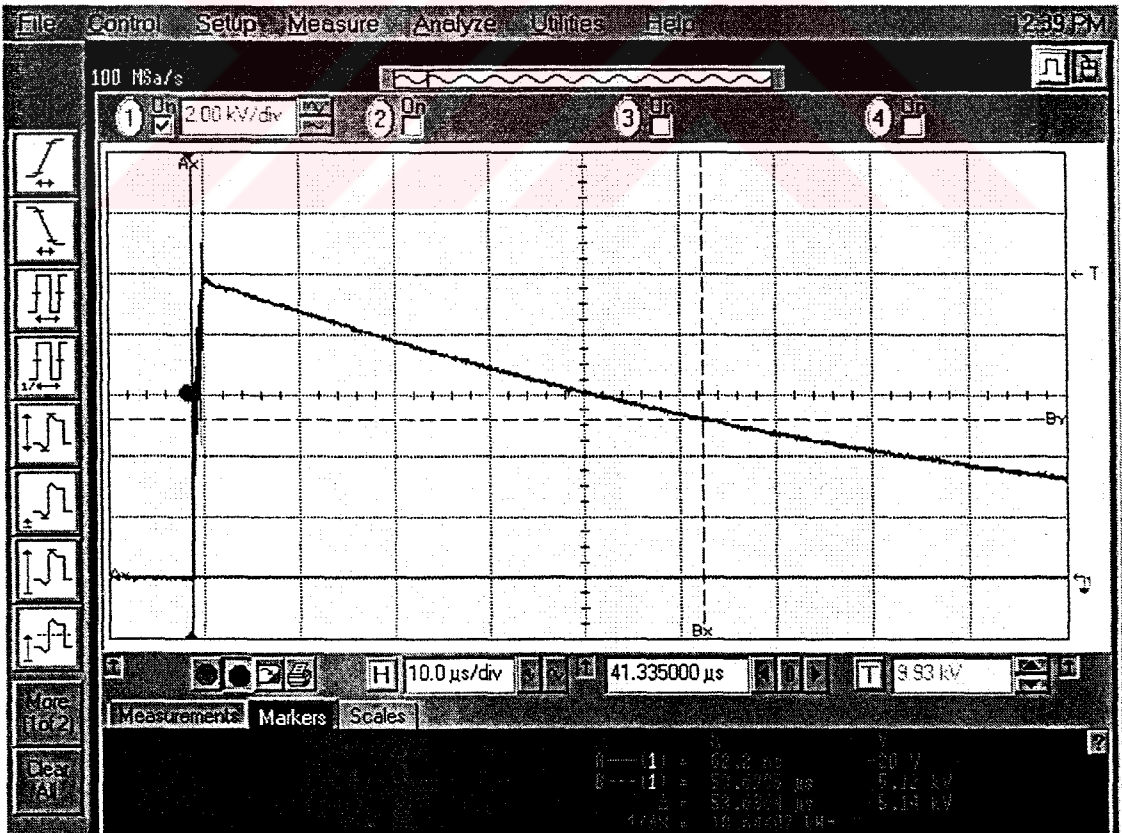
Ölçmede kullanılan diğer bir yöntem, gerilim bölücüye gerek kalmadan, doğrudan yüksek gerilim probu ile gerilimi ölçmektir. Bu amaçla kullanılan HP 34111A yüksek gerilim probu, 1000 : 1 çevirme oranına sahiptir (Şekil 4.6 / 5). Prob doğrudan yük kondansatörünün uçlarına takılmakta, çıkış ise osiloskoptan izlenmektedir (Şekil 4.6 / 6). Her iki ölçüm yöntemiyle ölçülen değerler aynı bulunmuştur [13].

4.6 Darbe Üretici Çıkış Dalga Şekli

3 numaralı bölüm genelinde anlatılanlar doğrultusunda gerçekleşmiş olan yıldırım darbe gerilimi üretici çıkışı, 1.2 / 50 µs 'lik standart dalga şekline sahiptir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9, gerçekleşen darbe gerilimi üretcinin çıkış dalga şekillerini göstermektedir. 4.8 numaralı şekilde, üretcin oluşturduğu dalga şeklinde cephe süresi gösterilmektedir. Gerilimin tepe değerinin %30 ve %90 'nının meydana geldiği anlar arasındaki süre 800 ns olarak görülmektedir. Anma cephe süresi, bu sürenin 1.67 katıdır ki, 800ns x 1.67 = 1.3 µs olarak hesaplanabilir. Standart darbe gerilimi anma cephe süresinden yaklaşık 0.1 µs sapma vardır ve bu sapma toleranslar dahilindedir. Şekil 4.9'de darbenin sırt yarıdeğer süresi gösterilmiştir. Dalga şeklinin altında verilen ölçüm sonucunda bu sürenin 53 µs olduğu görülmektedir. Standart darbeden 3 µs'lik sapma da toleranslar dahilindedir. Devrenin verimi, yaklaşık olarak %91'dir.



Şekil 4.8 Gerçeklenen Üretecın Çıkış Dalga Şekli (Yükselme zamanı)



Şekil 4.9 Gerçeklenen Üretecın Çıkış Dalga Şekli (Sırt yarıdeğer süresi)

5. DEVRENİN EMU AÇISINDAN İNCELENMESİ

5.1 EMU

Gelişen teknoloji, beraberinde kirliliği de getirmiştir. Elektronik cihazların sayısının artması, özellikle elektromagnetik etkileşimlerin rahatsız edici boyutlara ulaşmasına neden olmuştur. Bir ortamdaki cihazların, birbirlerini rahatsız edici, doğru ve düzgün çalışmasını engelleyici yöndeki istenmeyen etkisine EMI (electromagnetic interference), elektromagnetik girişim denir. EMS (electromagnetic susceptibility), elektromagnetik alınganlık ise, aynı ortamdaki cihazların birbirlerinden etkilenerek çalışamaz hale gelmesi, veya performans kaybetmesi olarak tanımlanır. Bu doğrultuda elektromagnetik uyumluluğu tanımlamak gerekirse, bir elektronik cihaz ortamında, cihazların yüksek alınganlık göstermeden ve yüksek girişime sebep olmadan, kısaca güvenlik ve performans sınırları içinde birbirlerini elektromagnetik olarak etkilemeden ve birbirlerinden etkilenmeden doğru ve düzgün çalışması EMC (electromagnetin compatibility) elektromagnetik uyumluluk olarak adlandırılır.

Elektromagnetik etkileşim, iletkenlik veya ışıma yoluyla meydana gelebilir. 30 MHz'in üstündeki frekanslarda emisyonlar ışıma yoluyla oluşur. Elektromagnetik uyumluluğu sağlamak için bu etkileşimin ortadan kaldırılması gerekir. Etkileşimi azaltmak için alınacak önlemler girişime sebep olan ve alınganlık gösteren sistemler için farklıdır. Genel olarak EMU iyileştirme çalışmaları tasarım evresinde yapılırsa daha yüksek başarı elde edilir. İyileştirme amaçlı olarak ekranlama, topraklama, filtreleme ve bağlama yapılabilir [14, 15].

5.2 EMU Deneyleri

5.1 numaralı bölümde anlatılanlar doğrultusunda, cihazların EMU açısından çeşitli deneyleri vardır. Deneyler iletkenlik yoluyla girişim ve ışıma yoluyla girişim olarak iki ana kategoride gruplandırılır. Bu kategorilerin herbiri de kendi içinde alınganlık ve emisyon deneyi sınıflarına sahiptir. Genel olarak emisyon deneyleri, iletkenlik yolu için prob, ışıma yolu için anten kullanılarak yapılır.

