

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



ALÇAK GERİLİM PARAFUDRLARININ TESTİ İÇİN
YILDIRIM DARBE AKIMI ÜRETECİNİN TASARIMI VE
UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE TUNÇ

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi MURAT FİDAN

BOLU, OCAK - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Emre TUNÇ tarafından hazırlanan “**ALÇAK GERİLİM PARAFUDRLARININ TESTİ İÇİN YILDIRIM DARBE AKIMI ÜRETECİNİN TASARIMI VE UYGULAMASI**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 18/01/2023

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Murat FİDAN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK
Düzce Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin 06/02/2023 tarihinde Turnitin adlı intihal tespit programından enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 7 olarak tespit edilmiştir.

.....

EMRE TUNÇ

ÖZET

ALÇAK GERİLİM PARAFUDRLARININ TESTİ İÇİN YILDIRIM DARBE AKIMI ÜRETECİNİN TASARIMI VE UYGULAMASI YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE TUNÇ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ MURAT FİDAN)

BOLU, OCAK - 2023
XVI + 93

Elektrik enerjisinin sürekliliği gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Elektrik enerjisinin sürekliliğine etki eden faktörlerden dolayı elektrik güç sistemlerinde bazı kesinti ve arızalar meydana gelebilmektedir. Bir doğa olayı olarak yıldırım darbesi deşarjları da bu faktörlerden birisidir. Yıldırım deşarjları sonucu ortaya çıkan yıldırım darbe akımları, test amaçlı olarak laboratuvar ortamında üretilmektedir. Tez çalışması kapsamında, laboratuvar ortamında yıldırım darbe akımı üreterek parafudr testi gerçekleştirebilmek için literatürdeki yıldırım darbe akımı üreteci devresi incelenerek gerekli olan elektriksel parametre değerleri belirlenmiştir. Belirlenen parametre değerlerinin Pspice programı ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında 8/20 μ s karakteristiğine sahip darbe akımı üretebilmek için bir deney sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen deney sistemi 8/20 μ s dalga formunda, 2.7 kA seviyelerinde darbe akımı ile test edilmiştir. Deney sisteminde kullanılan iki ayrı kondansatör grubu ile darbe akımı üreteci 8 kV, 320 J ve 16 kV 640 J arasında çalışabilmektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Yüksek gerilim, Darbe akımı, Parafudr

ABSTRACT

DESIGN AND APPLICATION OF LIGHTNING IMPULSE CURRENT GENERATOR FOR TESTING LOW VOLTAGE SURGE ARRESTERS

MSC THESIS

EMRE TUNC

BOLU ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. MURAT FIDAN)

BOLU, JANUARY 2023

XVI + 93

The continuity of electrical energy is gaining importance day by day. Due to the factors affecting the continuity of electrical energy, some interruptions and malfunctions may occur in electrical power systems. As a natural phenomenon, lightning impulse discharges are one of these factors. Lightning impulse currents resulting from lightning discharges can be produced in a laboratory environment for test purposes. Within the scope of the thesis, the necessary electrical parameter values were determined by examining the lightning impulse current generator circuit in the literature in order to perform the surge arrester test by producing lightning impulse current in the laboratory environment. The simulation of the determined parameter values was carried out with the Pspice program. An experimental system has been developed to produce a pulse current of 8/20 μ s in a laboratory environment. The developed experimental system has been tested in 8/20 μ s waveform, with a pulse current of 2.7 kA. With two separate capacitor groups used in the test system, the pulse current generator can operate between 8 kV, 320 J and 16 kV 640 J.

KEYWORDS: High voltage, Pulse current, Surge arrester

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xiv
TEŞEKKÜR	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMA	3
3. AŞIRI GERİLİMLER VE AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA	14
3.1 İç Aşırı Gerilimler.....	14
3.1.1 Genaratör Yükünün Kalkması	14
3.1.2 Boşta Çalışan Hattın Sonunda Gerilim Yükselmesi (Ferranti Olayı)	16
3.1.3 Kapasitif Devrenin Açılması	17
3.1.4 Toprak Teması veya Kısa Devre Arızaları ile Oluşan Aşırı Gerilimler	19
3.2 Dış Aşırı Gerilimler	19
3.2.1 Yıldırımın Doğası.....	19
3.2.2 Yıldırım Akımları.....	21
3.2.3 Direkt Yıldırım Düşmesiyle Meydana Gelen Aşırı Gerilimler ...	23
3.2.3.1 Yıldırımın Faz Hattına Düşmesi Durumu	23
3.2.3.2 Yıldırımın Direğe Düşmesi Durumu	24
3.3 Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma	25
3.3.1 Değişken Dirençli Parafudrlar	25
3.3.2 Metal Oksit Parafudrlar	27
4. DARBE AKIMLARININ ÜRETİLMESİ.....	29
5. DARBE AKIM ÜRETECİ TASARIMI VE ÜRETİLMESİ.....	33
5.1 8/20 μ s Darbe Akımı Üreteci Devresi Parametre Hesaplamaları	33
5.2 8/20 μ s Darbe Akımı Üreteci Devresi Benzetim Çalışması	40
5.3 Darbe Kondansatörü.....	41
5.4 Yüksek Doğru Gerilim ve Doğrultma Katının Üretilmesi.....	49
5.5 Omik Gerilim Bölücü Tasarımı ve Üretilmesi	53
5.6 Kapasitif Gerilim Bölücü Tasarımı ve Üretilmesi	58
5.7 Küre Küre Elektrot Anahtarlama Sistemi	61
5.8 Bobin ve Direnç Elemanlarının Tasarım ve Üretimi	68

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	81
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
8. KAYNAKLAR.....	91



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

- Şekil 2.1.** Jayaram ve arkadaşları tarafından tasarlanan kapasitif gerilim bölücünün elektrot yapısı (28) 10
- Şekil 2.2.** Jayaram ve arkadaşları tarafından tasarlanan kapasitif gerilim bölücünün alçak gerilim kolu (28) 10
- Şekil 2.3.** Jayaram ve arkadaşlarının çalışmasına ait darbe ölçümlerinin şeması 11
- Şekil 2.4.** Hrbac ve arkadaşları tarafından tasarlanan kapasitif gerilim bölücünün devre şeması (34) 13
- Şekil 3.1.** Reaktif akımla yüklenen bir generatörün fazör diyagramları (1); a) Saf kapasitif yük için, b) Saf endüktif yük için; U : Sargı ucundaki gerilim, E : Elektromotor kuvvet, I_C : Kapasitif yük akımı, I_L : Endüktif yük akımı 15
- Şekil 3.2.** Yük kalkması sonucu gerilim yükselmesi (1); a) Ani yük kalkışı, b) Generatör gerilimindeki yükselme, c) Uyarma akımı değişimi; ΔQ : Reaktif yük azalması, u : Generatör gerilimi, $\Delta u''$: Başlangıç gerilimi artışı, $\Delta u'$: Geçici gerilim artışı, i_m : Uyarma akımı, I : Uyarma regülatörünün faaliyete geçtiği durum, II : Regülatörsüz durum 16
- Şekil 3.3.** Boşta çalışan hattın sonundaki gerilim yükselmesi (1); a) Hattın eşdeğer devre modeli, b) Fazör diyagramı; U_1 : Hat başı gerilimi, U_2 : Hat sonu gerilimi, I_C : Kapasitif hat akımı, X_h : Hattın reaktansı, C : Hattın kapasitesi 17
- Şekil 3.4.** Yıldız noktası topraklanmış kondansatör bataryası devresinin açılması durumunda anahtar kontakları arasındaki gerilimin yükselmesi (1); a) Üç kutuplu bağlantı şeması, b) Devrenin R fazına ait bir kutuplu eşdeğer şema, c) Güç anahtarına ait akım ve gerilim eğrisi 18
- Şekil 3.5.** Bir buluttaki olası yük dağılımına karşılık gelen yere yakın alan gradyanı (38) 20
- Şekil 3.6.** Simpsons' ın teorisine göre bulut modeli (38) 20
- Şekil 3.7.** Yıldırım deşarjının oluşum aşamaları ve buna karşılık gelen yıldırım akımının oluşumu (37) 21
- Şekil 3.8.** Yıldırım akımı $i(t)$ eğrisi 22
- Şekil 3.9.** Yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri (1) 23
- Şekil 3.10.** Yıldırımın faz hattına düşmesi durumu (40); $i_L(t)$: Faz hattında ilerleyen yıldırım akımı, i_d : Direk üzerinden akan akım, R_d : Direğin topraklama direnci 24
- Şekil 3.11.** Yıldırımın direğe düşmesi durumu (48); $i_L(t)$: Faz hattında ilerleyen yıldırım akımı, i_d : Direk üzerinden akan akım, R_d : Direğin topraklama direnci 24
- Şekil 3.12.** Yıldırımın koruma hattına düşmesi durumu (40); $i_L(t)$: Faz hattında ilerleyen yıldırım akımı, i_d : Direk üzerinden akan akım, R_d : Direğin topraklama direnci 25
- Şekil 3.13.** Değişken dirençli parafudrların a) yapısı b) eşdeğer şeması (41) .. 26
- Şekil 3.14.** ZnO ve SiC dirençlerinin akım-gerilim karakteristikleri (42) 27
- Şekil 3.15.** Bir metal oksit parafudrun yapısı; a) Metal oksit parafudr, b) Metal oksit parafudrun iç yapısı (43); 1) Sıkıştırma yayı, 2) Metal oksit direnç elemanları, 3) Gövde, 4) Basınçlı gaz 28

Şekil 4.1. Standart darbe akımı dalga şekli (18)	29
Şekil 4.2. Darbe akımı üreticinin eşdeğer devre modeli (38); G: Atlama aralığı30	
Şekil 4.3. Darbe akımı dalga formlarının çeşitleri (38); t_{11} ve t_{12} : I ve II numaralı dalgaların cephe süresi, t_{21} ve t_{22} : I ve II numaralı dalgaların sırt yarı değer süresi, I: Sönümlü osilasyon dalgası, II: Aşırı sönümlü dalga, i_1 : Aşım	30
Şekil 5.1. Laboratuvar ortamında standart yıldırım darbe akımı üretebilmek için geliştirilen deney düzeneğine ait devre şeması	33
Şekil 5.2. Pspice programı kullanılarak oluşturulan yıldırım darbe akımı üretici devresi	40
Şekil 5.3. Pspice programı kullanılarak benzetim çalışması gerçekleştirilen yıldırım darbe akımı üretici devresinden akan 8/20 μ s dalga formundaki akım	41
Şekil 5.4. Darbe kondansatörlerini oluşturmak için kullanılan kondansatör blokları	42
Şekil 5.5. Kondansatörleri bir arada tutan sabitleyici yapı	42
Şekil 5.6. Birbirine seri biçimde bağlanan 5'li kondansatör katı bloğu.....	43
Şekil 5.7. Kondansatör bloklarının pvc boru içine yerleştirilmesi; a) Sabitleyici yapının pvc boru içine montajı, b) Kondansatör blokları ve sabitleyici yapının pvc boru içine montajı.....	44
Şekil 5.8. 8 kV tepe değerine sahip darbe kondansatörü setine ait flanş ve taşıyıcı ayak yapısı; a) Tekerlekli ayaklar, b) Tekerlekli ayakların üzerine montajlanan flanş yapısı.....	45
Şekil 5.9. Hareketli ayak ve flanş yapısı üzerine sabitlenen 8 kV' luk darbe kondansatörü setinin nihai hali.....	46
Şekil 5.10. Hareketli ayak ve flanş yapısı üzerine sabitlenen 16 kV' luk darbe kondansatörü setinin nihai hali.....	48
Şekil 5.11. Tez çalışması kapsamında trafuyu enerjilendirmek için kullanılan varyak.....	50
Şekil 5.12. Tez çalışması kapsamında üretilen darbe setinin enerji beslemesi için kullanılan neon transformatörü	50
Şekil 5.13. Darbe kondansatörü setini enerjilendirmek için kullanılan enerji besleme sistemi	51
Şekil 5.14. Üretilen doğrultma katının iç yapısı	52
Şekil 5.15. Üretilen kaide, ve kaidenin üzerinde konumlandırılan transformatör, mesnet izolatörü ve doğrultma katı; 1) Doğrultma katı, 2) Transformatör, 3) Mesnet İzolatörü, 4) Kaide	53
Şekil 5.16. Omik gerilim bölücü eşdeğer devresi	54
Şekil 5.17. Üretilen omik gerilim bölücünün iç yapısı	55
Şekil 5.18. Omik gerilim bölücüyü hareketli kaide üzerine sabitlemek için Solidworks çizim programı ile çizilen flanş; a) Flanşın üstten görünümü, b) Flanşın önden görünümü	56
Şekil 5.19. Tasarlanan ve üretilen omik gerilim bölücü; 1) Yalıtkan pvc boru, 2) Flanş, 3) Hareketli ayaklar, 4) Alüminyum ölçme kutusu	57
Şekil 5.20. Omik gerilim bölücüye ait ölçme kutusu; 1) Bnc konektör, 2) Ölçme ucunun alındığı çıkış direnci	58
Şekil 5.21. Kapasitif gerilim bölücü eşdeğer devresi	59
Şekil 5.22. Üretilen kapasitif gerilim bölücünün iç yapısı; 1) Kapasitif gerilim bölücünün giriş bağlantı kablosu, 2) 3 boyutlu yazıcı ile üretilen kapak, 3) Seri bağlı mkp kondansatörler, 4) Kapasitif gerilim bölücünün çıkış	

bağlantı kablosu, 5) 3 boyutlu yazıcı ile üretilen gerilim bölücü ayağı	60
Şekil 5.23. Tasarlanan ve üretilen kapasitif gerilim bölücü; 1) Yalıtkan pvc boru, 2) Flanş, 3) Topraklama civatası, 4) Hareketli ayaklar, 5) Alüminyum ölçme kutusu	61
Şekil 5.24. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminde kullanılan 42 mm çapında paslanmaz çelik küre	62
Şekil 5.25. a) Redüktörlü doğru akım motorunun miline bağlı dişli ile uyumlu olarak tasarlanan kremayer dişlisinin üstten görünümü, b) Kremayer dişlisinin alttan görünümü	63
Şekil 5.26. a) Kremayer dişlisinin üstten görünümü, b) Kremayer dişlisi üzerine yerleştirilen sınır anahtarları.....	64
Şekil 5.27. Tasarımı gerçekleştirilen küre küre elektrot anahtarlama sistemi parçalarının birbiri ile montajlanmış hali; a) Üstten görünüm, b) Altan görünüm; 1) Paslanmaz çelik küre, 2) Kremayer dişlisi, 3) Kremayer dişlisinin y ekseninde hareketine yardımcı olan 8 mm çapındaki silindirik çubuklar, 4) 8 mm çapındaki silindirik çubukları koruyucu mahfaza içinde sabitleyen, sabitleyici parçalar, 5) Koruyucu mahfazaya yerleştirilen üst kapak, 6) Koruyucu mahfazaya yerleştirilen alt kapak, 7) Sınır anahtarının üzerine yerleştirildiği sınır anahtarı sabitleyici parça	65
Şekil 5.28. Üretimi gerçekleştirilen küre küre elektrot anahtarlama sisteminin nihai hali; 1) Çelik küreyi, şarj edilen darbe kondansatörlerine bağlamak için çıkarılan metrik 8 bağlantı ucu, 2) Redüktörlü doğru akım motoru, 3) Sınır anahtarlarına ait kablo bağlantıları, 4) Paslanmaz çelik küre	66
Şekil 5.29. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminin kontrol devresi; F_1 ve F_2 : Sigorta, R_1 ve R_2 : Direnç, NC_1 : Yukarı yöndeki sınır anahtarının normalde kapalı kontağı, NC_2 : Aşağı yöndeki sınır anahtarının normalde kapalı kontağı	66
Şekil 5.30. Küre küre elektrot anahtarlama sistemine enerji vermek için kullanılan aküler; a) Akülerin akü yuvasına yerleştirilmiş hali, b) Akü yuvasının kumanda panosu içine montajlanmış ve diğer bağlantıların yapılmış hali	67
Şekil 5.31. Küre küre elektrot sisteminin kontrol edildiği kumanda panosu; a) Üstten görünüm, b) Arkadan görünüm	68
Şekil 5.32. a) Akımın tek koldan akması durumunda gerekli olan bobinin endüktans değeri, b) Akımın 4 kola dağılarak akması durumunda gerekli olan bobininlerin endüktans değerleri	69
Şekil 5.33. Coil64 programı yardımıyla belirlenen sarım sayısı	70
Şekil 5.34. a) Solidworks programı ile tasarlanan 17 cm uzunluğundaki ve 43 mm çapındaki silindirik karkas, b) 3 boyutlu yazıcı ile üretilen karkaslar	71
Şekil 5.35. Karkas etrafına sarılan 2.7 mm çapındaki bakır nya kablo	71
Şekil 5.36. Üretimi gerçekleştirilen 1. bobinin LCR metre ile ölçümü	72
Şekil 5.37. Üretilen bobinlerin giriş ve çıkış uçlarına takılan kablo pabucu ve bobinlerin etrafına yerleştirilen ısıyla daralan makaron.....	73
Şekil 5.38. a) Küre küre elektrot anahtarlama sistemi ve bobinleri bir arada tutabilmek için tasarlanan model b) Tasarlanan modelin 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş hali	73
Şekil 5.39. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminin içine yerleştirildiği disk ve bu diske montajlanan pvc borular	74