Deney altındaki cihazın kendisine veya kablolarına takılan prob veya anten ile, cihazın yaydığı emisyon bir alıcı tarafından belirlenir. Alınganlık deneylerinde bu işlemin tersi yapılır. Bu kez prob veya anten alıcı amaçlı değil, bir üreticinin vasıtasıyla işaret uygulama amaçlı kullanılır. Gerek alınganlık deneylerinde, gerekse emisyon deneylerinde uygulanacak işaret seviyeleri, kullanılabilecek cihazların özellikleri, kabul edilebilir emisyon seviyeleri sivil ve askeri standartlarda belirtilmiştir [14, 15, 16].

5.3 Darbe Üreticisine Uygulanan RE (Işıma yoluyla emisyon) Deneyi

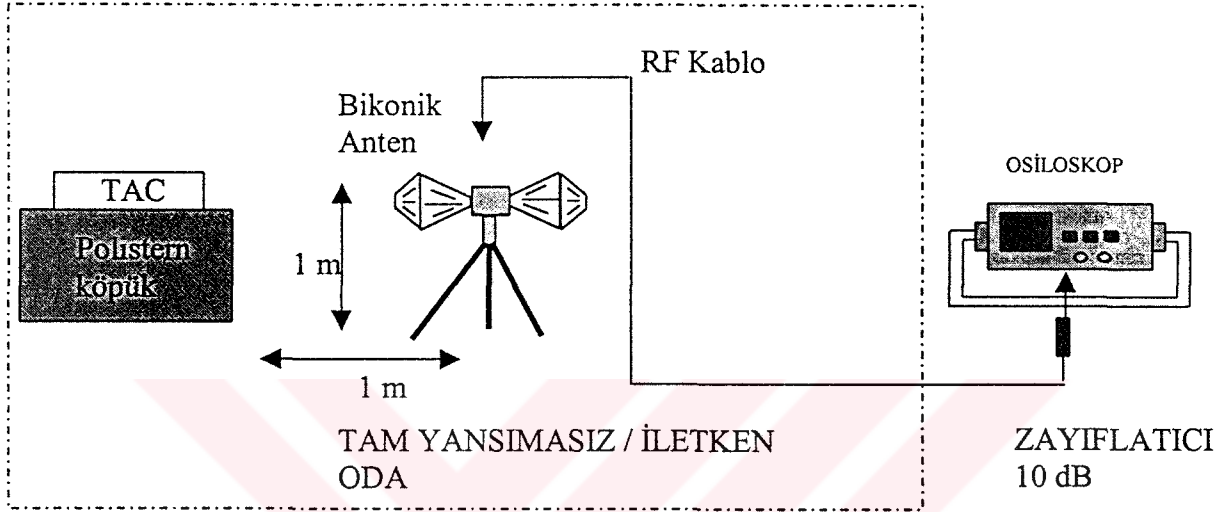
Bu anlatılanlar doğrultusunda, gerçekleşmiş olan darbe üretici bir girişim deneyine, daha doğrusu emisyon deneyine tabi tutulmuştur. Deney uygulanırken amaç standart dahilinde emisyon değerlendirme değil, üreticinin elektromagnetik ortam etkisini izlemek, bir başka ifadeyle ortamda oluşturduğu kirliliğin seviyesini belirlemedir. Uygulanan deney, TÜBİTAK-UEKAE EMC/TEMPEST Deney Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. EMC deneyleri için farklı deney ortamları vardır. Deneyler Tam Yansız Oda (Full Anechoic Chamber), GTEM Hücresi, Açık Saha Deney Ortamı (OATS), İletken Oda'da gerçekleştirilebilir. Sonuçları değerlendirmede uygunluk açısından üretilen uygulanan deney için Tam Yansız Oda ve İletken Oda deney ortamları kullanılmıştır. Deneyte kullanılan cihaz listesi ve deney düzeneği Tablo 5.1 ve Şekil 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Kullanılan Cihazlar

Cihaz Adı	Marka	Model
Bikonik Anten	Schwarzbeck	VHBA 9123
Osiloskop	Agilent-Infiniium	1Ghz, 4 Gsa/s
RF Zayıflatıcı	Huber-Suhner	10 dB
RF Kablo	Huber-Suhner	2 x 5 m
Polistren Köpük	—	—

Deneyde kullanılan cihazlardan, alıcı görevindeki bikonik anten yatay polarizasyona alınmıştır. Osiloskop, 1GHz frekans sınırına, 4 Gsa/s örnekleme yeteneğine sahiptir. Bu özelliklerle cihaz daha geniş bir bantı taramakta ve daha çok veri toplayarak gerçeğe en yakın sonuçları vermektedir. Osiloskop Windows işletim sistemi ortamında çalışmaktadır (Şekil 4.6 / 6). Ölçüm sonucu elde edilen veri ve grafikleri belleğinde tutma, grafiklere nokta analizi uygulama

ve değerlerin FFT'sini alma olanakları vardır. Zayıflatıcı, ölçüm alırken oluşabilecek yüksek seviyeli işaretleri zayıflatma, bu şekilde osiloskobu koruma amacıyla monte edilmiştir. Kullanılan kablo, dışı ekranlı RF kablosudur. Listede adı geçen polistern köpük, deney altındaki cihazı üzerine koymak için, yalıtkan bir kaide olarak kullanılmıştır [16, 17].