Şekil 5.40. Tasarımı yapılan ikinci model disk.....	75
Şekil 5.41. Bobinler ve 3 boyutlu yazıcı ile üretilen disklerin birleştirilmiş hali	75
Şekil 5.42. a) Üzerine 15 cm çapındaki alüminyum diskin yerleştirilmesi için tasarlanan üçüncü model disk b) Üretilen üçüncü model disk.....	76
Şekil 5.43. Alüminyum disk ve üretilen üçüncü model disk yardımı ile oluşturulan yapı a) Yukarıdan görünüm b) Aşağıdan görünüm.....	77
Şekil 5.44. Bobin ve küre küre elektrot sisteminden oluşan yapı	78
Şekil 5.45. Geliştirilen deney sisteminin nihai hali; 1) Darbe kondansatörü seti, 2) Bağlantı barası, 3) Küre küre elektrot anahtarlama sistemindeki redüktörlü doğru akım motoruna ait bağlantıların ekranlanması amacıyla kullanılan esnek metal kılıf, 4) Küre küre elektrotlar, 5) Bobinler, 6) Deney numunesi (parafudr), 7) Transformatör, 8) Ön direnç ve diyot katı, 9) Omik gerilim bölücü, 10) Kapasitif gerilim bölücü.....	80
Şekil 6.1. a) 7500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu üretilen 8/20 μ s yıldırım darbe akımının osiloskop görüntüsü (CH1: Parafudr üzerine düşen gerilim, CH2: 8/20 μ s dalga formunda yıldırım darbe akımı), b) Pspice analiz programı yardımıyla 7500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile elde edilen yıldırım darbe akımı	82
Şekil 6.2. a) 6400 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu üretilen 8/20 μ s yıldırım darbe akımının osiloskop görüntüsü (CH1: Parafudr üzerine düşen gerilim, CH2: 8/20 μ s dalga formunda yıldırım darbe akımı), b) Pspice analiz programı yardımıyla 6400 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile elde edilen yıldırım darbe akımı	84
Şekil 6.3. a) 5500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu üretilen 8/20 μ s yıldırım darbe akımının osiloskop görüntüsü (CH1: Parafudr üzerine düşen gerilim, CH2: 8/20 μ s dalga formunda yıldırım darbe akımı), b) Pspice analiz programı yardımıyla 5500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile elde edilen yıldırım darbe akımı	86
Şekil 6.4. a) 7500 V gerilim seviyesinde 5 μ F sığa değerine sahip darbe kondansatörü ile üretilen yıldırım darbe akımı, b) 7500 V gerilim seviyesinde 10 μ F sığa değerine sahip darbe kondansatörü ile üretilen yıldırım darbe akımı.....	88

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. 8 kV' luk darbe kondansatörü setine ait katların sığa değerleri.....	47
Tablo 5.2. 16 kV' luk darbe kondansatörü setine ait katların sığa değerleri....	49
Tablo 5.3. Bobinlerin sarımı için seçilen parametreler	69
Tablo 5.4. Üretilen bobinlerin ölçülen endüktans değerleri	72



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

ξ	: Sönüm Oranı
$\Delta u'$	: Geçici Gerilim Artışı
$\Delta u''$	: Başlangıç Gerilimi Artışı
ΔQ	: Reaktif Yük Azalması
μs	: Mikro Saniye
A	: Amper
AA	: Alternatif Akım
Ah	: Amper - Saat
ATP	: Alternative Transient Program
C	: Kapasite
DA	: Direct Current (Doğru Akım)
e.m.k.	: Elektromotor Kuvvet
F	: Farad
H	: Henry
Hz	: Hertz
I	: Akım
I _C	: Kapasitif Akım
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistör (İzole Edilmiş Kapılı, İki Kutuplu Transistör)
I _L	: Endüktif Akım
J	: Joule
m	: Metre
mkp	: Metalize Polipropilen
PEF	: Pulsed Electric Field (Darbe Elektrik Alanı)
PLA	: Polilaktik Asit
Q	: Elektrik Yüğü
R	: Direnç
T	: Periyot
U	: Gerilim
V	: Elektriksel Potansiyel
W	: Watt

X_h	: Reaktans
Z	: Empedans
π	: Pi Sayısı
Ω	: Ohm
ω	: Açısal frekans



TEŞEKKÜR

Tez çalışması boyunca yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşıp yol gösteren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Murat FİDAN' a, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanımız Sayın Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU' na, atölye çalışmalarında yardımcı olan teknisyen Sayın Sedat ÖZER' e ve akademik yardımlarından ötürü Arş. Gör. Selim İLHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştirip bugünlere gelmemi sağlayan, üzerimde çok büyük emekleri olan aileme ve manevi desteğini benden eksik etmeyen nişanlım Beyza ERENLER' e minnettarım.

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji, insanların ve diğer canlı varlıkların hayatında çok önemli bir etkiye sahiptir. Bu etki gün geçtikçe daha da artmaktadır. Enerji çeşitlerinden biri olan elektrik enerjisi de diğer enerji türleri gibi insan hayatı için vazgeçilmez bir unsurdur. Ortaya çıkan elektrik arızaları ve enerji krizleri gibi durumlarda elektrik enerjisinin çok kısa süreli iletim ve dağıtım problemleri bile canlıların yaşamını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Elektrik güç sistemlerinde arızaya sebep olabilen durumların başında aşırı gerilimler gelmektedir. Aşırı gerilimler, anahtarlama olaylarına bağlı olarak iç aşırı gerilimler ve atmosferik olaylara bağlı olarak dış aşırı gerilimler şeklinde incelenebilir (1).

Aşırı gerilimler atmosferik olaylara bağlı olarak ya doğrudan yıldırım düşmesi ya da tesirle elektrikleşme gibi durumlara bağlı olarak oluşmaktadır ve elektrik güç sistemlerinde büyük arızalara sebep olabilmektedirler. Gelişen teknoloji ve mühendislik yaklaşımları ile birlikte insanoğlu enerjinin kalitesini ve sürekliliğini iyileştirmeye çalışmaktadır. Enerjinin sürekliliğini sağlamak adına güç sistemlerinde kullanılan koruma elemanlarından biri de parafudrur. Faz ve toprak arasına bağlanan parafudrlar, nominal işletme geriliminde çok yüksek dirence sahip olarak açık devreye yakın bir davranış gösterirken ani gerilim yükselmelerinde direnci çok düşük değerlere düşerek kısa devreye yakın özellik göstermektedirler.

Teknolojinin gelişmesine bağlı olarak son yıllarda ortaya çıkan elektronik ürünlerden biri de akım korumalı prizlerdir. Elektronik cihazları ani akım ve gerilim dalgalanmalarına karşı koruma amacıyla satılan akım korumalı prizlerin farklı güç ve akım değerlerine göre çalışan çok sayıda çeşidi mevcuttur. Birçok marka adı altında üretilen akım korumalı prizlerin, yıldırımın zararlı etkilerine karşı koruduğu ifade edilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, laboratuvar ortamında IEC 61000-4-5 standardını sağlayan, 8/20 μ s periyoda sahip 16 kV_{rms}, 640 Joule ve 8 kV_{rms}, 320 Joule değerlerinde çalışma imkânı sağlayan bir darbe akımı üretici gerçekleştirmektir. İki ayrı darbe kondansatörü oluşturularak farklı gerilim, sığa ve güç değerlerinde 8/20 μ s yıldırım darbe akımı üretilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilmesi hedeflenen deney sistemi ile elde edilen verilerin, bilgisayar ortamında analiz programları yardımıyla gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına ait sonuçlarla karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca alçak gerilim parafudrlarının

ve akım korumalı prizlerin geliştirilen deney sistemi kullanılarak testlerinin yapılabilmesi de tez çalışmasının bir alt amacıdır.

Yedi bölümden oluşan tez çalışmasının ikinci bölümünde literatürdeki darbe akımı üretici ve darbe gerilimi üretici konularını kapsayan teorik ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Ayrıca tez çalışmasının bu bölümünde, geliştirilen deney sisteminde kullanılan kapasitif gerilim bölücü ve omik gerilim bölücü için literatürdeki diğer benzer çalışmalar incelenmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde aşırı gerilimler ve aşırı gerilimlere karşı korumaya yer verilmiştir. Bu bölümde aşırı gerilimin oluşumu ve aşırı gerilim türleri anlatılmıştır. Ayrıca aşırı gerilime karşı koruma elemanı olarak kullanılan parafudrlardan da bu kısımda bahsedilmiştir.

Tez çalışmasının dördüncü bölümünü ise standart yıldırım darbe akımı dalga şeklinin ve darbe akımı üreticinin eşdeğer devre modelinin yer aldığı kısım oluşturmaktadır. Bu bölümde standart yıldırım darbe akımı üretici devresi analiz edilerek yıldırım darbe akımının parametrik çıkarımı yapılmıştır.

Tez çalışmasının beşinci bölümde 8 kA tepe değerine sahip standart yıldırım darbe akımı üretebilmek için gerekli olan darbe kondansatörü, bobin ve direnç değerlerinin hesaplamaları verilmiştir. Belirlenen değerlerin benzetimleri Pspice programında gerçekleştirilerek doğrulaması yapılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları da bu kısımda paylaşılmıştır. Belirlenen değerlerle gerçekleştirilen darbe setinin, kondansatör, direnç, bobin, kapasitif ve omik gerilim bölücü ve anahtarlama sisteminin tasarım ve yapım aşamaları bu kısımda anlatılmıştır.

Tez çalışmasının altıncı bölümünü deney sistemi ile gerçekleştirilen deneylerde elde edilen veriler oluşturmaktadır.

Tez çalışmasının son bölümünde ise çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar, bu sonuçlara bağlı olarak elde edilen çıkarımlar ve çalışmanın geliştirilebilir yönleri paylaşılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMA

Parafudr ve akım korumalı prizlerin test edilebilmesi için laboratuvar ortamında yıldırım darbe akımı üretilmesi gerekmektedir. Darbe akımı üretebilmek oldukça zor ve karmaşık olup bunun için özel bir deney sisteminin geliştirilmesi gereklidir. Darbe akımı üretici ile ilişkili literatürde farklı çalışmalar mevcuttur. Söz konusu çalışmalardan bu tez çalışması ile ilişkili olanlardan bazıları ele alınmaktadır.

Guo ve ark. (2) gerçekleştirdikleri çalışma ile saniyede 10 darbe uygulayabilen bir darbe akımı üretici tasarlamışlardır. Tasarlanan darbe akımı üretici ile tepe değeri 10 kA olarak belirtilen edilen darbe akımı üretebildiği ifade edilmektedir. Sistemin şarj verimliliği % 90 olarak belirtilmektedir. Ayrıca her bir darbenin gücü 10^8 W olarak ifade edilmektedir. Çalışma ile tasarlanan üreticinin Tesla trafo tipi hızlandırıcının şarj sisteminde, tekrarlayan plazma odaklama cihazında, anahtarlama deneylerinde ve darbe kondansatörlerinin testlerinde uygulandığı ifade edilmektedir.

Lorthongkam ve ark. (3) ise darbe akımı üreticinin parametre değerlerini hesaplamak amacıyla bir program tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı ve geliştirmesi yapılan program ile darbe akımı devresine ait parametre değerleri normalize edilmiş hesaplama teknikleri yardımıyla hesaplanabilmektedir. Program ile kullanıcıya değeri 0.1 μ F ile 10 μ F arasında değişen kapasite seçimi ve değeri 10 kV ile 100 kV arasında değişen şarj gerilimi seçeneği sunulmaktadır. Üreticinin devre parametrelerini belirleyebilmek için 1/20, 4/10, 8/20 ve 30/80 μ s standartlarına sahip darbe akımı dalga şekillerinin program yardımıyla seçilebileceği belirtilmektedir.

Yıldırım, bulut ile yeryüzü arasında gerçekleşen bir doğa olayı olarak ifade edilebilir. Yıldırımın elektrik güç sistemlerinde arızalara sebep olduğu bilinmektedir. Yıldırım darbeleri, haberleşme ağı, ulaşım ve elektrik güç sistemleri için tahrip edici sonuçlar ortaya çıkarabilir. Yıldırım düşmesi sonucu oluşan yıldırım darbe akımı elektronik cihazların bozulmasına sebep olarak ekonomik kayıplara neden olabilmektedir. Ayrıca yıldırım darbe akımına karşı gerekli tedbirlerin alınmadığı güç sistemlerinde oluşan aşırı akım ve buna bağlı olarak iletkenlerde oluşan aşırı ısınma, güç sistemlerinde problemlere sebebiyet verebilmektedir. Bir yıldırım darbesi deşarjı sonucunda elektrikli cihazların

devreleri zarar görebilir ve bu durum yangın ile sonuçlanabilir (4). Bu ve bunun gibi durumlar sonucunda can kayıpları yaşanabilmektedir. Yıldırımın darbelerinin canlı yaşamı üzerindeki çeşitli etkileri, bilim insanlarını bu konu üzerine araştırma yapmaya sevk etmiştir.

Literatürde yıldırım darbe akımı üzerine yapılan bir diğer çalışmada ise Gonos ve ark. (5) darbe akımı üreticilerinin tasarımı ve analizi için analitik bir metot sunmuştur. Bilgisayar programı ile bağlantılı olan bu analitik metot yardımıyla darbe akımının parametreleri ve yıldırım darbe akımı üreticisine ait parametre değerleri hesaplanabilmektedir.

Yıldırım ve etkilerini daha iyi analiz edebilmek adına yapılan bir diğer çalışma Machts ve ark. (6) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, klinik laboratuvarlarda kullanılan ve insan kafası boyutlarında üretilen kafa fantomlarına doğrudan bir yıldırım çarpması sırasında akım dağılımını ölçmek için bir deney düzeneği tasarlanması hedeflenmiştir. Machts ve arkadaşları oluşturdukları kafa fantomuna farklı özelliklere sahip 3 darbe üretici kullanarak farklı darbeler uygulamışlardır. Bu 3 darbe türünden birinin Marx üretici ile üretilen $1.2/50 \mu s$ ' lik (maksimum tepe değeri 450 kV, maksimum akım 2 kA) darbe gerilimi olduğu ifade edilmektedir. Diğer bir darbe türünün ise kombinasyon dalga üretici ile üretildiği ifade edilirken gerilim ve akım değerleri 12 kV ve 6 kA olarak belirtilmektedir. Üçüncü darbe türünün ise $10/350 \mu s$ (12 kV, 42 kA)' lik darbe akımı olduğu ifade edilmektedir.