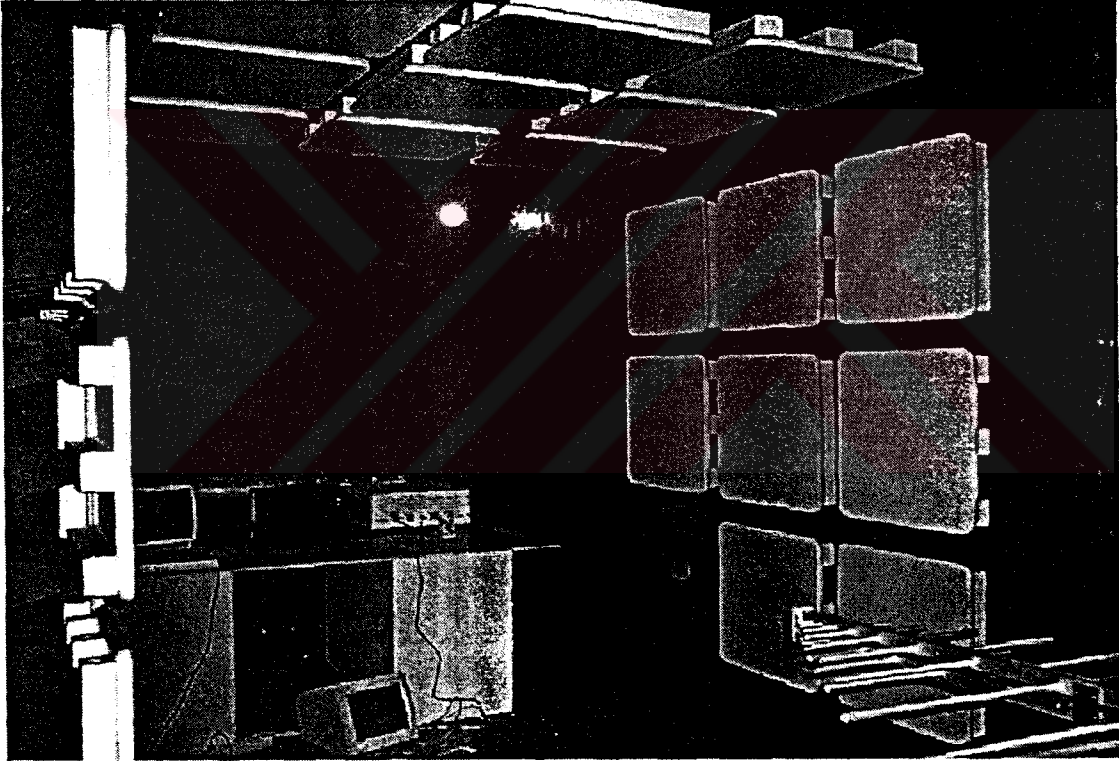
Şekil 5.1 EMI Ölçüm Düzeneği

Yapılan deneyler aynı yöntemle göre uygulanmakla beraber, sadece deney ortamı değiştirilmiştir. Buna göre Şekil 5.1'de verilen deney düzeneği Tam Yansımaz Oda'da kurulmuştur. Üretcin kendisi oda içine alınmış, devre 1 m yüksekliğindeki köpük üzerine, boşalma elektrotları anten tarafına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Dc kaynak, oda dışındaki enerji panelinden 220 V ac ile beslenmiştir. Oda içinde, devreden 1 m uzağa ve devreyle eşit yüksekliğe sahip (1m) bikonik antenler yatay polarizasyon sağlayacak şekilde konumlandırılmıştır. Anten çıkışından alınan 5 m uzunluğundaki RF kablo, oda çıkış paneline bağlanmıştır. Oda çıkış panelinin oda dışındaki tarafından RF kablo ile çıkış alınmış, bu kablo 10 dB zayıflatıcı üzerinden osiloskoba bağlanmıştır. Böylece kurulan sistemle devrenin kaynağı ve osiloskop, oda dışındaki masa üzerinden kontrol edilmiştir.

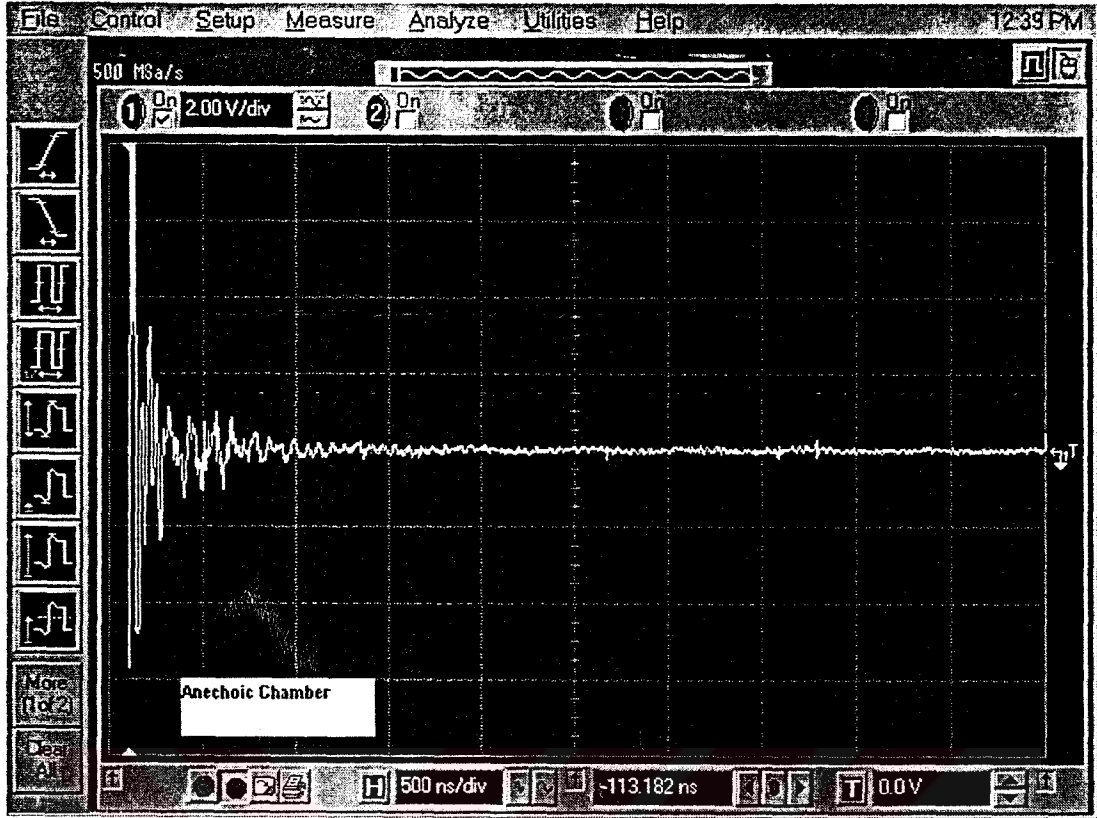
Tam yansımaz oda, metal duvarlara sahip, ekranlı bir odadır. Odanın içi, RF çıkışını engelleyen ferit karolarla döşenmiştir. Etkin olduğu frekans değerini arttırmak için duvarlara komposit yutucular monte edilmiştir. Bu şekilde oda

içinde deney yapılırken, dış ortama hiçbir etkide bulunulmazken, dış ortamdaki alanlardan da deney sistemi etkilenmez. Deney altındaki cihazın emisyonu, duvar veya yerden yansıma olmadığı için doğrudan anten tarafından algılanır.

Deney düzeneği hazırlandıktan sonra odanın kapısı kapatılmış, kaynağa enerji verilmiştir. Osiloskop tek darbe yakalayacak şekilde ayarlanmış ve kaynak gerilimi yavaş yavaş yükseltilmiştir. Kürelerin ayarlanmış olduğu aralığa göre, 15 kV'ta atlama meydana gelmiş ve anten bu atlama sırasında ortaya çıkan elektromagnetik kirliliği, yani emisyonu yakalamıştır. Osiloskop ekranında görülen boşalmanın oluşturduğu alan, 8 V/m'dir. Araya konulan 10 dB'lik zayıflatıcıyı da hesaba katarsak, 3.16 kat zayıflatma sağlandığından $3.16 \times 8 = 25.3$ V/m'lik bir elektrik alan oluşmuştur. Elde edilen girişimin dalga şekli Şekil 5.3'te verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi dalganın yansıması yoktur.



Şekil 5.2 Tam Yansısız Odanın İçten Görünüşü



Şekil 5.3 Tam Yansısız Odada Alınan EM Girişim Dalga Şekli

Devreye uygulanan ikinci emisyon deneyi için, tam yansımali iletken ortam kullanılmıştır. İletken oda, duvarları bakır özlü boya ile boyanmış, ekranlı olduğu için dış ortamdan yalıtılmış bir odadır. Bu odada deney düzeneği daha önceki ile aynı şekilde kurulmuş, farklı olarak devre yalıtkan köpük üzerine değil, yerden 1 m yüksekliğe sahip bakır düzlem masa üzerine monte edilmiştir. Deney gerçekleştirildiğinde alınan sonuç, Şekil 5.4'te verilmiştir. Burada görüldüğü gibi beklenen olmuş, boşalma anında oluşan elektromagnetik dalga, oda duvarlarını kullanarak belirli bir periyota sahip yansıma özelliği göstermiştir. Verilen 18 kV'luk giriş gerilimine karşın okunan elektrik alan şiddeti, 32 V/m olmuştur.