Simülasyon destekli gerçekleştirilen bir diğer çalışmada Ioannou (7) metal oksit varistörlerin arıza tespitini belirleyebilmek amacıyla $8/20 \mu s$ yıldırım darbe akımı üretmek için yıldırım darbe akımı üretici devresini incelemiştir. Ioannou çalışmasında $8/20 \mu s$ yıldırım darbe akımı üretici devresinin parametre hesaplamalarını yapmıştır. Laplace dönüşümünü kullanarak gerçekleştirdiği devre analizi ile 300 kA tepe değerine sahip $8/20 \mu s$ darbe akımı üretebilen bir devre tasarlamıştır. Tasarladığı devrede darbe kondansatörleri $196.5 \mu F$ olarak ifade edilirken kondansatörlerin 20 kV ile şarj edildiği belirtilmektedir. Ioannou yaptığı hesaplamaların ardından tasarımını gerçekleştirdiği devre parametrelerini Pspice programı ile simüle etmiştir.

Carobbi ve ark. (8) IEC 61000-4-5 standardında belirtilen kombinasyon dalga üreticinin eşdeğer devre model parametre değerlerini incelemişlerdir. Carobbi ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışma ile eşdeğer devre model

parametrelerini türeterek tepe değeri, cephe süresi ve dalga şekli süresi ile karakterize edilen dalga şekillerinin açık devre gerilimini ve kısa devre akımını elde etmeye çalışmışlardır. Ek olarak çalışmada 1.2/50 μ s ve 8/20 μ s karakteristiklerine sahip standart dalga formlarına ait parametrik hesaplamalar da yapılmıştır.

Darbe akımı üretici ile ilgili bir başka simülasyon çalışması Wang ve ark. (9) 'na aittir. Wang ve arkadaşları, topraklama cihazlarının darbe karakteristiklerini araştırmak için kuvvetli akım topraklama test sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen test sistemi 20 m yarıçaplı bir dönüş elektrodu etrafına simetrik olarak yerleştirilmiş dört darbe akımı üreticinden oluşmaktadır. Her bir darbe akımı üreticinin maksimum 1000 kV ile şarj edildiği belirtilmektedir. Çalışmada yük direnci değiştirilerek 100 kA 8/20 μ s ve 15 kA 2.6/50 μ s darbe akımı üretildiği ifade edilmektedir.

Elektrik güç sistemlerinde yıldırıma karşı koruma elemanı olarak parafudrlar çok sık kullanılmaktadır. Bir atlama olayında parafudrdan akan darbe akımının geçişi sırasında parafudrun hat ucu ile toprak ucu arasında meydana gelen en büyük gerilim olarak ifade edilen artık gerilim (1), parafudrlar için önemli bir performans kriteridir. Parafudrlar üzerindeki artık gerilimi ölçebilmek için gerekli olan darbe akımı, laboratuvar ortamında darbe üreticileri ile üretilebilmektedir.

Kishore ve ark. (10) tasarımını ve geliştirmesini yaptıkları darbe akımı üretici ile 10 kA, 50 kV, 8/20 μ s darbe akımı elde etmişlerdir. Kishore ve arkadaşları artık gerilim ölçümlerini rezistif bir gerilim bölücü üzerinden gerçekleştirmişlerdir. Tasarımı gerçekleştirilen üreticinin gücü 5 kJ olarak ifade edilmektedir. Ayrıca 3.6 μ F' lık kondansatör bloklarından oluştuğu belirtilen darbe üreticinin 50 kV_{DA} gerilim ile şarj edildiği bilgisi aktarılmaktadır.

Bir başka çalışmada, Assis ve ark. (11) metal oksit parafudrların artık gerilim testlerini yapabilmek amacıyla darbe akımı üretici kullanmışlardır. Kullanılan darbe akımı üreticinin 12 kademeli ve 120 kJ gücünde olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca doğrultma katı ile 1.2 MV_{DA} gerilim seviyelerine çıkıldığı belirtilen sistemin yapısında 12 şarj kondansatörü ve 12 bobin (10 adet 30 μ H, 2 adet 10 μ H) bulundurduğu aktarılmaktadır. Çalışma ile 8/20 μ s standartlarındaki 5 kA ve 10 kA' lik deşarj akımları için tatmin edici sonuçların elde edildiği ifade edilmektedir.

Parafudrlar elektrik güç sistemlerini yıldırım darbelerine ve ani gerilim yükselmelerine karşı koruyan en önemli koruma elemanlarından birisidir. Bu

sebeple güç sistemlerinde parafudrların sağlıklı çalışıp çalışmadığı son derece önemlidir. Parafudrların gerçek yıldırım darbeleri altında test edilmeleri pek mümkün olmadığından test amaçlı yıldırım darbe akımı üreteçleri geliştirilmektedir. Halim ve ark. (12) bu amaçla gerçekleştirdikleri çalışma ile 8/20 μ s dalga şekline sahip bir yıldırım darbe akımı üretici tasarlamışlardır. Halim ve arkadaşları üreteç devresinin parametrelerini hesaplandıktan sonra yıldırım darbe akımı dalga şeklinin benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca Halim ve arkadaşlarının geliştirdiği yıldırım darbe akımı generatörünün 100 kV gerilim ve 4 kA akım seviyelerinde çalışmaya uygun olduğu ifade edilmektedir.

Bir başka darbe akımı üretici tasarımı ve üretimi ise Haryono ve ark. (13) tarafından gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar yaptıkları çalışma ile 8/20 μ s dalga şekline sahip bir yıldırım darbe akımı üretici tasarlayarak, yıldırım darbe akımı üretici devresindeki endüktansın ve kapasitenin yıldırım darbe şekline olan etkisini incelemişlerdir. Yıldırım darbe akımı üretici devresindeki endüktans değerinin artırılması ile yıldırım darbe akımının tepe değerinin azalacağı ve yıldırım darbe akımı üretici devresindeki kapasite değerinin artırılarak daha yüksek genlikli bir dalga şekli elde edileceği sonucuna varmışlardır.

Rousseau ve ark. (14) çoklu darbe üretici yapmak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kurulan test sisteminin yıldırım darbe akımını simüle edebildiği rapor edilmiştir. 8/20 μ s dalga formunda olan darbe akımının birkaç kA ile 100 kA arasında değişebildiği aktarılmıştır. Geliştirilen darbe üreticinin zaman kontrollü bir tetikleme kanalı ile tetiklenen 10 adet bağımsız deşarj devresine sahip olduğu bildirilmiştir.

Bing ve ark. (15) yıldırım darbe akımı üretmek için bir darbe akımı üretici tasarlayarak benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışma ile 4 farklı ayarlanabilir zaman kontrollü darbe şekli elde edilebilmektedir. Darbe akımı üretici ile 200 kA, 540 kA, 2 kA ve 400 A tepe değerine sahip yıldırım darbe akımı üretilmektedir.

Pouraimis ve ark. (16) gerçekleştirdikleri çalışma ile kıvılcım aralığı plazma kapatma anahtarı olarak ifade ettikleri anahtarı tetiklemek için nanosaniye mertebelerinde tetikleme yapabilen bir üreteç tasarlamış ve üretmişlerdir. Çalışmada kıvılcım plazma kapatma anahtarının 200 kA, 10/350 μ s darbe akım üreticinin en önemli bileşenlerinden biri olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca darbe

tetikleme üretici ile 35 ns yükselme süresine sahip 80 kV gerilim darbeleri üretilebildiği belirtilmektedir.

Güneş panelleri doğrudan veya dolaylı olarak yıldırım darbelerine maruz kalabilmektedir. Bu yıldırım darbeleri de elektrik güç sistemlerinde çeşitli arızalara yol açabilmektedir. Salman ve ark. (17) aşırı gerilim problemlerine karşı tasarladıkları aşırı gerilim koruma cihazının testini gerçekleştirebilmek amacıyla bir darbe üretici tasarlamışlardır. Tasarlanan darbe üretici ile 750 V tepe değerine sahip darbe gerilimi üretildiği ifade edilmektedir. Ayrıca çalışmada darbe üretici ile 1.2/50 μ s' lik gerilim darbesinin yanı sıra 8/20 μ s'lik akım darbesinin de üretilebildiği ifade edilmektedir.

Yılmaz (18) 2019 yılında gerçekleştirdiği çalışma ile darbe akımlarının türlerine göre genel tarifini yapmıştır. Çalışmasında, genel tarifini yaptığı darbe akımlarını üretmek için gerekli olan üreteç yapılarına ve hesaplamalarına yer vermiştir. Hesaplamalarını yaptığı devre modellerinin benzetim çalışmalarını gerçekleştirerek deney seti oluşturmuştur. Yılmaz, çalışması ile 4/10 μ s, 8/20 μ s ve 30/80 μ s standartlarında darbe akımı üretmeyi hedefleyerek deney sistemini buna göre oluşturduğunu ifade etmektedir. 4/10 μ s standardındaki darbe akımı için tepe değer 100 kA olarak ifade edilirken 30/80 μ s standardındaki darbe akımı için tepe değer 500 A olarak ifade edilmektedir.

Zirnheld ve ark. (19) düşük empedanslı AA ve DA iletim hatlarında kullanılan parafudrların testleri için kullanılan 6 katlı bir Marx üretici üzerinde çalışarak, hata toleransını iyileştirmeye çalışmışlardır. Üzerinde çalıştıkları sistemin, her birinin 100 kV gerilime sahip olan altı kademedan meydana geldiğini 0.5 μ F kapasiteye sahip bir yapıdan oluştuğunu belirtilmişlerdir. Marx üretici yardımıyla 600 kV, 5/1000 μ s formunda ve 15 kJ enerjiye sahip dalga şekli üretildiğini ifade etmişlerdir.

Yüksek genlik değerine sahip darbe elektrik alanı (PEF), gıda endüstrisinde ısıtma işlemi gerektirmeyen süreçlerde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Wang ve ark. (20) gerçekleştirdikleri çalışma ile IGBT tabanlı 12 kV yüksek gerilim darbe üretici tasarlamışlardır. Çalışmada anahtarlama elemanı olarak 1200 V ve 1200 A değerlerindeki akıllı IGBT modüllerinin kullanıldığı belirtilmektedir.

Baek ve ark. (21) yükseltici tip DA-DA dönüştürücü kullanarak tekrarlı darbe gerilimleri üreten bir devre tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada darbe gerilimi üreten devreye seri bağlı kondansatörler ve bipolar transistörlerin

kullanıldığı ifade edilmektedir. Çalışma ile transformatör kullanılmadan birkaç kHz frekansa kadar darbe gerilimi üretilebileceği aktarılmıştır. Ayrıca 1.8 kV – 40 A ile 20 kV – 300 A'lık darbe gerilimleri üretilebildiği belirtilmiştir.

Ratna Raju ve ark. (22) hızlı yükselme süresine sahip yüksek yoğunluklu elektromanyetik darbe üretmek amacıyla hızlı yükselme süreli yüksek gerilim darbe üretici tasarlamış ve üretmişlerdir. Yüksek gerilim darbesinin Marx üretici ile üretildiği ifade edilmektedir. 10 kademeli Marx üreticinin giriş gerilimi 20 kV olarak belirtilmektedir. Çıkış gerilimi ise 200 kV olarak belirtilmektedir. Çıkış akımının ise 50 ns yükselme süresine ve 5 kA tepe değerine sahip olduğu ifade edilmektedir.

Tasarımı ve üretimi yapılan bir diğer darbe üretici ise Gómez ve ark. (23) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile üretilen darbe setinin taşınabilir bir darbe gerilimi üretici olduğu ve 20 kV tepe değerine kadar darbe gerilimi üretebildiği ifade edilmektedir. Çalışmada, endüstride ve laboratuvarlarda kullanılan darbe üreteçlerinin çok pahalı olduğu ifade edilirken genellikle üreteçlerin bir yerden başka bir yere taşıma işleminin zor olduğu belirtilmektedir. Gomez ve arkadaşları üretimini yaptıkları darbe seti ile taşınması kolay bir darbe üretici geliştirdiklerini ifade etmektedirler. Ayrıca çalışma ile geliştirilen darbe setinin ticari darbe setleriyle karşılaştırıldığında zaman ve dalga biçimi açısından tatmin edici sonuçlar elde edildiği ifade edilmektedir.

Kompakt Marx üreteçleri, çok kısa sürede yüksek güç sağlamalarıyla bilinmektedir. Prabakaran ve ark. (24) tarafından bu amaçla tasarlanan 10 katlı Marx üretici ile maksimum 300 kV tepe değerine sahip, 2.4 ns yükselme süreli ve 20 ns darbe genişliğine sahip darbe gerilimi üretilebilmektedir. Çalışma ile geliştirilen Marx üretici sayesinde 100 Ω 'luk bir yük ile 500 MW'lık bir güç iletimi yapılabildiği ifade edilmektedir.

Hlavacek ve ark. (25) tepki süresi birkaç ns olan hızlı rezistif bir gerilim bölücü için test kaynağı olarak kullanılacak çok hızlı bir darbe gerilimi üretici tasarlamış ve üretimini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada darbe gerilimi üretici ile birlikte 2 adet rezistif gerilim bölücünün de tasarlandığı ifade edilmektedir. Darbe gerilim üreticinin 100 kV'a kadar gerilim üretebildiği ve 50 ns'den daha kısa yükselme süresine sahip olduğu ifade edilmektedir.

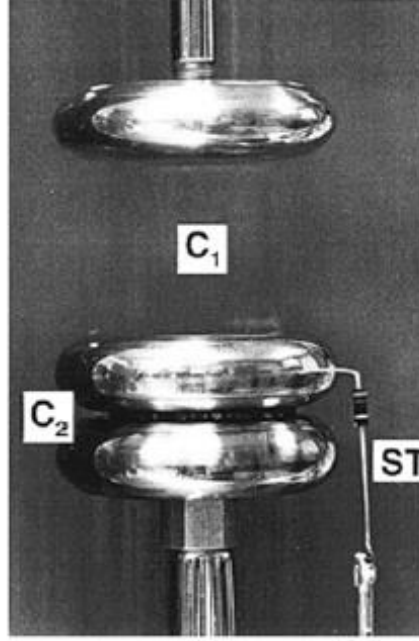
Bir başka darbe gerilimi üretici ise Mehta ve ark. (26) tarafından tasarlanarak geliştirilmiştir. Mehta ve arkadaşları tek katlı ve çok katlı darbe

gerilimi üreticinin deney setini oluşturmakla kalmayıp aynı zamanda Matlab Simulink yazılımı aracılığıyla sistemin benzetim çalışmasını da gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen tek katlı darbe gerilimi üretici için darbe yükselme süresi 1 μ s olarak ifade edilirken çok katlı darbe gerilimi üretici için darbe yükselme süresi 1.084 μ s ve darbe gerilimi tepe değeri 485.8 kV olarak ifade edilmektedir.

Hinojosa ve ark. (27) ultra geniş bant uygulamaları için nanosaniyeler mertebesinde, pille çalışan ve kompakt bir darbe gerilimi üretici tasarlamışlardır. Tasarlanan darbe gerilimi üretici 14.8 V - 30 kV arasında şarj edilirken çıkışında 30 kV ila 240 kV arasında bir gerilim elde edilebilmektedir. Ayrıca Marx generatörünün çıkışında ölçülen akımın yaklaşık 6 kA olduğu ifade edilmektedir.

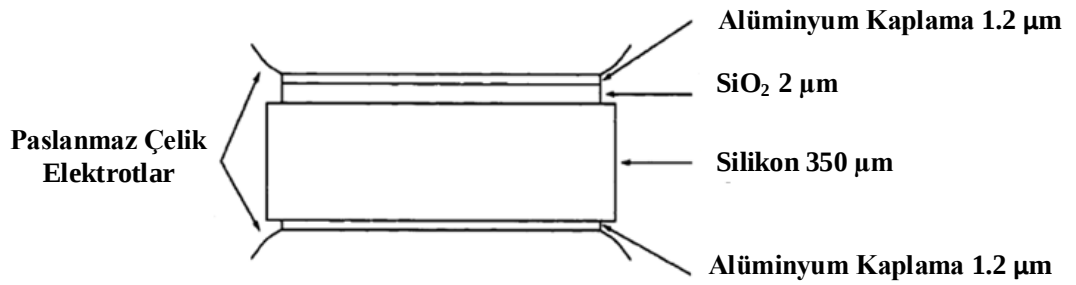
Kapasitif ve omik gerilim bölücüler darbe akım üreteçlerinin ürettiği artık gerilimleri ölçme amaçlı kullanılmaktadır. Literatürde gerilim bölücülerle ilgili olarak birçok çalışma mevcuttur. Yapılan çalışmalardan bazılarına aşağıda yer verilmektedir.

Jayaram ve ark. (28) gerçekleştirdikleri çalışma ile yüksek gerilim darbe gerilimi ölçümleri için geliştirdikleri yeni bir kapasitif gerilim bölücünden elde ettikleri deneysel sonuçları bildirmişlerdir. Gerilim bölücünün alçak gerilim kolunun, birim alan başına çok büyük kapasiteli kondansatörler oluşturmak için silikon oksitin termal olarak büyütülmesiyle hazırlandığı ifade edilmektedir. Bu şekilde tasarlanan alçak gerilim kolu ile bölücünün çevirme oranının 1:10000' den büyük bir şekilde elde edilebileceği belirtilmektedir. Jayaram ve arkadaşları nihai tasarım olarak hem yüksek gerilim hem de alçak gerilim kolunu bir pleksiglas silindirik yapıdan tasarlamışlardır. Bu yapıyı barındıran elektrot yapısı Şekil 2.1' de verilmiştir. Çalışmada değişken elektrot aralığına sahip üstteki iki elektrodun yüksek gerilim kolunu (C_1) oluşturduğu ifade edilirken alttaki silisyum dioksitli (SiO_2) iki elektrodun alçak gerilim kolunu (C_2) oluşturduğu ifade edilmektedir. Ayrıca devre endüktansını düşük tutabilmek için bölücüyü osiloskopa bağlayan kablunun mümkün olduğunca kısa olması gerektiği ifade edilmektedir.



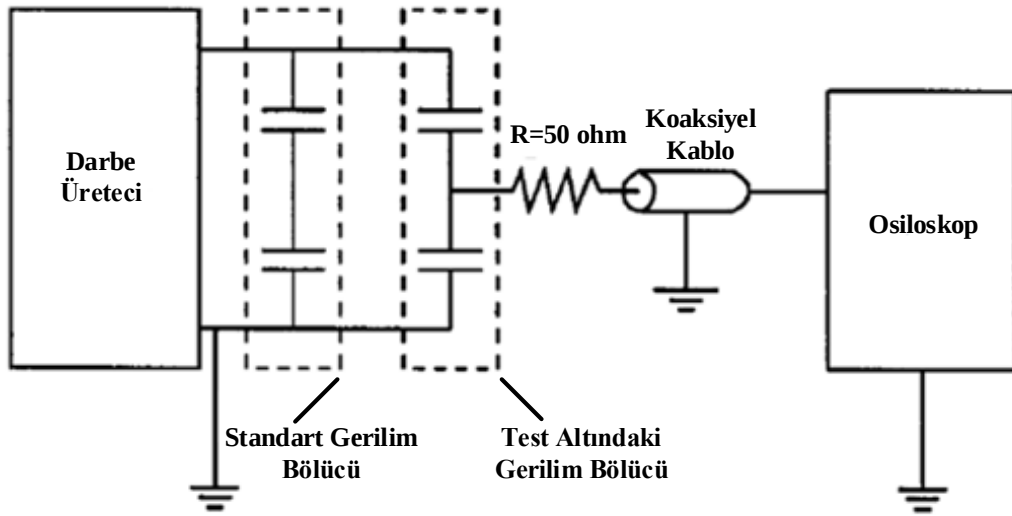
Şekil 2.1. Jayaram ve arkadaşları tarafından tasarlanan kapasitif gerilim bölücünün elektrot yapısı (28)

Şekil 2.1’ de yer alan C_1 ifadesi yüksek gerilim kolunu, C_2 ifadesi alçak gerilim kolunu ve ST ifadesi ise seri bağlantı ucunu temsil etmektedir. Jayaram ve arkadaşlarının tasarladıkları gerilim bölücüye ait alçak gerilim kolunun iç yapısı Şekil 2.2’ de paylaşılmıştır.



Şekil 2.2. Jayaram ve arkadaşları tarafından tasarlanan kapasitif gerilim bölücünün alçak gerilim kolu (28)

Jayaram ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandıkları ölçme sisteminin yapısı Şekil 2.3’ te verilmiştir.



Şekil 2.3. Jayaram ve arkadaşlarının çalışmasına ait darbe ölçümlerinin şeması

Merev (29) çalışmasında ulusal bir kalibrasyon standardı oluşturmak amacıyla yüksek doğru gerilim bölücüsü tasarımı ve yapımını gerçekleştirmiştir. Bölücünün 100 kV tepe değerine sahip olduğu ifade edilmektedir. Merev çalışmasında 400 kV ve % 0.8 ölçüm belirsizliğine sahip referans ölçüm sisteminin bir parçası olan yüksek doğru gerilim bölücü kullanmıştır. Merev tasarımını ve yapımını gerçekleştirdiği yüksek doğru gerilim bölücüsünde yüksek gerilim koluna ait 100 adet direnci yerleştireceği taşıyıcı malzemeyi pleksiglas olarak seçmiştir. Bölücüde kullanılan dirençlerin kaçak akımları en aza indirecek yapıda, yüksek gerilim elektrodu ile toprak elektrodu arasına seri olarak yerleştirildiği ifade edilmektedir. Ayrıca çalışmada yüksek gerilim kolunu oluşturan 100 adet direncin 1 M Ω değerinde 2 W gücünde Megatron 9070 marka sarım direnç olduğu ifade edilmektedir. Çalışmada kullanılan dirençlerin frekansa bağlı olduğu aralığın 50 Hz -10 Mhz olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca gerilim bölücünün alçak gerilim kolunu oluşturan direncin ise 100 k Ω değerinde 0.2 W güce sahip RHOPPOINT/E10C100K marka sarım direnç olduğu belirtilmektedir.

Merev ve ark. (30) gerçekleştirdikleri çalışma ile maksimum çalışma gerilimi 100 kV olan gaz yalıtımlı bir kapasitif gerilim bölücü tasarlamış ve üretmişlerdir. Gerilim bölücünün yüksek gerilim ve alçak gerilim elektrodu olmak

üzere iki adet silindirik elektrottan oluştuğu ifade edilmektedir. Ayrıca tasarlanan gerilim bölücüdeki elektrotların birbirine çok yakın olmasından dolayı korona, atlama ve deşarj oluşmaması için elektrotların bulunduğu ortamın SF₆ gazı ile doldurulduğu ifade edilmektedir. Tasarlanan gerilim bölücünün alçak gerilim kolunu 50 nF değerinde mika kondansatör grubu oluşturmaktadır. Yapımı gerçekleştirilen gerilim bölücünün çevirme oranı 1:1338.4 olarak belirtilmektedir.

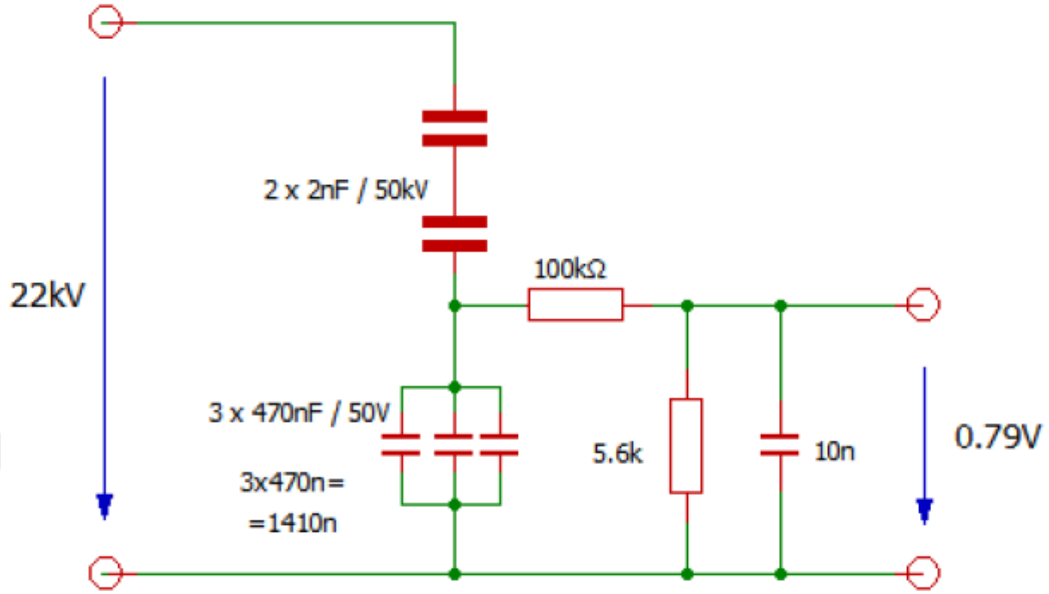
Liu ve ark. (31) laboratuvarlarında kullandıkları elektron ışını hızlandırıcısının yüksek gerilim darbelerini ölçmede kullandıkları koaksiyel kapasitif gerilim bölücüsünü incelemişlerdir. Kapasitif gerilim bölücünün elektriksel özelliklerini teorik olarak analiz etmişlerdir ve gerilim bölücünün parametrelerini hesaplamışlardır. Ayrıca kapasitif gerilim bölücünün yükselme süresinin 8 ns ve çevirme oranının 1:2000' in üzerinde olduğu belirtilmektedir.

Hobejogi ve ark. (32) 1:1200 çevirme oranına sahip koaksiyel kapasitif gerilim bölücü tasarlamışlardır ve üretimini yapmışlardır. Bölücü ile 200 kV seviyelerine kadar gerilim darbelerinin ölçülebildiği ifade edilmektedir. Ayrıca gerilim bölücü devre modelinin, empedans analizörü kullanılarak standart yüksek gerilim problemleriyle karşılaştırıldığı ve doğrulandığı ifade edilmektedir.

Çoban (33) yüksek gerilimlerin oluşturduğu elektrik alanların kemik kanseri üzerindeki etkilerini incelediği çalışmasında rezistif bir gerilim bölücü tasarımını ve üretimini yapmıştır. Gerilim bölücünün toplam direnç değeri 50 M Ω olarak ifade edilirken gerilim bölücünün çıkış direnci 50 k Ω olarak belirtilmektedir. Ayrıca dirençlerin gücü de 2 W olarak aktarılmaktadır. Gerilim bölücü yapılırken yüksek gerilimde sivri uç etkisini azaltabilmek için direnç bağlantı noktalarının eğrilik yarıçaplarının mümkün olduğunca büyütüldüğü ifade edilmektedir. Gerilim bölücünün çevirme oranının 1:1041 olarak ölçüldüğü belirtilirken kararlı çalışma gerilim aralığı da 0 - 30000 V olarak ifade edilmektedir.

Hrbac ve ark. (34) yüksek gerilim ölçümlerinde kullanılan kapasitif gerilim bölücünün geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmayla, gerilim bölücünün parametrelerinin analizi ve optimizasyonu için bir yöntem sunmaktadır. Çalışmada kullanılan bölücünün, yüksek gerilim güç sistemlerinde birleşik gerilim ve akım sensörünün bir parçası olduğu ifade edilmektedir. Gerilim bölücünün çevirme oranı 1:27690 olarak ifade edilirken 50 Hz frekans için faz kayması 0.44° olarak belirtilmektedir. Ayrıca devrede hemen kendisinden önce kullanılan dirençlerle birlikte 10 nF' lık kondansatörün alçak geçiren filtre görevi gördüğü ve

kesim frekansının 3114 Hz olduğu belirtilmektedir. Şekil 2.4’ te Hrbac ve arkadaşlarının tasarladığı kapasitif gerilim bölücüye ait devre şeması paylaşılmıştır.



Şekil 2.4. Hrbac ve arkadaşları tarafından tasarlanan kapasitif gerilim bölücünün devre şeması (34)

Yıldırım darbe akımı üretici ile alakalı literatürde yer alan çalışmalardan bazılarına ilişkin detaylar yukarıdaki gibidir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde üretilen yıldırım darbe akımlarının tepe değerleri ve güçleri birbirinden farklılıklar gösterebilmektedir. Tez çalışması ile alçak gerilim parafudrlarının testlerinin yapılabilirdiği 8/20 μs dalga formunda yıldırım darbe akımı üretilebilen bir darbe akımı üretici geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Tez kapsamında yürütülen çalışma 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, standart yıldırım darbe akımını üretebilmek için gerekli olan yıldırım darbe akımı üretici devresi analiz edilerek ihtiyaç duyulan elektriksel parametre değerleri hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise hesaplanan değerlere göre darbe setinin kondansatör bloğu, ön direnç ve doğrultma katları, kapasitif ve omik gerilim bölücü, küre küre elektrot anahtarlama sistemi, dalga şekline etkiye bulunan bobin ve direnç üretimleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında ise geliştirilen deney sistemiyle üretilen yıldırım darbe akımlarının ölçümleri bir şönt direnç yardımıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

3. AŞIRI GERİLİMLER VE AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA

Elektrik güç sistemleri belirli ve sabit bir işletme geriliminde çalışmaktadırlar. Bu işletme gerilimlerinde çeşitli sebeplere bağlı olarak yükselmeler meydana gelebilmektedir. Bu gerilim yükselmeleri literatürde aşırı gerilimler olarak bilinmektedir.

Aşırı gerilimler iç ve dış aşırı gerilimler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gerilim seviyesi 220 kV' a kadar olan güç sistemlerinde yalıtım boyutlandırması ve koordinasyonu açısından genellikle dış aşırı gerilimler önemlidir. Gerilim seviyesi 380 kV' un üzerinde olan sistemlerde ise yalıtım boyutlandırması ve koordinasyonu açısından genellikle iç aşırı gerilimler önemlidir (1).

Devre açma-kapamada, toprak ve faz kısa devrelerinde ve rezonans olaylarında meydana gelen aşırı gerilimler, iç aşırı gerilim olarak adlandırılırken, atmosferik olaylardan kaynaklanan aşırı gerilimler, dış aşırı gerilimler olarak adlandırılmaktadır. İç aşırı gerilimlerin genliği genel olarak işletme gerilimi ile ilgiliyken, dış aşırı gerilimlerin genliği işletme gerilimine bağımsızdır (1).

Aşırı gerilimler, elektrik güç sistemlerinde aygıtların yalıtımını zorlayıp, bozabilmektedir. Bu durum, katı sıvı ve gaz yalıtkanlarda atlamalar, hatta delinmelere sebebiyet verebilmektedir. Aşırı gerilimlerin sebep olabildiği bu gibi durumlara karşı tedbir amacıyla kullanılan koruma aygıtlarının başında parafudrlar ve koruma elektrodları gelmektedir.

3.1 İç Aşırı Gerilimler

İç aşırı gerilimler, yüksek gerilim şebekesinin özelliğine göre orta veya yüksek frekanslı, az veya aşırı sönümlü ve kısa süreli gerilimlerdir. İç aşırı gerilimler genellikle frekansın değerine göre işletme frekansının yarı dalgası içinde sönürler ve gerilim yükselmesi olayın türüne göre anma geriliminin % 70' i ile % 80' i kadar olabilir (1). İşletme frekanslı gerilim yükselmeleri, tesisin kendisinden kaynaklı bir durum olduğu için iç aşırı gerilimler olarak tanımlanmaktadır. İç aşırı gerilimlerin sebepleri aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.1.1 Genaratör Yükünün Kalkması

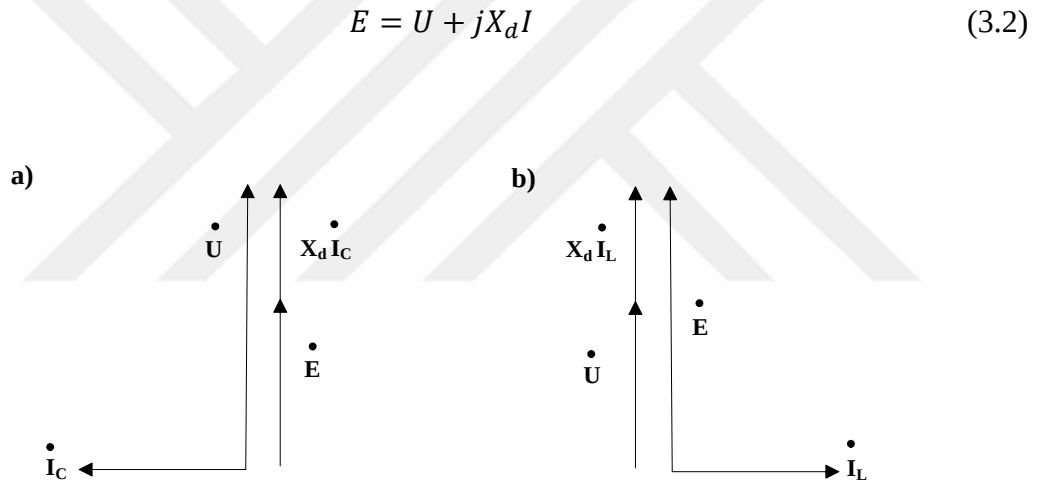
Bir güç sisteminde generatörün beslediği bir yükün herhangi bir sebeple ani olarak kalkması sonucu generatörün iç gerilim düşümü sıfıra düşmektedir. Bu

durumda yük akımı ile oluşan endüvi reaksiyonu da gerçekleşmeyecektir. Böyle bir olayda ani bir gerilim yükselmesi sonucu aşırı gerilim oluşmaktadır.