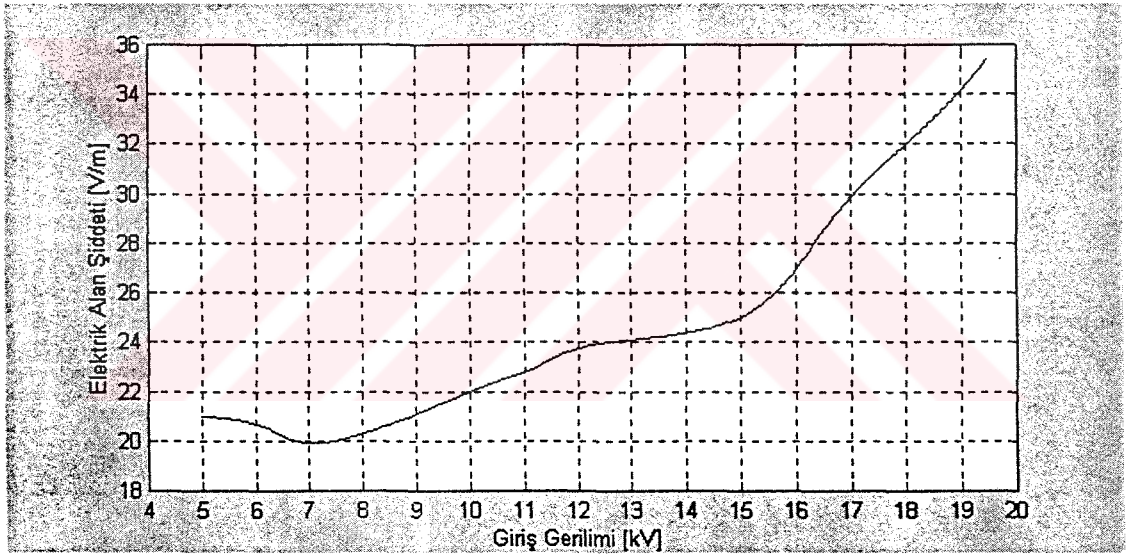


Şekil 5.4 İletken Odada Yapılan RE Deneyi Çıkış Dalga Şekli

Devrenin oluşturduğu elektromagnetik kirliliğin analizi, ortamdaki yalıtılmış “İletken oda” ve “Tam yansız oda”da elde edilen sonuçlarla yapılmıştır. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 genel olarak devrenin içinde bulunduğu ortamdaki yansıtıcı cisimlerin veya yutucu cisimlerin fazla olması durumlarında meydana gelebilecek etkileşim miktarı ile ilgili fikir vermektedir. Devrenin normal bir laboratuvar ortamında çalışması sonucu oluşturacağı kirlilik, farklı genlikte giriş gerilimlerine karşı alınan çıkış alan şiddetlerinin karşılaştırılması yapılarak incelenmiştir. Bu incelemede elde edilen veriler, Tablo 5.2 ve Şekil 5.5’te verilmiştir. İnceleme sonucunda edinilen fikir, devrenin çalışma geriliminin yükselmesi, çevreye verilen elektromagnetik kirlilik miktarını arttırmaktadır. Alan şiddetindeki artış lineer olmamakla birlikte giriş gerilimi ile doğru orantılıdır.

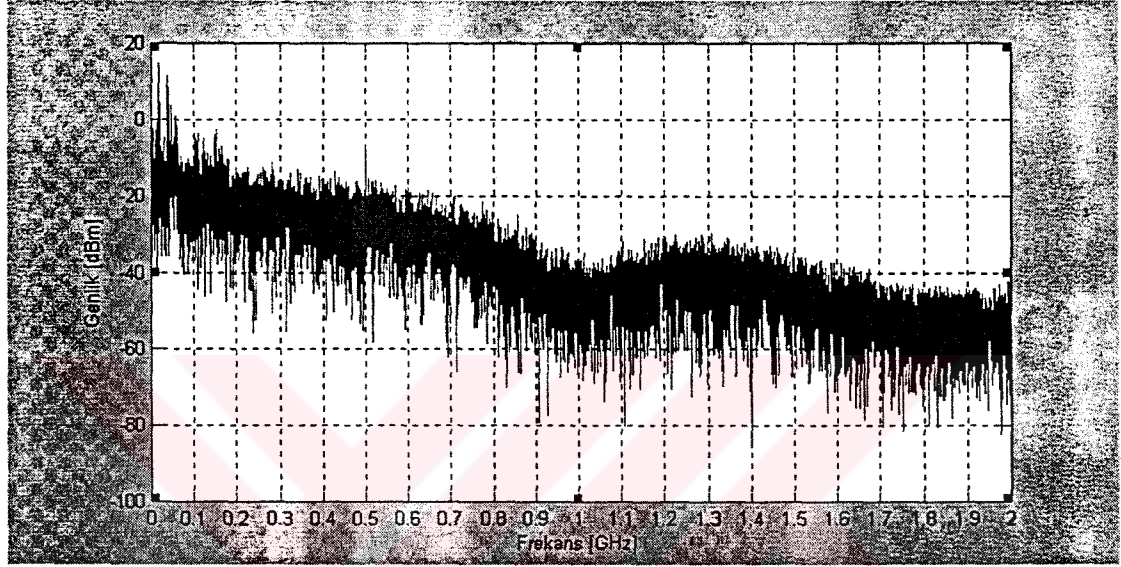
Tablo 5.2 Devrenin Oluşturduğu Elektrik Alan Şiddeti Verileri

Devre Giriş Gerilimi [kV]	Ortama Yayılan Elektrik Alan [V/m]
5	21
7.5	20
10	22
12.5	24
15	25
18	32



Şekil 5.5 Giriş Gerilimine Göre Devrenin Oluşturduğu Alan Şiddeti

Zaman bölgesinde çıkış alan şiddetleri incelenen geçici işaretler, daha sonra frekans bölgesinde analiz edilmiştir. Elde edilen zaman bölgesi verilerinin, MATLAB hazır programı kullanılarak FFT'si alınmış ve frekans-genlik eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğrilere bir örnek Şekil 5.6'da verilmiştir. 18 kV'luk giriş gerilimi sonucunda alınan girişim işaretinin frekans bölgesindeki cevabı, 2 GHz'e kadar frekans aralığında görülmektedir. En büyük genlikli bileşen 18 MHz'de oluşmuştur.



Şekil 5.6 18 kV'luk Giriş Gerilimi İçin Elektromagnetik Girişimin Frekans Analizi

5.4 Sonuç

Her iki deney ortak olarak, devrenin çevreye büyük boyutta elektromagnetik kirlilik yaydığını göstermiştir. Alınan çıkış alan şekillerinde görünen önemli nokta, boşalma işleminin oluşturduğu her bir darbenin yaklaşık 20-30 ns'lik ömre sahip olmasıdır. Bu da yaklaşık olarak birkaç nanosaniyelik yükselme zamanına karşılık gelir. Dikkat edilen bir diğer nokta ise yansımali odada oluşturulan artçı yansımaların, 500 ns'lik periyoda, yani 2 MHz'lik frekansa sahip olmasıdır. Devre yapısı incelendiğinde elektromagnetik girişime sebep olan tek elemanın küresel elektrotlar olduğu anlaşılmaktadır. Sistemin oluşturduğu kirliliğe önlem olarak izlenebilecek yöntem, ekranlama yapmaktır. Elektrot çiftini iletken bir ortam içine monte etmek, tehlikeli boşalmalara da sebebiyet vermemek ve anahtarlamaı sağlamak için kılıf ile elektrodlar arasına bir dielektrik koymak, uygulanabilecek en doğru yol olacaktır.