Sürekli çalışmada generatörün uçları arasındaki U gerilimi ile E e.m.k arasında denklem (3.1) ile belirtilen bir ilişki vardır.

$$E = U + (R + jX_d)I \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)' de I , bir faz sargısından geçen akımı, R sargı direncini ve X_d ise faz sargısının senkron reaktansını ifade etmektedir. Denklem (3.1) ifadesinde R sargı direnci ihmal edilirse denklem (3.2) ifadesi elde edilmektedir. (3.2) denklemini ile verilen eşitlik için reaktif akımla yüklenen generatöre ait fazör diyagram Şekil 3.1' de paylaşılmıştır.



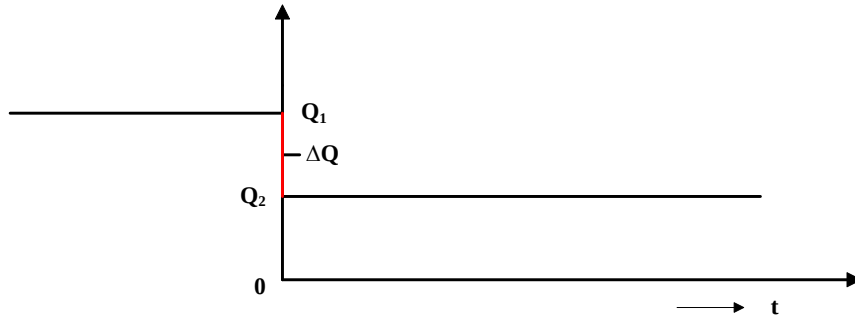
Şekil 3.1. Reaktif akımla yüklenen bir generatörün fazör diyagramları (1); a) Saf kapasitif yük için, b) Saf endüktif yük için; U : Sargı ucundaki gerilim, E : Elektromotor kuvvet, I_c : Kapasitif yük akımı, I_L : Endüktif yük akımı

Sürekli çalışmada boyuna gerilim düşümü (3.3) denklemini ile verilebilir.

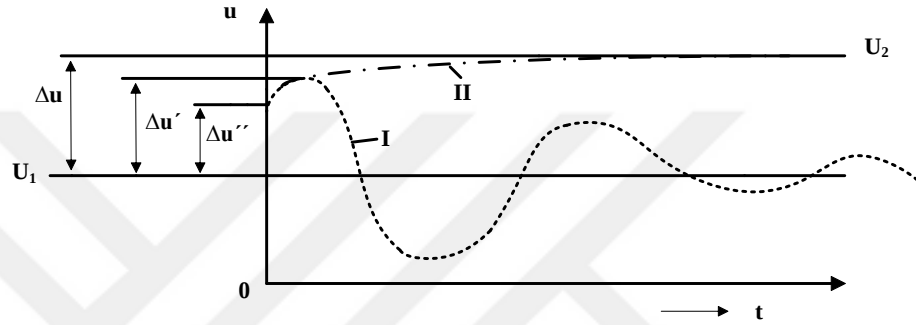
$$\Delta U = X_d I \sin \varphi \quad (3.3)$$

Generatörün beslediği yük kalktığı anda $I = 0$ olduğu için gerilim düşümü de sıfır olmaktadır. Generatörler omik ve endüktif yüklendikleri durumda $E > U$ dur. Gerilim düşümü sıfır olduğu anda uyarmanın sabit kalması şartı ile gerilim ΔU kadar büyüyerek $U = E$ olmaktadır (1). Yük kalkması sonucu oluşan bu gerilim yükselmesi Şekil 3.2' de paylaşılmıştır.

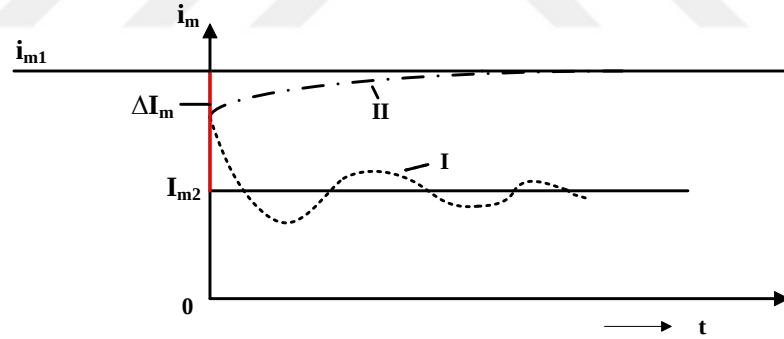
a)



b)



c)

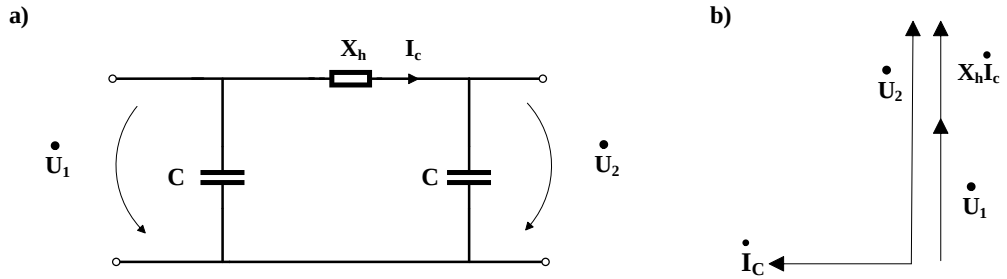


Şekil 3.2. Yük kalkması sonucu gerilim yükselmesi (1); a) Ani yük kalkışı, b) Generatör gerilimindeki yükselme, c) Uyarma akımı değişimi; ΔQ : Reaktif yük azalması, u : Generatör gerilimi, $\Delta u''$: Başlangıç gerilimi artışı, $\Delta u'$: Geçici gerilim artışı, i_m : Uyarma akımı, I: Uyarma regülatörünün faaliyete geçtiği durum, II: Regülatörsüz durum

3.1.2 Boşta Çalışan Hattın Sonunda Gerilim Yükselmesi (Ferranti Olayı)

Kısa ve orta uzunluktaki havai hatların boşta çalışması neticesinde hat sonundaki gerilim, hat başı gerilimine göre yükselmektedir. Ferranti olayı adı verilen bu durum hattından kapasitesinden dolayı kaynaklanmaktadır. Ferranti olayında hat başından hat sonuna kadar kapasitif bir akım akmaktadır.

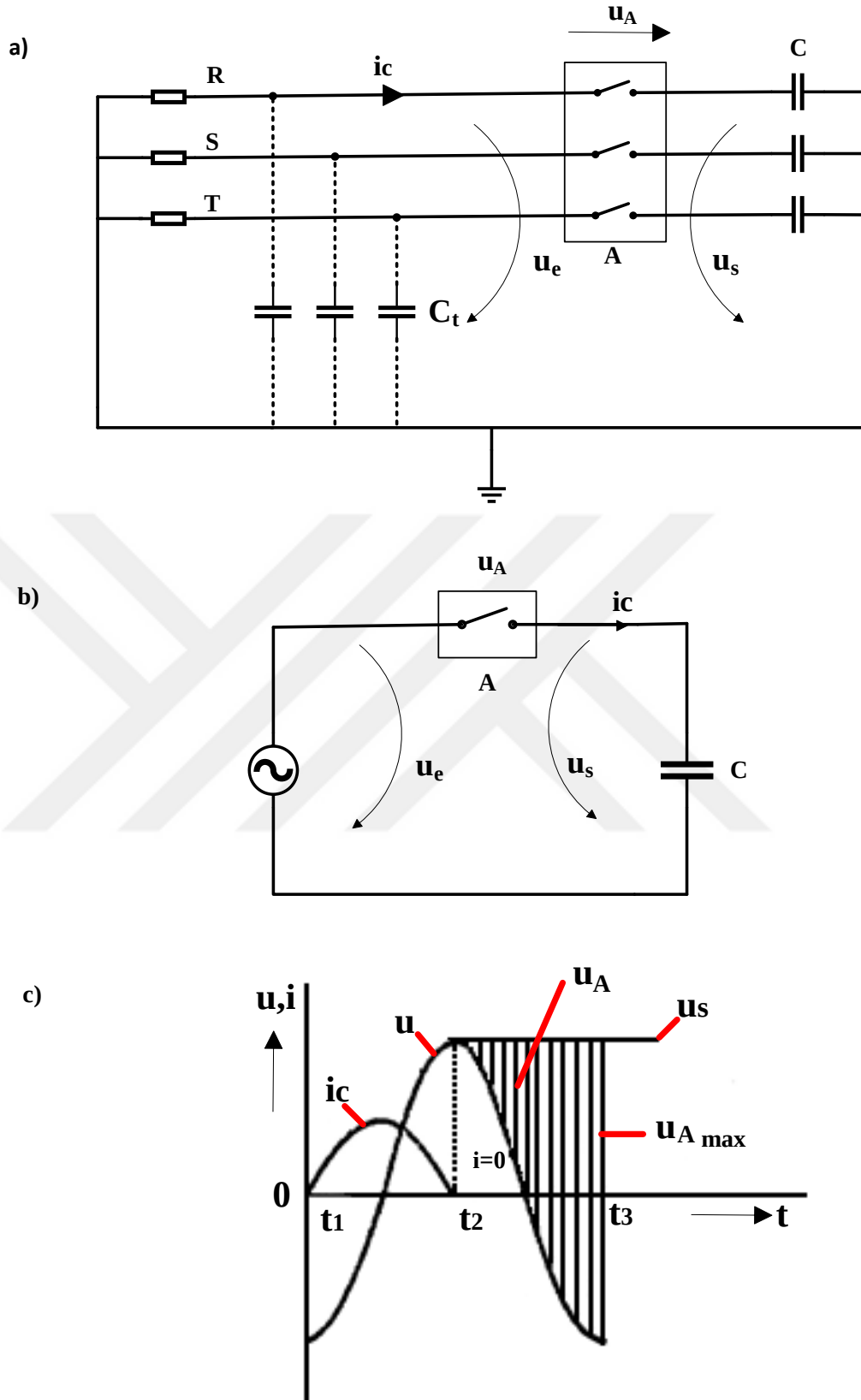
Şekil 3.3' te gösterilen fazör diyagramından da anlaşılacağı gibi bu kapasitif akımın hattın endüktif reaktansı üzerinde oluşturduğu gerilim düşümü, hat başı gerilimi ile aynı doğrultuda olduğundan bununla toplanmaktadır (1).



Şekil 3.3. Boşta çalışan hattın sonundaki gerilim yükselmesi (1); a) Hattın eşdeğer devre modeli, b) Fazör diyagramı; U_1 : Hat başı gerilimi, U_2 : Hat sonu gerilimi, I_c : Kapasitif hat akımı, X_h : Hattın reaktansı, C : Hattın kapasitesi

3.1.3 Kapasitif Devrenin Açılması

Kapasitif devrenin açılması ile ortaya çıkan aşırı gerilime yıldız noktası topraklanmış veya yalıtılmış üç fazlı kondansatör bataryası devresinin açılması örnek olarak gösterilebilir (1). Şekil 3.4' te yıldız noktası topraklanmış kondansatör bataryası devresinin açılması esnasında anahtar kontaklarında gerilim yükselmesi verilmiştir.



Şekil 3.4. Yıldız noktası topraklanmış kondansatör bataryası devresinin açılması durumunda anahtar kontakları arasındaki gerilimin yükselmesi (1); a) Üç kutuplu bağlantı şeması, b) Devrenin R fazına ait bir kutuplu eşdeğer şema, c) Güç anahtarına ait akım ve gerilim eğrisi

R fazına ait bir kutuplu eşdeğer şemada kesici açıldığında u_s , u_{emax} gerilimi ile aynı seviyede olacağından, u_e gerilimi negatif olarak maksimum değerine ulaştığı anda kesicinin uçları arasında (3.4) bağıntısı ile ifade edilen bir gerilim farkı oluşmaktadır.

$$\Delta U = 2u_{emax} = 2u_s \quad (3.4)$$

3.1.4 Toprak Teması veya Kısa Devre Arızaları ile Oluşan Aşırı Gerilimler

Yüksek gerilim şebekesinde, toprağa karşı izolasyon hataları veya kısa devreler oluştuğunda sağlam fazlarda işletme frekansında meydana gelen gerilim yükselmeleri olarak ifade edilebilirler. Bu tip gerilim yükselmelerinde şebeke yıldız noktasının topraklanıp topraklanmaması önem arz etmektedir. Yıldız noktası yalıtılmış veya söndürme bobini üzerinden topraklanmış şebekelerde toprak ve faz teması halinde topraklama katsayısı 1 olurken, yıldız noktası düşük Ω değerine sahip bir direnç üzerinden topraklanan şebekelerde bir toprak kısa devresi durumunda topraklama katsayısı 0.75 ile 0.98 arasında olmaktadır (1).

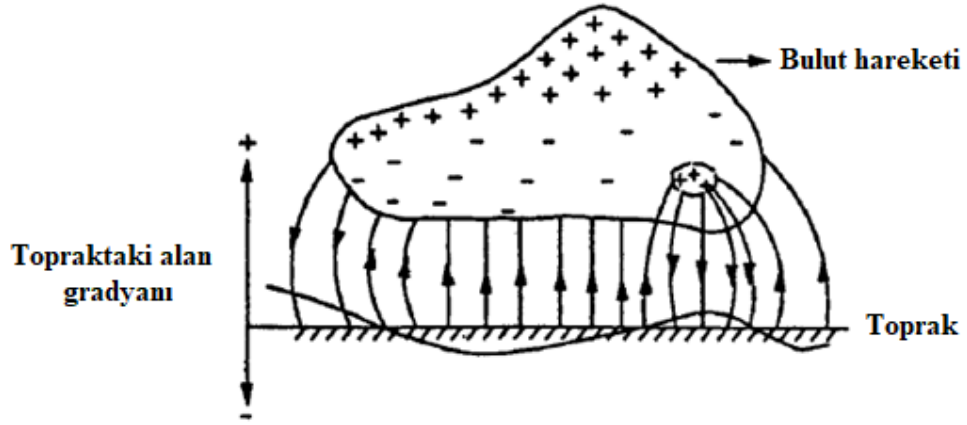
3.2 Dış Aşırı Gerilimler

Elektrik güç sistemlerinde dış aşırı gerilimler, sistemin herhangi bir kısmına doğrudan yıldırım düşmesiyle ya da tesirle elektriklenme ile oluşmaktadırlar. Güç sistemindeki yıldırım aşırı gerilimleri, bir buluttan dünyaya yıldırım deşarjı sırasında toprağa akan büyük akımlardan kaynaklanmaktadır. Böyle bir deşarj sırasında nesne (örneğin bir iletim hattı) toprağa giden deşarj yolunun bir parçası olabilir (doğrudan yıldırım düşmesi) veya indüklenen aşırı gerilimlerden dolayı olarak etkilenebilir (tesirle elektriklenme) (35).