6. ELEKTROMAGNETİK DARBE

6.1 Giriş

Teknolojideki ilerlemeler insan rahatlığını arttırmış, birçok konuda hayatı kolaylaştırmıştır. Ne yazık ki teknolojideki hızlı ilerleme her zaman iyi amaçlara yönelik kullanılmamış, bu sebeple beraberinde felaketleri de getirmiştir. Dünya ülkelerinin rekabeti, savaş teknolojilerinin de büyük bir hızla ilerlemesini sağlamıştır. Bu doğrultuda XX. yüzyılın ortalarında, gelecek savaşları için nükleer silahlar üzerindeki ilgi artmıştır. Elektromagnetik darbe, daha önceki bölümde de değinildiği gibi, yüksek güçlü sistemler veya olaylar sonucunda oluşur. En yaygın olarak bilinen elektromagnetik darbe oluşumu, yıldırım düşmesi sonucunda meydana gelir. Bu darbe doğal bir etkide bulunur. Günümüzde bu doğal darbe, nükleer patlayıcılar kullanarak oluşturulabilmekte, tahrip edici etkisi ise hedef üzerine yönlendirilebilmektedir. Savaş teknolojilerinde böyle bir olgunun varlığı, buna karşı savunma sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu nedenle gerek yıldırım gibi doğal yollarla, gerek nükleer patlayıcılarla yapay olarak oluşturulan elektromagnetik darbeler, laboratuvar koşullarında incelenmek üzere üretilir [18].

6.2 EMP Nedir?

EMP en temel anlamda doğal veya yapay olarak oluşturulan, tahrip edici ve elektromagnetik etkisi bulunan bir darbedir [19].

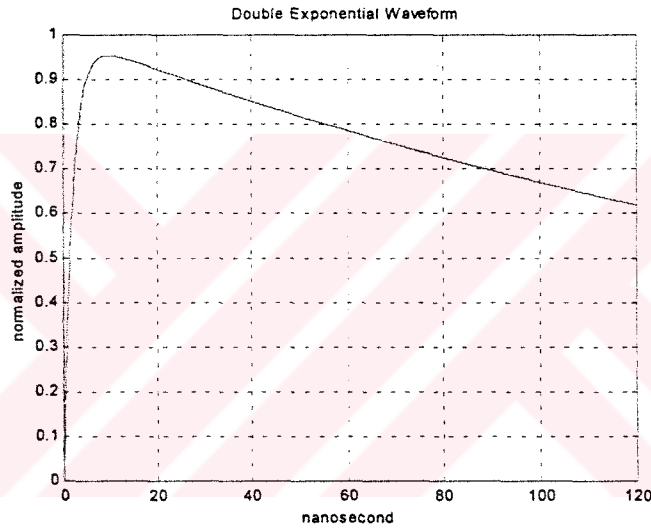
Yıldırım, bulutlarda biriken yüklerin, yeryüzündeki zıt yüklerle nötralizasyon meydana getirme sürecidir. Bu süreç sırasında hava delinir ve yük aktarımı, havanın iletken hale geçen kısmı üzerinden gerçekleşir. Bir iletken boyunca akan akım, çevresinde bir alan endükler. İletken hava kanalından akan akımlar da aynı etkiyi yapar ve çok kısa zamanda gerçekleşen bu olay sonucunda bir darbe oluşur [26].

Yapay olarak oluşturulan EMP ise nükleer patlamayla meydana gelir. Atmosferin yüksek kesimlerinde meydana gelen bir nükleer patlama, yüksek enerjili Gamma ışıması yapar. Patlamanın merkezinden yeryüzüne doğru

ilerleyen ışınlar, atmosfer içinde hava molekülleriyle etkileşirler. Hava içindeki elektronlara enerjilerini aktaran fotonlar, bunları harekete geçirir. Bu elektronlara Compton elektronları adı verilir. Hareket eden elektronlar arkalarında pozitif yüklü iyonlar bırakırlar. Yeryüzünün magnetik alanıyla daha fazla ivme kazanan Compton elektronları ile pozitif iyonlar arasında meydana gelen yük ayrımı, çok büyük şiddette alan oluşturur. Ani oluşan bu alana, elektromagnetik darbe adı verilir. Anlatılan süreç, yeryüzünden yaklaşık 30 km yüksekte ve 20 km kalınlığında bir tabakada meydana gelir [19].

6.3 EMP Dalga Şekli ve Etkileri

EMP dalgası, Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere EMP dalgasının en dikkat çekici noktası, kısa yükselme zamanıdır.



Şekil 6.1 EMP Dalga Şekli

Genel olarak EMP dalgasının yükselme zamanı 5-10 ns mertebelerindeyken, yarı değere düşme süresi 50ns den mikrosaniye mertebelerine kadar değişebilir. Yıldırım darbesini gösteren dik cepheli şekilden farkı, bu sürelerin kısalığından kaynaklanır. Nanosaniye mertebesindeki ömür, gigahertz mertebesinde frekansa karşılık düşer ki bu yüksek güçlü mikrodalganın yönlendirilmesi akıl sınırlarını zorlayacak etkilere sebep olabilir. Nükleer patlamayla meydana gelen elektromagnetik darbenin etki alanı, patlamanın gücünden çok, meydana geldiği yüksekliğe bağlı olarak artar.

EMP, ençok elektronik cihazlar üzerinde tahribata neden olur. Elektromagnetik etkinin yanısıra, iletkenlik yoluyla da zarara sebebiyet verebilir. Meydana gelen patlama, elektronik cihazların duyarlı devrelerini bozar, hatta yakar. Oluşan alan çevredeki herhangi bir raslantısal iletken yoluyla da cihaza kuple olabilir.

Uçaklar, otomobiller veya demiryolları, alan etkisiyle endüklenen gerilim ve bunu sonucunda akan akım için iletken ortamları oluştururlar [18, 19].

EMP'nin etkilerinden korunmanın ilk yolu, her türlü EMU önlemlerini almaktır. Bu önlemler ekranlama, uygun yerleri filtreleme, doğru topraklama ve küçük dirençli bağlamadır. EMU önlemlerinin yanısıra bazı özel EMP önlemleri de almak gerekir. Yıldırımla oluşan elektromagnetik darbeye karşı korunma yöntemleri de benzerdir ama nükleer patlamayla oluşan EMP'nin çok yüksek frekanslı oluşu, yıldırım için alınan önlemlerin yetersiz kalmasına sebep olur.

6.4 EMP Üreteçleri

Bu bölümün başından itibaren anlatılanlar doğrultusunda, elektromagnetik darbe karşısında tesis ve sistemlerin verecekleri yanıt ve buna göre alınacak önlemlerin belirlenmesinin gerekliliği açıktır. Bu doğrultuda elektromagnetik darbeler laboratuvar ortamında üretilip, EMP bağışıklık deneylerinde kullanılır.

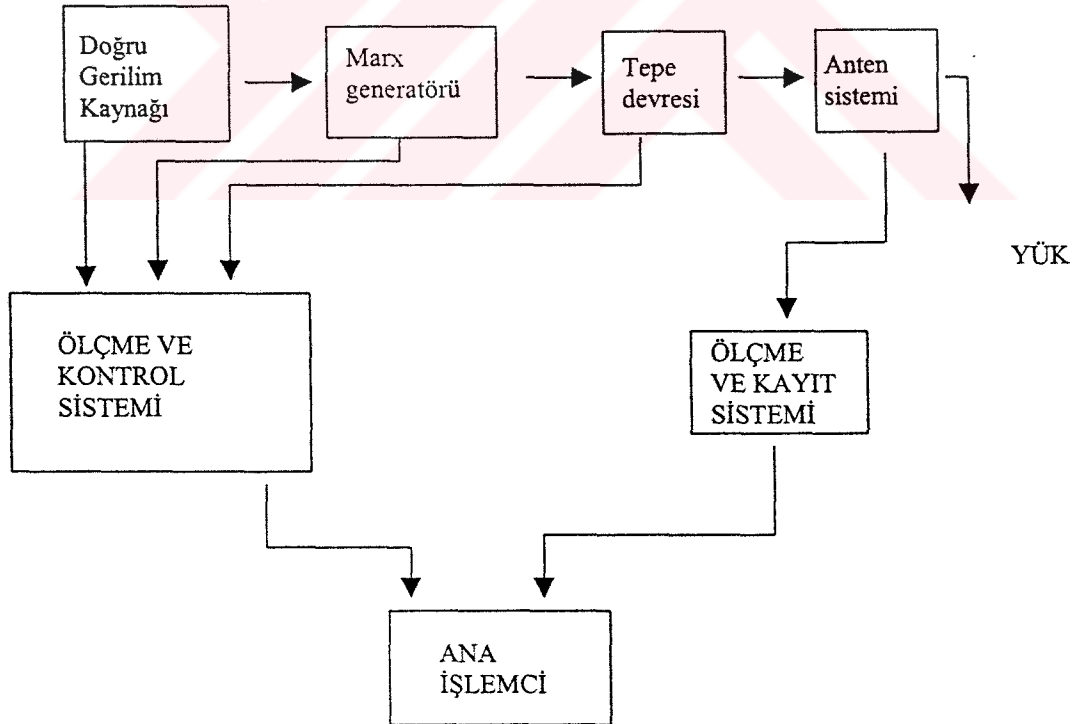
Bu tezde tasarlanan ve gerçekleştirilen yıldırım darbe gerilimi üreticinin asıl amacı, nükleer patlama ile oluşacak EMP'yi laboratuvar ortamında üretebilecek kaynak tasarımına örnek ve temel oluşturmasıdır. Bu bağlamda, gerçekleşmiş olan devre teorik gereksinimler doğrultusunda istenen amaca yönelik çalışabilmektedir. İleriki aşamalarda yapılacak olan işlem, devre ilkesi aynı kalmak üzere üretilen darbenin yükselme zamanını düşürme, gerilim seviyesini 20 kat yükseltme ve devrenin çalışma enerjisini arttırmadır. Bu amaçla yapılması planlanan sistem için farklı yaklaşımlar düşünülmüştür.

EMP simülatörlerinin yapıları genel olarak aynıdır. Her simülatörün bir kaynağı, kuplaj mekanizması ve sonlandırıcı yükü vardır.

Simülatörlerde kullanılan kaynak ac veya dc tabanlı olabilir. En sık kullanılan kaynak yapısı Marx generatörleridir. Simülatör kaynaklarının ortak noktaları, hepsinin yüksek gerilime ihtiyaç duyması ve ürettikleri darbenin nanosaniye mertebesinde yükselme zamanına sahip olmasıdır. İhtiyaç duyulan çok yüksek gerilim, Marx prensibi kullanılarak çok katlı devrelerle elde edilebilir. Başka bir yöntem, yüksek alternatif gerilimin doğrultulmasıyla üretece doğru gerilim sağlamaktır. Yaygın olarak kullanılan kaynaklardan biri de Van de Graaff generatörüdür. Çoğu zaman, bu sayılan kaynakların hepsinin birlikte yer aldığı yapılar oluşturulur. Devrede gerekli olan hızlı yükselme zamanları için

yapılacak yenilemeler belirlenmiştir. Buna göre yükselme zamanının düşmesini engelleyen en önemli faktör olan endüktans mümkün mertebe azaltılmalıdır. Yapılması planlanan üreteçte, endüktansı küçük seviyede olan hızlı kondansatörler (fast capacitors) kullanılması öngörülmüştür. Devrenin muhtelif yerlerinde oluşacak istem dışı endüktanslara karşı kompensasyon yapılması yararlı olacaktır. Yükselme süresini düşürecek asıl sistem ise, tepe devresi (peaking circuit) kullanılması olacaktır. Buna göre hazırlanmış olan üreticinin çıkışına monte edilecek olan kuplaj sistemi, bir anahtar üzerinden (küresel elektrot) uygun yükselme zamanına ulaşıldığı zaman bağlanacaktır.

EMP simülatörlerinin ikinci bölümü olan kuplaj mekanizması, anten sistemi olarak da dlandırılabilir. Bu sistem, EMP deneyinden geçirilecek olan cihaz veya sisteme darbeyi kuple eden yapıdır. Çoğu durumda uçlarına kaynağın çıkışı bağlanmış olan bir çift iletken plakadan oluşan anten şeklindedir. Plaka yerine, birbirlerine paralel olarak sıkça döşenmiş iletim hatları da kuplör olarak kullanılabilir. Kuplaj mekanizması kaynağın ürettiği yüksek darbe gerilimini yüksek elektrik alana çeviren ve deney altındaki cihazı bu alana maruz bırakan yapıdır.



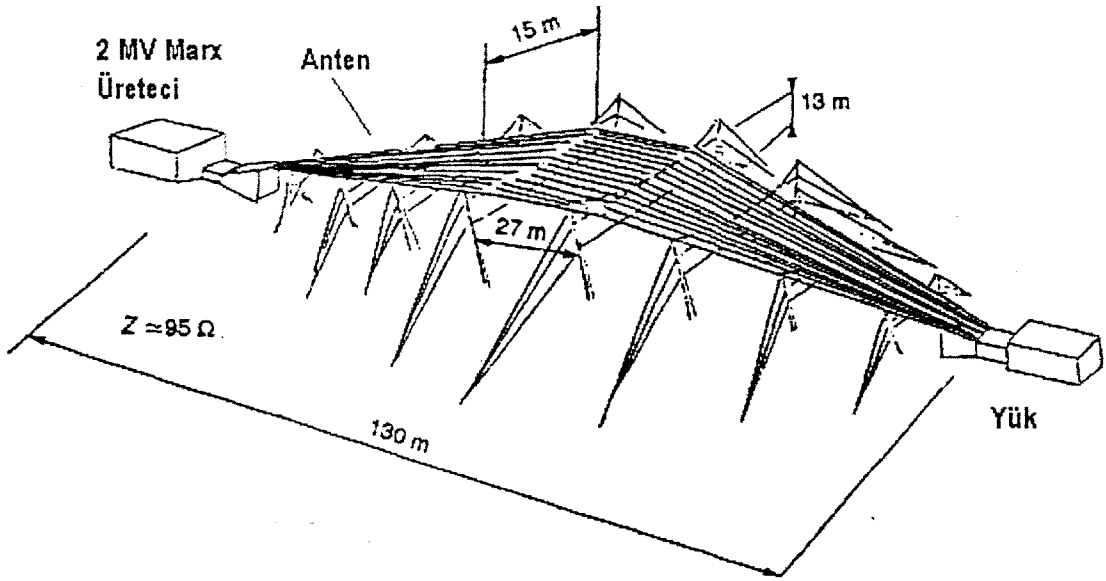
Şekil 6.2 Planlanan EMP Üreteci Blok Şeması

EMP simülasyonunu sağlayan üretcin son kısmı, anten sistemini sonlandırma amacıyla kullanılan yüküdür. Bu yük aynı zamanda kaynak ile anten sistemi arasındaki empedans uyumunu sağlamak amacıyla kullanılır.