3.2.1 Yıldırımın Doğası

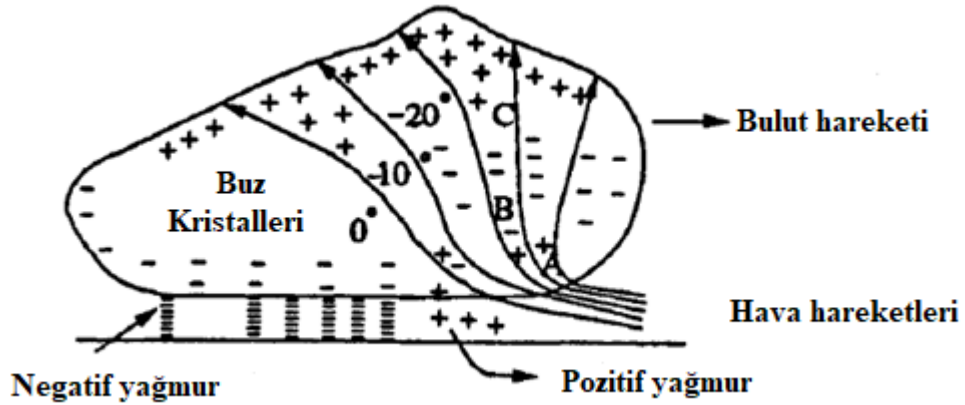
Yıldırım, kabul edilen teorilere göre genellikle tabiat tarafından, pozitif yüklü iyonosfer ile negatif yüklü dünya arasındaki dinamik dengeyi sürdürmek için üretilmektedir (36).

Fırtınalar esnasında pozitif ve negatif yükler hava akımının hareketiyle bulutun üst katmanında buz kristalleri ve alt katmanında yağmur oluşturarak dağılmaktadır (37). Bu fırtınalar esnasında bulutların tabanında negatif yük birikirken üst kısımların pozitif olduğu kabul edilmektedir, bu durum Şekil 3.5’ te görülmektedir (35).



Şekil 3.5. Bir buluttaki olası yük dağılımına karşılık gelen yere yakın alan gradyanı (38)

Şekil 3.6' da Simpsons' ın teorisine göre oluşturulan bulut modeli paylaşılmıştır.

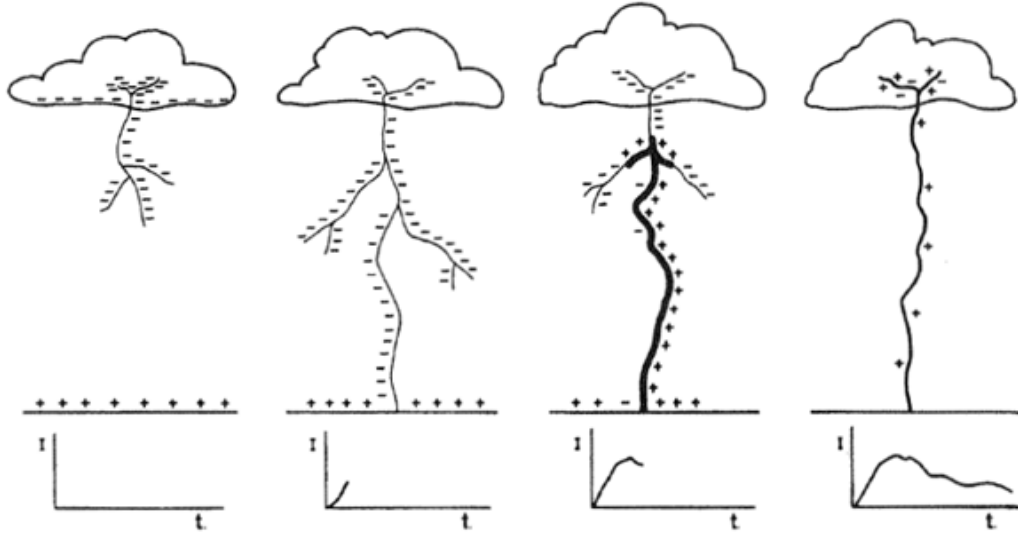


Şekil 3.6. Simpsons' ın teorisine göre bulut modeli (38)

Buluttaki deşarj faaliyetleri ile başlayan hava olayının doğrultusu yeryüzü yönünde olmaktadır (35).

Korona deşarjları bulut tabanında başlamaktadır ve toprağa giden kanal ilk önce lider vuruş adı verilen kademeli bir deşarj ile kurulmaktadır.

Topraklama noktasında, yıldırımın bilinen hasarından sorumlu olan, onlarca kiloamper mertebesine ulaşan ağır bir darbe akımı meydana gelmektedir (35). Akım darbesi birkaç mikrosaniyede tepe değerine yükselip, mikrosaniyeler mertebesinde azalmaktadır (39). Şekil 3.7' de yıldırım deşarjının oluşum aşamaları gösterilmiştir.



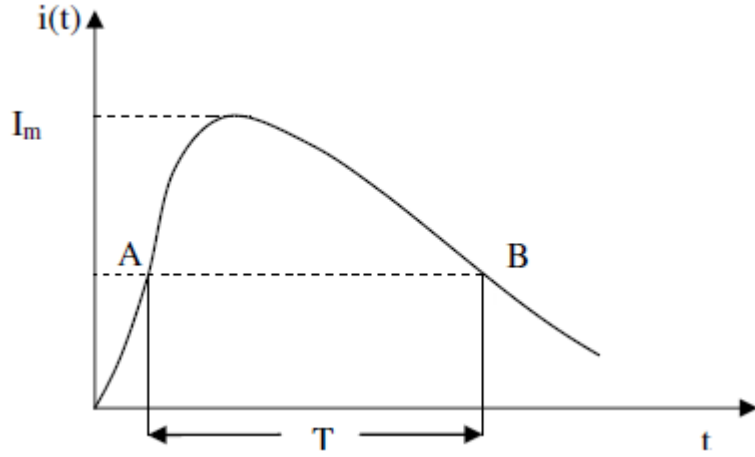
Şekil 3.7. Yıldırım deşarjının oluşum aşamaları ve buna karşılık gelen yıldırım akımının oluşumu (37)

3.2.2 Yıldırım Akımları

Yıldırım akımı darbe karakteristiğinde olmakla beraber, değeri sıfırdan tepe değeri kadar hızla yükselmektedir. Yıldırım akımı tepe değeri, sıfır değeri ulaşma süresi ise yükselme süresine göre kısmen biraz daha yavaş gerçekleşmektedir. Yıldırım akımının kutbiyeti pozitif veya negatif olabilmektedir (1). Genel olarak yıldırım akımı (3.5) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.5)$$

(3.5) denklemindeki I_0 başlangıç boşalma akımını temsil ederken α ve β ise yıldırım darbe akımı karakteristiğine uygun sabit değerleri temsil etmektedir. Şekil 3.8' de yıldırım akımına ait akım, zaman eğrisi verilmektedir.



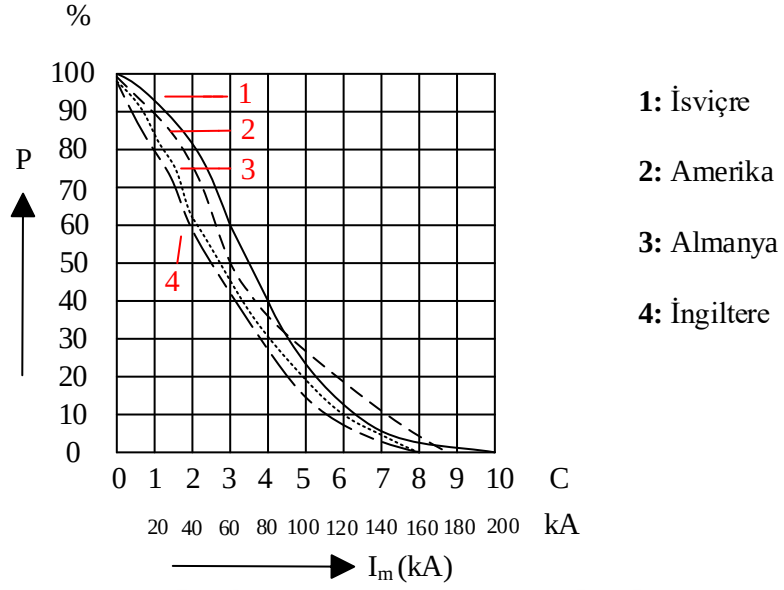
Şekil 3.8. Yıldırım akımı $i(t)$ eğrisi

Yıldırım akımlarının yarı değer süreleri genellikle 30 ila 100 μs arasında değişmektedir (1). Şekil 3.8’ de yer alan T ifadesi yıldırım akımında yarı değer süresini temsil etmektedir ve buradan hareketle (3.6) eşitliği yazılabilir.

$$Q = T \cdot I_m \quad (3.6)$$

(3.6) ifadesine göre I_m tepe değeri bilinen bir yıldırım akımının Q yükü hesabı yapılabilir.

Yıldırım akımlarının tepe değerleri bazı araştırmacılar tarafından ölçülmüştür. İsviçre, Amerika, Almanya ve İngiltere’ de yapılan ölçümler sonucunda yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri elde edilmiştir. Şekil 3.9’ da yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri verilmiştir (1).



Şekil 3.9. Yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri (1)

Elde edilen birikmeli olasılık eğrilerine göre yıldırım akımlarının tepe değeri birkaç kA ile 200 kA gibi geniş sınırlar arasında değişmektedir. Şekil 3.9’ da yer alan P terimi olasılığı temsil ederken C ise elektrik yükünün birimi olan Coulomb’ u ifade etmektedir.

3.2.3 Direkt Yıldırım Düşmesiyle Meydana Gelen Aşırı Gerilimler

3.2.3.1 Yıldırımın Faz Hattına Düşmesi Durumu

Yıldırımın bir faz hattına düşmesi durumunda, yıldırımın düştüğü noktadan itibaren her iki yöne doğru ilerleyen yürüyen dalga oluşmaktadır. Oluşan yürüyen dalga ifadesi (3.7) eşitliği ile gösterilebilir (1).

$$u(t) = \frac{1}{2} Z i(t) \quad (3.7)$$

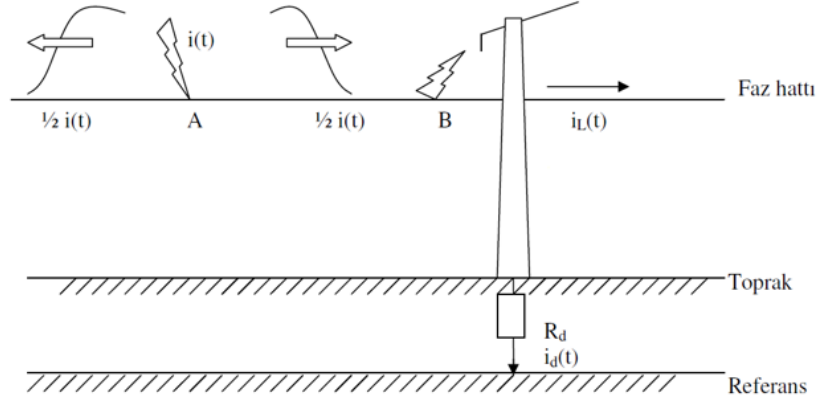
(3.7) eşitliğinde Z terimi faz hattının karakteristik empedansını ifade etmektedir. (3.5) ifadesindeki i (t) denklem (3.7)’ de yerine yazılırsa (3.8) eşitliği elde edilebilir.

$$u(t) = \frac{1}{2} Z I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.8)$$

(3.8) eşitliğinin birtakım düzenlemeler ile (3.10) eşitliğindeki gibi daha sade bir hale getirilmesi mümkündür. Şekil 3.10’ da yıldırımın faz hattına düşmesi durumu paylaşılmıştır.

$$U_0 = \frac{1}{2} Z I_0 \quad (3.9)$$

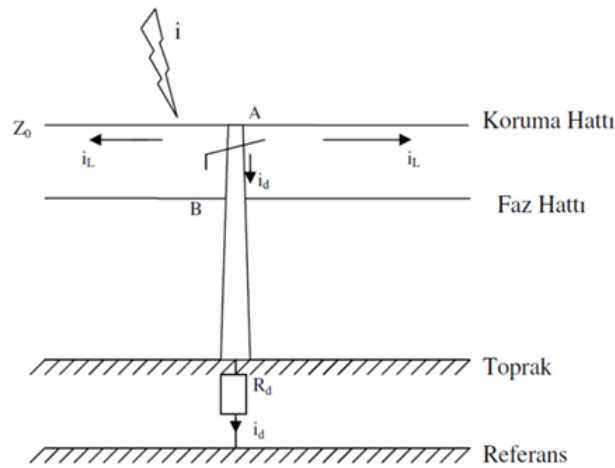
$$u(t) = U_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.10)$$



Şekil 3.10. Yıldırımın faz hattına düşmesi durumu (40); $i_L(t)$: Faz hattında ilerleyen yıldırım akımı, i_d : Direk üzerinden akan akım, R_d : Direğin topraklama direnci

3.2.3.2 Yıldırımın Direğe Düşmesi Durumu

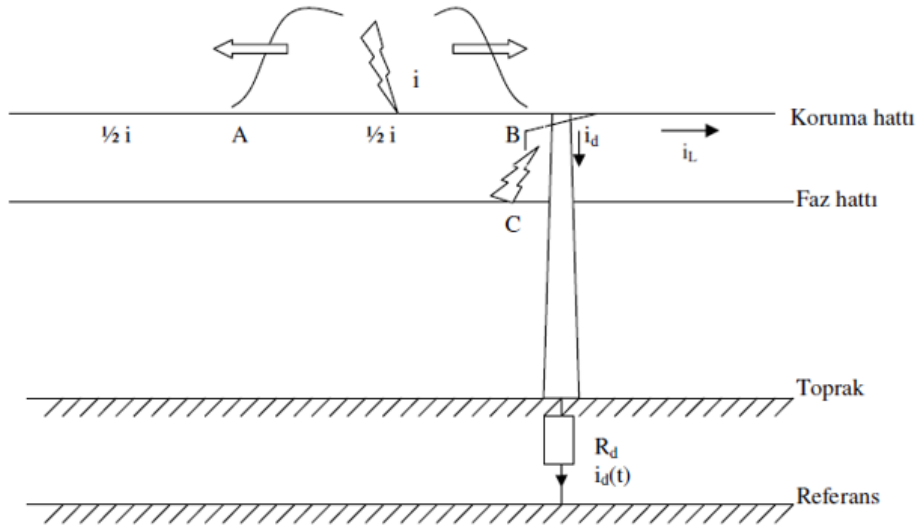
Yıldırımın faz hattına düşmesinin yanı sıra, direğe düşme ihtimalleri de söz konusudur. Bu ihtimal yıldırımın faz hattına düşmesi kadar tehlikeli değildir. Elektrik direklerinin iyi topraklanması durumunda yıldırım deşarjının etkisi giderilebilmektedir (1). Şekil 3.11’ de yıldırımın direğe düşmesi durumu paylaşılmıştır.



Şekil 3.11. Yıldırımın direğe düşmesi durumu (48); $i_L(t)$: Faz hattında ilerleyen yıldırım akımı, i_d : Direk üzerinden akan akım, R_d : Direğin topraklama direnci

3.2.3.3 Yıldırımın Koruma Hattına Düşmesi Durumu

Yıldırımın koruma hattına düşmesi durumunda meydana gelen aşırı gerilimlerde direkler iyi topraklanmamışsa geri atlama söz konusu olabilir (1). Şekil 3.12’ de yıldırımın koruma hattına düşmesi durumu paylaşılmıştır.



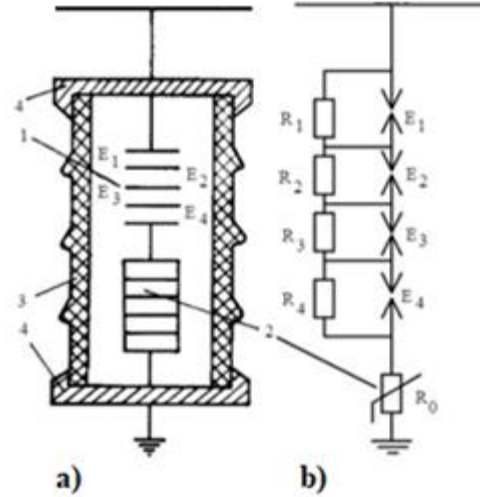
Şekil 3.12. Yıldırımın koruma hattına düşmesi durumu (40); $i_L(t)$: Faz hattında ilerleyen yıldırım akımı, i_d : Direk üzerinden akan akım, R_d : Direğin topraklama direnci

3.3 Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma

Yüksek gerilim ve elektrik güç sistemlerinde oluşan aşırı gerilime karşı koruma amaçlı olarak kullanılan elemanlar aşırı gerilime karşı koruma aygıtları olarak ifade edilmektedir (1). Aşırı gerilime karşı koruma amaçlı en sık kullanılan aygıtlardan birisi de parafudrlardır.