Şekil 6.2’de, gerçekleştirilmesi planlanan EMP üretcinin temel birimlerini gösteren blok şeması verilmiştir. Planlanan üretcin çıkış gerilimi 200 kV olacaktır. Bu amaçla kullanılacak olan kaynak, alternatif gerilimi yükseltici bir transformatör olarak tasarlanmıştır. Sadece transformatör kullanarak istenen gerilim seviyesine çıkmak uygun olmayacağından üretcin Marx generatörü kısmı çok katlı yapılacaktır. Ön görülen kat sayısı dördüttür. Devre girişine verilecek olan gerilim, şarj ve depolama üniteleri üzerinden Marx generatörüne ulaştırılmaktadır. Tepe devresi, Marx generatörü çıkışında elde edilen ve mikrosaniyeler düzeyindeki yükselme süresini 5-10 nanosaniye düzeyine indirecektir. Bu koşullar altında anten sisteminin göreceği darbe gerilimi, EMP etkisi yapabilecek düzeye gelmiş olacaktır. Gerçekleştirilmesi planlanan anten sisteminin iletim hatlarından oluşmasına karar verilmiştir.

EMP üretcinin tasarlanması ve gerçekleşmesi sırasında karşılaşılabilecek problemlerden bir tanesi, sistem içinde kaynak ile anten sisteminin empedans uyumsuzluğu göstermesidir. Kaynağın ürettiği darbe gerilim dalgası, mükemmel bir empedans uyumu olmadığı sürece anten sistemine ulaştıktan sonra tekrar kaynağa dönecek ve bu şekilde karşılıklı yansımalar sürecektir. Bu sebeple empedans uyumu tasarımı aşamasında hesaplamalar ile sağlanmalı, gerçekleşme aşamasında ise ölçmeler ile sonuç değerlendirilmelidir [22].

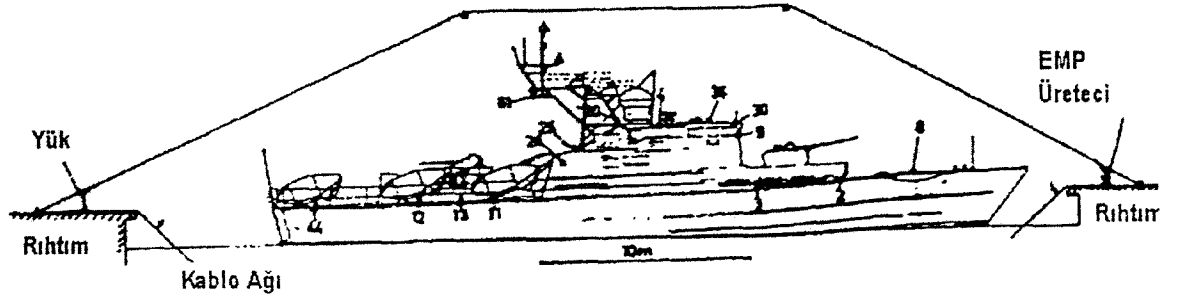
EMP üretci tasarlanırken, ölçme sistemi de beraber bir bütün olarak düşünülmelidir. Bu amaçla üretilen darbe alan şiddetinin büyüklüğüne göre bu alanı ölçecek olan sistem de tasarlanmalı ve gerçekleşmelidir. Üretilen alan tipine uygun alıcılar seçilmeli, kullanılacak olan bant genişliklerine göre prob tasarlanmalıdır. Öngörülen prob, küresel alıcı sistemine sahip olacak ve üç boyutta ölçümleri fiberoptik kablo yardımıyla işlemcilerle ulaştıracaktır.



Şekil 6.3 ALECS EMP Simülatörü

EMP simülatörlerine örnek olarak Şekil 6.3'de ALECS simülatörü verilmiştir. Amerika hava kuvvetlerine bağlı AFWL laboratuvarı tarafından üretilen bu simülatör, şekilde de görüldüğü üzere 2 MV'luk Marx generatörü tarafından beslenmektedir. Marx generatörünün ihtiyaç duyduğu yüksek doğru gerilim, Van de Graaff generatörü ile sağlanmaktadır. Anten sistemi olarak yer düzlemi üzerine gerilmiş iletim hatları kullanılmıştır. Alt plaka olarak toprak yüzeyi kullanılmıştır. 13 m yüksekliğindeki yapının içinde kara kuvvetlerine bağlı araçların ve uçak parçalarının EMP deneyi yapılabilmektedir.

EMP simülatörüyle yapılan deneye örnek olarak Şekil 6.4'teki hücumbot deneyi verilebilir. Norveç'te gerçekleştirilen bu deneyde rıhtıma çekilen hücumbot, 150 kV'luk darbe üreten bir Marx generatörü ile beslenmiş iletim hatlarının altında elektromagnetik alana maruz bırakılmıştır. Deney sırasında güvertedeki elektrik alan şiddetinin 10 kV/m seviyelerinde olması sağlanmıştır. Deney altındaki sistemlerde meydana gelen bozulma veya performans düşüklüğü tespit edilmiştir. Deney sonucunda, EMP için alınacak önlemlerin başında EMU önlemlerinin yer aldığı doğrulanmıştır [18-25].



Şekil 6.4 Bir Hücumbotun EMP Deneyi

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde verilmiş olan bölümler, içerik açısından üç ana kısımda toplanabilir:

- Gerçeklenmek istenen bir darbe gerilimi üreticinin altyapısını oluşturma ve teorik hesaplamalarını yapma
- Üreticinin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi
- İleriye dönük olarak yapılması planlanan projelerle ilgili bilgi verme ve bunların gerçekleştirilen devre ile ilişkisini belirleme.

Bu sıralanan başlıklar doğrultusunda yapılan hesaplamalar ve pratik çalışmalar sonucunda 12 kV'luk 1.2 / 50 μ s'lik yıldırım darbe gerilimi üretici tasarlanmış ve yapılmıştır. Gerçeklenen darbe gerilim üretici, 25 kV'luk kaynaktan beslenmesine karşı gerilim düzeyi 10-15 kV'lar mertebesinde tutulmuştur. Bunun nedeni, kullanılan boşalma kondansatörlerinin gerilim düzeyinin 17.5 kV olmasıdır.

Bu tezde amaçlanan, EMP üretici tasarlarken, kaynak kısmında karşılaşılabilecek sorunları, daha küçük düzeyde gerilim, güç ve frekans kullanarak gerçekleştirilen üreteç üzerinde incelemektir. Bu bakımdan tasarlanan ve gerçekleştirilen darbe gerilimi üretici üzerinde birçok yenileme yapılmalıdır.

Gerçeklenmesi planlanan EMP üretici, 200 kV gerilim düzeyinde çalışacaktır. Bu amaçla hazırlanacak olan devrede kaynak, gerçekleştirilmiş olan devrede kullanılan kaynak olmayacaktır. Gerilimi yükseltmek için uygun görülen sistem, alternatif gerilimi yükseltip doğrultmak, bunun yanında kat sayısını artırarak gerilimi istenen düzeye çıkarmaktır. Gerilim seviyesinin yükselmesi doğal olarak birçok problemi beraberinde getirecektir. Bu amaca uygun sınıflarda elemanlar seçilmeli, daha da önemlisi güvenlik önlemleri alınmalıdır. Kat sayısının artması, daha çok eleman kullanılması ve daha fazla bağlantı yapılmasını gerektirir ki bu sayılanların devre çalışma karakteristiği ve kararlılığı üzerine olumsuz etkileri vardır.