3.3.1 Değişken Dirençli Parafudrlar

Değişken dirençli parafudr, lineer olmayan dirençler yardımıyla gerilime bağlı olarak aşırı gerilimlerin değerini, koruma seviyesine eşit bir seviyeye düşürmektedir. Değişken dirençli parafudrlar genellikle 3 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümleri seri eklatör, değişken direnç/dirençler ve yalıtkan gövde oluşturmaktadır. Değişken dirençli parafudrlara ait yapı ve eşdeğer şema Şekil 3.13’ te verilmiştir.



Şekil 3.13. Değişken dirençli parafudrların a) yapısı b) eşdeğer şeması (41)

Şekil 3.13’ te 1 numaralı kısımlar parafudrun seri eklatörünü gösterirken 2 numaralı kısımlar değişken dirençleri göstermektedir. 3 ve 4 numaralı kısımlar ise mahfazayı temsil etmektedir.

Değişken dirençli parafudrların en önemli elemanlarından biri olan seri eklatörler parafudrların değişken direnç/dirençlerine seri olarak bağlanmaktadır. Seri eklatörler aşırı gerilim ile oluşan arkı söndürme biçimine göre farklılık gösterebilmektedir (kendinden söndürme, manyetik söndürme vb.) (41). Normal işletme düzeyinde çalışmaya başlama gerilimine kadar şebekenin izolasyon düzeyini koruyan seri elektrotların herhangi bir aşırı gerilimde boşalma akımı (bir atlama olayında parafudrdan geçen darbe akımı) ve ard akımını (darbe boşalma akımını izleyen ve şebeke gerilimi altında parafudrdan geçen akım) elektrot yüzeylerinde herhangi bir arıza meydana getirmeden boşaltmalıdır (1).

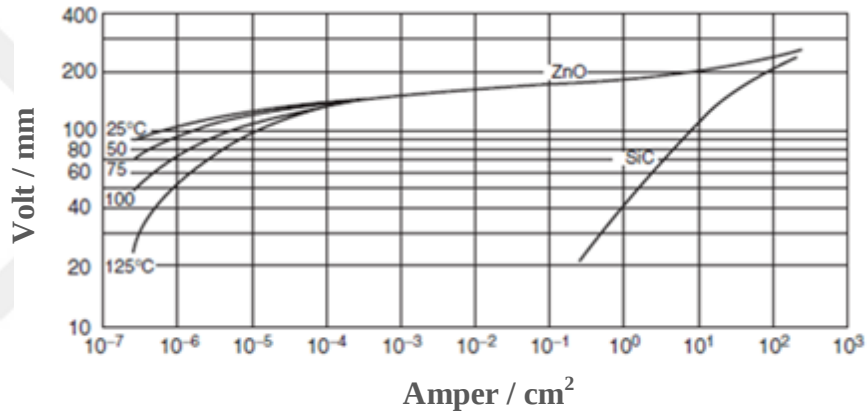
Değişken dirençli parafudrların bir diğer bölümü olan dirençler silisyum karbür (SiC) veya metal oksitten (ZnO) oluşmaktadırlar. Değişken dirençlerin değeri, normal işletmede hattın karakteristik empedansından büyük olması gerekirken aşırı gerilim durumunda hattın karakteristik empedansından küçük olmalıdır. Böyle bir durumda parafudr nizami olarak çalışabilirken büyük aşırı gerilimlerde büyük akımların ve işletme geriliminde de küçük ard akımlarının geçişine izin vermektedir (1).

Parafudrların bir diğer bölümünü ise mahfaza kısımları oluşturmaktadır. Parafudrların gövdesi genellikle porselen ve polimer malzemelerden oluşmaktadır.

3.3.2 Metal Oksit Parafudrlar

Metal oksit parafudrların geliştirilmesi ile eklatörsüz parafudr kullanımı mümkün hale gelmiştir (42). Yapısında seri eklatör bulundurmeyen metal oksit parafudrlar çinko oksit (ZnO) direnç elemanlarından oluşmaktadır. Metal oksit parafurlara, yapılarında eklatör bulundurmamaları sebebiyle eklatörsüz parafudrlar da denilmektedir. Metal oksit parafudrlar geleneksel parafurlara göre ağır kirlenme koşullarında da kullanıma uygundur (1).

Metal oksit parafudrların ana elemanı olan metal oksit dirençler yapılarında çinko oksit (ZnO), bizmut oksit (Bi_2O_3), mangan oksit (MnO) ve antimon oksit (Sb_2O_3) ve kromyum oksit (Cr_2O_3) içermektedir (42). ZnO ve SiC dirençlerinin akım-gerilim karakteristikleri Şekil 3.14' te verilmiştir.



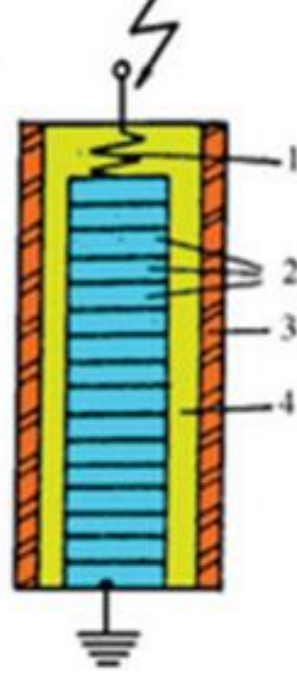
Şekil 3.14. ZnO ve SiC dirençlerinin akım-gerilim karakteristikleri (42)

Metal oksit parafurların gerilim – akım karakteristikleri incelendiğinde yaklaşık 10^{-6} 'dan 10^1 'ekadar yatay bir doğru şeklinde olduğu görülmektedir. Metal oksit parafurların koruma düzeyi, geleneksel parafurlara göre daha düşük ve kararlı iken dik cepheli darbelere karşı koruması çok daha iyidir (1). Metal oksit parafudrlar, değişken dirençli parafudrlara göre daha küçük boyutlara ve daha yüksek güvenilirliğe sahiptirler (41).

Şekil 3.15' te bir metal oksit parafudr ve bu metal oksit parafudrun iç yapısı paylaşılmıştır.



a)



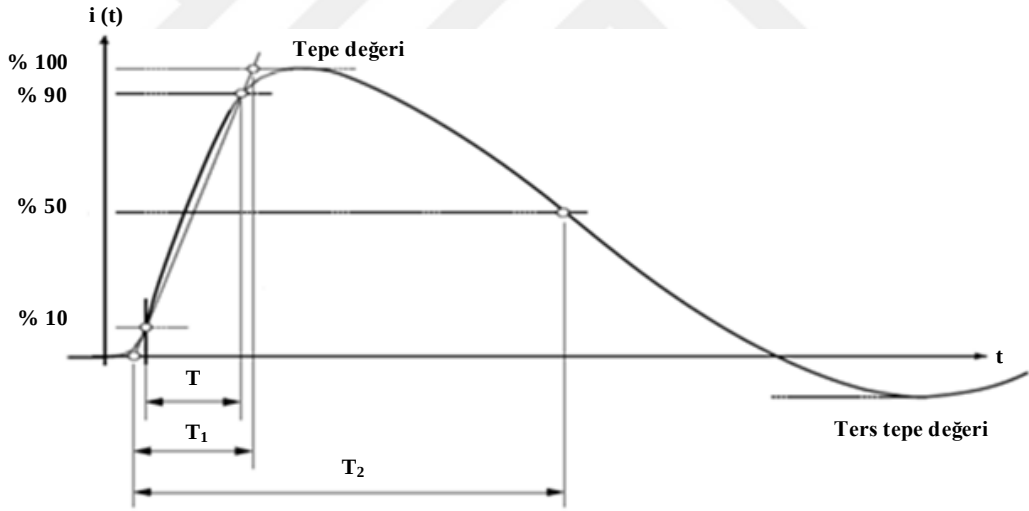
b)

Şekil 3.15. Bir metal oksit parafudrun yapısı; a) Metal oksit parafudr, b) Metal oksit parafudrun iç yapısı (43); 1) Sıkıştırma yayı, 2) Metal oksit direnç elemanları, 3) Gövde, 4) Basınçlı gaz

4. DARBE AKIMLARININ ÜRETİLMESİ

Yıldırım deşarjları, iletim hatlarında hem yüksek gerilim darbelerinin hem de yüksek akım darbelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Parafudr gibi koruyucu elemanlar yıldırım deşarjından kaynaklanan darbe akımını, sisteme zarar gelmeden kendi üzerinden toprağa iletme zorundadır. Bu nedenle, yüksek genlikteki darbe akımlarının üretilmesi, test çalışmalarında olduğu kadar, doğrusal olmayan dirençler, elektrik ark çalışmaları ve yüksek akım deşarjlarında elektrik plazmalarıyla ilgili temel araştırmalarda da uygulama bulmaktadır (38).

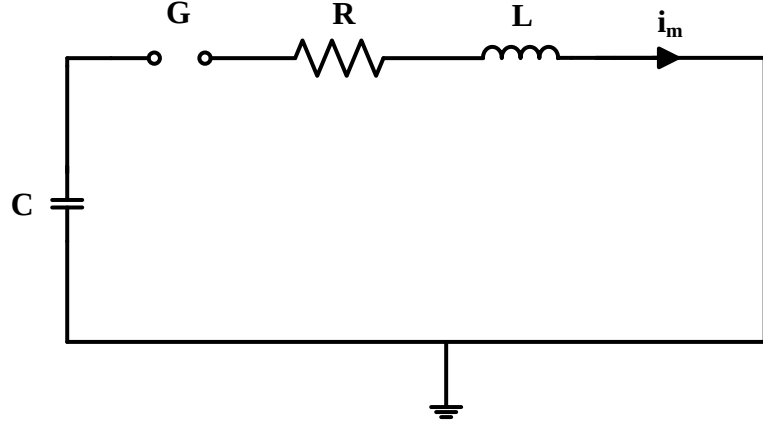
Şekil 4.1’ de standart darbe akımı dalga şekli paylaşılmıştır. Şekil 4.1’ de T_1 ile gösterilen cephe süresi, darbe akımının tepe değerinin % 10’ undan % 90’ ına kadar yükselmesi için geçen süreyi ifade ederken T_2 ile gösterilen sırt yarı değer süresi ise sanal başlangıç noktası ile yıldırım darbe akımının tepe değerinin yarıya düştüğü an arasındaki zaman aralığını ifade etmektedir.



Şekil 4.1. Standart darbe akımı dalga şekli (18)

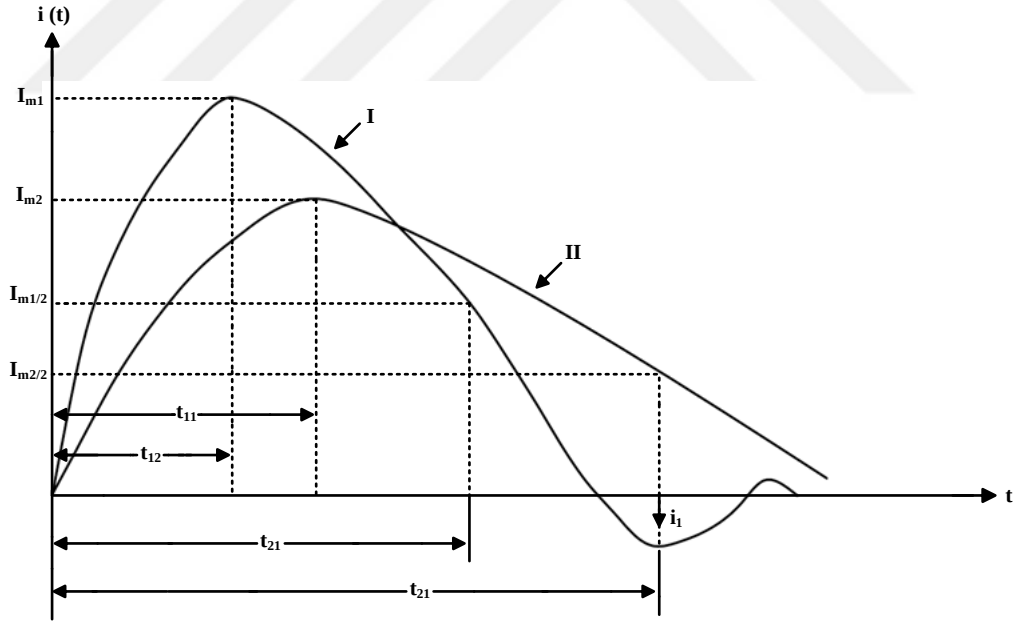
Parafudrların test edilmesinde kullanılan darbe akımı dalga şekilleri 4/10 μ s ve 8/20 μ s'dir. Darbe akımı dalga şekli ifade edilirken belirtilen ilk sayı darbenin cephe süresini, ikinci sayı ise sırt yarı değer süresini temsil etmektedir. Parafudr testlerinde bu süreler için izin verilen toleranslar $\pm$ %10' dur (38).

Standart darbe akımının üretilmesinde kullanılan bir yıldırım darbe akımı üreticisine ilişkin eşdeğer devre Şekil 4.2’ de verilmiştir.



Şekil 4.2. Darbe akımı üreticinin eşdeğer devre modeli (38); G: Atlama aralığı

Şekil 4.3' te ise darbe akımı üretici yardımıyla üretilen standart yıldırım darbe akımı dalga formları paylaşılmıştır. Bu darbe akımı dalga formlarından (I) numaralı dalga formu sönümlü osilasyon durumunu, (II) numaralı dalga formu ise aşırı sönümlü durumu temsil etmektedir.



Şekil 4.3. Darbe akımı dalga formlarının çeşitleri (38); t_{11} ve t_{12} : I ve II numaralı dalgaların cephe süresi, t_{21} ve t_{22} : I ve II numaralı dalgaların sırt yarı değer süresi, I: Sönümlü osilasyon dalgası, II: Aşırı sönümlü dalga, i_1 : Aşım

Şekil 4.3' te verilen I ve II numaralı dalga şekilleri için t_{11} ve t_{12} , cephe süresini, t_{21} ve t_{22} , sırt yarı değer süresini, i_1 aşımı temsil etmektedir.

Laboratuvar ortamında büyük genlikte darbe akımları üretebilmek için, bir kondansatör bloğunun belirli bir değere şarj edilmesi ve Şekil 4.2' de gösterildiği gibi seri bir R-L devresi üzerinden deşarj edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.2' de C, V_{DA} ile şarj edilen kondansatör bloğunu temsil ederken R, test nesnesinin dinamik direncini ve devrenin direncini temsil etmektedir. L ise devrenin endüktansını göstermektedir.

Kondansatör bir V gerilimine kadar şarj edilir ve Şekil 4.2' de G ile gösterilen elektrotlar üzerinden deşarj edilir ise devre üzerinde i_m ile belirtilen bir darbe akımı oluşur ve oluşan bu i_m darbe akımı aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir.

$$V = Ri_m + L \frac{di_m}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_m dt \quad (4.1)$$

(4.1) denklemi (4.2) bağıntısı ile ifade edilen az sönümlü durum şartları göz önünde bulundurularak çözümlenir ise (4.3) denklemi elde edilebilir.

$$\frac{R}{2} < \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.2)$$

$$i_m = \frac{V}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} t\right) \quad (4.3)$$

(4.3) denklemindeki α ve ω terimleri yerine (4.4) ve (4.5) eşitlikleri kullanılarak daha sade bir ifade olan (4.6) denklemi elde edilebilir.

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (4.4)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (4.5)$$

$$i_m = \frac{V}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin(\omega t) \quad (4.6)$$

Darbe akımı i_m 'nin 0' dan tepe değerine yükselme süresi t_1 , elde edilmek istenirse (4.7) denklemi elde edilir.