EMP üreticinde karşılaşılabilecek bir diğer durum, gücün artmasıdır. Devre çıkışına bağlanacak olan anten sistemi, deney altındaki cihaza yeterli etkiyi yapabilecek kadar yüksek enerjiye sahip olmalıdır. Belirlenmiş olan gerilim sınıfı, gücü arttıracaktır, ama bunun yanında seçilecek olan boşalma kondansatörünün kapasitesi de amaçlanan düzeye uygun olacak kadar yüksek olmalıdır. Kullanılacak kaynağın, istenen enerji değerini karşılayabilecek yapıda olması gereklidir. Bu amaçla bütün sistem için öngörülen enerji seviyesi kilojoule mertebesinde.

Hedeflenen enerji ve gerilim seviyesinin daha yüksek olması durumunda kullanılması en uygun olan kaynak, Van de Graaff generatörüdür. Van de Graaff generatörü ile Marx generatörü girişine 10 MV'lar mertebesinde gerilim sağlanabilmektedir.

Tasarlanan ve gerçekleştirilen yıldırım darbe gerilimi üreticinden EMP üreticine geçişte üzerinde önemle çalışılması gereken bir konu, anahtarlama görevini yapan küresel elektrot sisteminin geliştirilmesidir. Bu amaçla öngörülen sistem, sıkıştırılmış gaz dolu tüp içinde kıvılcım aralıklı elektrot sistemi kullanmaktadır. Böyle bir sistemin kullanımı, gerek güvenlik gerekse kararlılık açısından yararlı olacaktır. Sistem uzaktan kontrol edilmelidir. Elektrot açıklıkları, yüksek duyarlılığa sahip adım motoru yardımıyla ayarlanabilir. Motorun kontrolü, sistem içine yerleştirilen optik okuyucu yardımıyla mesafenin ölçülmesi, bu bilgiyi kullanarak motoru çalıştıracak girişlere uygun işaretin gönderilmesi ile yapılabilir. Bu şekilde, devrede kontrol gerektiren her bölümün uzaktan ayarlanması, yüksek gerilim devrelerinde gözardı edilemez bir şarttır.

Üreticinin her basamağında ilgili büyüklükler ölçülmelidir. Gerilimi yükseltici devre girişi ve çıkışı, Marx generatörü çıkışı, tepe devresi çıkışı ve anten sisteminin oluşturduğu alan büyüklüğü ölçülebilir olmalıdır. Devre içinde uygun yerlerde gerilim-akım ölçmesi yapılacağı gibi, elde edilen EMP elektrik alanı, özel alıcılar ile ölçülmelidir. Ölçüm işlemi, önceden yerleştirilen alıcılarla yapılmalı, elde edilen veriler görüntüleme ve analiz cihazlarına ulaştırılmalıdır.

Günümüz teknolojisinde bu anlatılan kontrollerin tamamının bilgisayar destekli yapılması mümkündür. Hazırlanacak yazılımlar ile uygun veriler işlemcide toplanacak, koşturulan program yardımıyla üreticinin ilgili bölümüne komutlar gönderilecektir.

EMP üreteçlerinde gerilim düzeyleri MV mertebelerine ulaştığından, güvenlik sebebiyle sistem bütün olarak gaz içine konur. Yalıtkan olarak gaz tercih edilmesinin sebebi, yüksek frekanslarda gösterdikleri karakteristik ve kontrolü en kolay olmasıdır. Tercih edilen gazların başında SF₆ ve Freon gazları gelir.



KAYNAKLAR

- [1] Kuffeland, E. and Abdullah, M., 1970. High Voltage Engineering, Pergamon Press, Hungary
- [2] Khalifa, M., 1990. High Voltage Engineering. Marcel Dekker, New York.
- [3] Özkaya, M., 1996. Yüksek Gerilim Tekniği II, İTÜ, İstanbul
- [4] Kalenderli, Ö., Özdemir, A., 1990. Yüksek Gerilim Laboratuvar Deneyleri, İTÜ, İstanbul
- [5] Smith, I. D., 1978. Pulsed Power For EMP Simulators, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol.20 No.1, pp. 53-59, February
- [6] Toprak, İ., 1984. Darbe Generatörü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [7] IEC 60-1, 1989. High Voltage Test Technique
- [8] TS 3008, 1990. Yüksek Gerilim Deney Yöntemleri, Ankara
- [9] Hawley, W.G., 1959. Impulse Voltage Testing, Chapman&Hall, London
- [10] Akpınar, S., 1997. Yüksek Gerilim Tekniğinin Temelleri, Trabzon
- [11] Kuffel, E., Zaengl, W.S., 1984. High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon
- [12] Kalenderli, Ö., Özdemir, A., İsmailoğlu, H., 240 kV'luk Darbe Gerilimi Üretici Tasarımı ve Yapımı, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, pp. 715-718
- [13] Kalenderli, Ö., Özdemir, A., Yıldırım, H., Yeni Bir Bilgisayar Destekli Yüksek Darbe Gerilimi Ölçme Sistemi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, pp 719-722
- [14] Clayton, P., 1992. Introduction to EMC, Wiley, USA
- [15] Chatterton, P.A., Houlden, M.A., 1992. Wiley, England
- [16] Ghose, R.N., 1996. Interference Mitigation, IEEE, USA
- [17] Siew, W.H., Howat, S.D., Chalmers, I.D., 1996. Radiated Interference From a High Voltage Impulse Generator, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol.38, No.4, pp. 600-604, November
- [18] Taylor, T.B., 1987, Third Generation Nuclear Weapons, Scientific American, Vol.256. No.4, pp. 22-31, April

- [19] **Committee on National Security**, 1997. Thread Proposed By EMP to US Military System and Civil Infrastructure,. Military Research and Development Subcommittee, Washington, July
- [20] **King, R.W.P.**, 1985. The Parallel Plate and Rhombic EMP Simulator, IEEE, pp. 381-383
- [21] **Feser, K., Feurer, K., Pfaff, W.**, MIGUS: A Flexible Fully Automatic EMP Simulator, Stuttgart Univ.
- [22] **King, R.W.**, 1984. The Matching Between an EMP Simulator and the Pulse Generator, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol.26, No.1, pp. 4-13, February
- [23] **King, R.W.**, 1979. The Electromagnetic Field in an EMP Simulator at a High Frequency, IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility, Vol.21, No.3, pp. 263-269, August
- [24] **Gronhaug, K.L.**, EMP Test of a Fast Patrol Boat, Norwegian Defence Research Establishment
- [25] **Degauque, P., Hamelin, J.**, 1993, Electromagnetic Compatibility, Oxford University., London
- [26] **Carpenter, R.B., çeviren Ürel,G.**, Yıldırıma Karşı Korunma, PALS Elk. Cihazlar San., İstanbul

ÖZGEÇMİŞ

Aysam AKSES, 1977 İskenderun'da doğdu. Orta öğrenimini İskenderun İstiklal Makzume Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1995 yılında İTÜ Elektrik Mühendisliği bölümünü kazandı. 1999 Haziran ayında bu bölümden mezun olarak 1999 Eylül ayında İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans çalışmasına başladı. Ayrıca Eylül 1999'dan bu yana TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü'nde araştırmacı olarak çalışmaktadır (Haziran 2001). Aysam AKSES, iyi düzeyde İngilizce ve orta düzeyde Almanca dillerini bilmektedir.