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{\omega}{\sqrt{LC}} \quad (4.7)$$

(4.6) denklemi biraz daha düzenlenir ise (4.8) denklemi elde edilir.

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha} \quad (4.8)$$

Sönümlü osilasyon dalgasının bir yarım periyodunu ifade eden t_2 , ise (4.9) eşitliği ile ifade edilebilir.

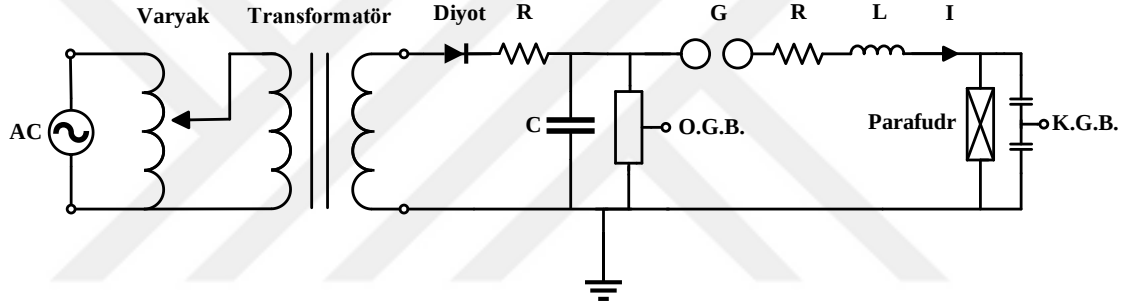
$$t_2 = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}} \quad (4.9)$$

5. DARBE AKIM ÜRETECİ TASARIMI VE ÜRETİLMESİ

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışma ile 8/20 μ s standartlarında darbe akımı üretetilmesi hedeflenmiştir. Bu standartlardaki darbe akımını üretebilmek için öncelikle darbe akımı üretici devresi analiz edilerek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamaların bilgisayar ortamında Pspice programı ile benzetimi gerçekleştirilerek kullanılacak devre elemanlarının değeri belirlenmiştir.

5.1 8/20 μ s Darbe Akımı Üretici Devresi Parametre Hesaplamaları

Darbe akımı üretici eşdeğer devre modeli Şekil 5.1’ de verilen yapı incelenerek Kirchoff gerilim kanunu uygulandığında (5.1) denklemi elde edilebilir.



Şekil 5.1. Laboratuvar ortamında standart yıldırım darbe akımı üretebilmek için geliştirilen deney düzeneğine ait devre şeması

Şekil 5.1’ de O.G.B. omik gerilim bölücüyü, K.G.B. kapasitif gerilim bölücüyü, G ise atlama boşluğunu (küresel elektrotları) temsil etmektedir.

$$V_C + V_R + V_L = 0 \quad (5.1)$$

(5.1) eşitliğindeki terimlerin yerine uç gerilimleri yazılırsa (5.2) ifadesi elde edilebilir.

$$-V(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt + iR + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (5.2)$$

$t = 0$ anında, $I(0) = 0$ başlangıç koşulu için (5.2) denkleminde Laplace dönüşümü uygulanırsa (5.3) eşitliği elde edilebilir.

$$-\frac{V}{s} + i\left(\frac{1}{Cs} + R + Ls\right) = 0 \quad (5.3)$$

(5.3) eşitliği düzenlenerek akım ifadesi yalnız bırakılırsa (5.4) ve (5.5) ifadeleri elde edilebilir.

$$i\left(\frac{1}{Cs} + R + Ls\right) = \frac{V}{s} \quad (5.4)$$

$$i = \frac{\frac{V}{s}}{\frac{1 + sCR + s^2LC}{sC}} \quad (5.5)$$

(5.5) eşitliğindeki akım ifadesi düzenlenmeye devam edilirse (5.6) ve (5.7) eşitlikleri elde edilebilir.

$$i = \frac{VC}{s^2LC + sRC + 1} \quad (5.6)$$

$$i = \left[\frac{V}{L}\right] \left[\frac{1}{s^2 + s\frac{R}{L} + \frac{1}{LC}}\right] \quad (5.7)$$

(5.7) eşitliğinin payda kısmı (5.8) denkleminde benzetilerek yazılırsa a_1 ve a_2 terimleri (5.9) ve (5.10) eşitliklerinde gösterildiği gibi yazılabilir.

$$s^2 + a_1s + a_2 = 0 \quad (5.8)$$

$$a_1 = \frac{R}{L} \quad (5.9)$$

$$a_2 = \frac{1}{LC} \quad (5.10)$$

Bu durumda akım ifadesine ait karakteristik denklem (5.11) bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$s^2 + s\frac{R}{L} + \frac{1}{LC} = 0 \quad (5.11)$$

(5.8) denklemi ile ifade edilen karakteristik denkleme ait sönümsüz doğal frekans (ω_0) ve sönüm oranı (ξ), (5.12) ve (5.13) eşitlikleri ile verilmektedir.

$$\omega_0 = \sqrt{a_2} \quad (5.12)$$

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_2}} \quad (5.13)$$

(5.11) bağıntısı ile verilen karakteristik denklemin köklerini bulmak için (5.14) eşitliğinden yararlanılabilir.

$$s_{1,2} = \left[-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1} \right] \omega_0 \quad (5.14)$$

(5.14) denklemindeki ξ ve ω_0 terimleri R, L ve C cinsinden yazılırsa $s_{1,2}$ ifadesi (5.15) denklemi ile ifade edilebilir.

$$s_{1,2} = \left[-\frac{\frac{R}{L}}{2\sqrt{\frac{1}{LC}}} \pm \sqrt{\left(\frac{\frac{R}{L}}{2\sqrt{\frac{1}{LC}}} \right)^2 - 1} \right] \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (5.15)$$

(5.15) denklemi düzenlenerek daha sade bir eşitlik ile ifade edilmek istenirse (5.16) denklemi elde edilebilir.

$$s_{1,2} = \left[-\frac{R\sqrt{LC}}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 \frac{LC}{4} - 1} \right] \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (5.16)$$

(5.16) ifadesi düzenlenmeye devam edilirse (5.17) ifadesi elde edilebilir.

$$s_{1,2} = \left[-\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \right] \quad (5.17)$$

Darbe üreticinin enerjisi (5.18) denklemi ile ifade edilebilir.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (5.18)$$

Darbe üreticinde kullanılan kondansatörün sığasını hesaplamak için (5.19) denkleminde yararlanarak toplam Q yükü hesaplanabilir.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (5.19)$$

(5.19) denkleminde her iki tarafın integrali alınırsa (5.20) bağıntısı elde edilebilir.

$$\int i \, dt = \int \frac{dQ}{dt} \, dt \quad (5.20)$$

Toplam Q yükü (5.21) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$Q = \int i dt \quad (5.21)$$

Standartlarda, 8/20 μs dalga formundaki yıldırım darbe akımının dalga şekli (5.22) denklemi ile ifade edilmektedir (44).

$$I(t) = A * I_p * t^3 * e^{(-\frac{t}{\tau})} \quad (5.22)$$

(5.22) denkleminde I_p , darbe akımı üretici devresinden akan kısa devre akımın tepe değerini temsil etmektedir. (5.23) ve (5.24) eşitlikleri ile ifade edilen A ve τ ise birer sabit değeri temsil etmektedir.

$$A = 0.01243 (\mu s)^{-3} \quad (5.23)$$

$$\tau = 3.911 \mu s \quad (5.24)$$

$I_p = 8000 A$ değeri, A sabitinin değeri ve τ ' nun değeri (5.22) denkleminde yerine yazılır ise (5.25) denklemi elde edilir.

$$I(t) = 0.01243 * (10^{-6})^{-3} * 8000 * t^3 * e^{(-\frac{t}{3.911*10^{-6}})} \quad (5.25)$$

(5.21) ve (5.25) denklemleri yardımıyla gerekli olan toplam Q yükü hesaplanmak istenirse (5.26) eşitliği yazılabilir.

$$Q = \int_0^{20*10^{-6}} 0.01243 * (10^{-6})^{-3} * 8000 * t^3 * e^{(-\frac{t}{3.911*10^{-6}})} dt \quad (5.26)$$

(5.26) eşitliği ile ifade edilen denklem çözümlenirse gerekli olan toplam Q yükü (5.27) eşitliğinde gösterildiği gibi bulunur.

$$Q = 0.105 \text{ Coulomb} \quad (5.27)$$

(5.27) denklemi ile elde edilen Q yükü için $V = 8000 \text{ Volt}$ geriliminde gerekli olan kondansatör sığası (5.28) denklemi ile hesaplanabilir.

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{0.105}{8000} = 13.125 \mu F \quad (5.28)$$

$8/20 \mu s$ dalga formundaki yıldırım darbe akımı için $20 \mu s$ periyodun yaklaşık yarısı olmaktadır. Bu yaklaşıklıktan yararlanarak (5.29) bağıntısı yazılabilir.

$$\frac{T}{2} = 20 \mu s \quad (5.29)$$

Açısal hız ile frekans arasındaki ilişki (5.30) denklemi ile gösterilebilir.

$$\omega = 2\pi f \quad (5.30)$$

(5.30) denklemi düzenlenerek (5.31) eşitliği elde edilebilir.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (5.31)$$

(5.31) denklemi kullanılarak, frekans ve periyot arasındaki ilişki yardımıyla (5.32) denklemi yazılabilir.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{\frac{\omega}{2\pi}} \quad (5.32)$$

(5.32) eşitliğindeki periyot ifadesinin yarısı elde edilmek istenirse (5.33) eşitliği elde edilir.

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega} \quad (5.33)$$

(5.33) denklemi kullanılarak açısal hız hesaplanırsa (5.34) ve (5.35) eşitlikleri elde edilebilir.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5.34)$$

$$\omega = \frac{\pi}{20 * 10^{-6}} = 157079 \text{ rad/s} \quad (5.35)$$

(5.10) ve (5.12) denklemleri yardımıyla (5.36) ve (5.37) eşitlikleri yazılabilir.

$$\omega = \sqrt{a_2} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (5.36)$$

Darbe akımı üretici devresinde gerekli olan endüktans değeri hesaplanmak istenirse (5.37) eşitliği yazılabilir.

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{157079^2 * 13.125 * 10^{-6}} = 3.0879 * 10^{-6} H \quad (5.37)$$

(5.17) denklemi ile ifade edilen $s_{1,2}$ kökleri için kritik sönümlü durum şartları ($\xi = 1$) göz önünde bulundurulursa (5.38) ve (5.39) eşitlikleri yazılabilir.

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_2}} = 1 \quad (5.38)$$

$$\xi = \frac{\frac{R}{L}}{2\sqrt{\frac{1}{LC}}} = 1 \quad (5.39)$$

(5.39) denklemi düzenlenerek (5.40) eşitliği elde edilebilir.

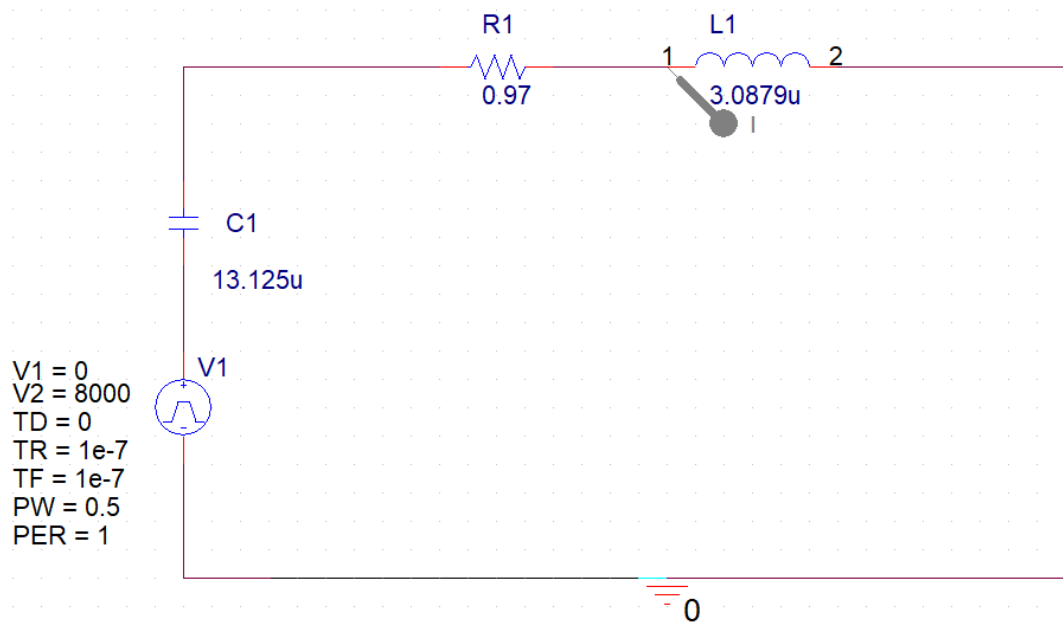
$$\frac{R}{2L} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (5.40)$$

Darbe akımı üretici devresinde gerekli olan direncin değeri hesaplanmak istenirse (5.41) denklemi yazılabilir.

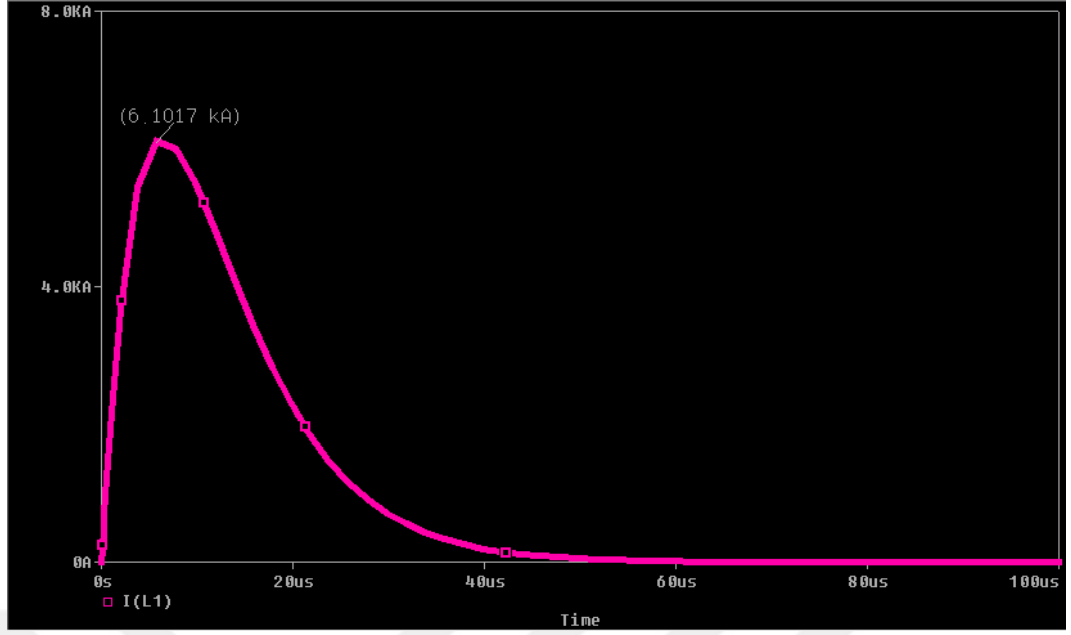
$$R = \sqrt{\frac{4L}{C}} = \sqrt{\frac{4 * 3.0879 * 10^{-6}}{13.125 * 10^{-6}}} = 0.97 \Omega \quad (5.41)$$

5.2 8/20 µs Darbe Akımı Üretici Devresi Benzetim Çalışması

Bölüm 5.1’ de yapılan analizler sonucu elde edilen parametlerin Pspice programındaki analiz sonucu bu kısımda verilmiştir. Şekil 5.2’ de Pspice programında oluşturulan yıldırım darbe akımı üretici devresi, Şekil 5.3’ te ise bu yıldırım darbe akımı üretici devresinden akan 8/20 µs dalga formundaki akım paylaşılmıştır.



Şekil 5.2. Pspice programı kullanılarak oluşturulan yıldırım darbe akımı üretici devresi



Şekil 5.3. Pspice programı kullanılarak benzetim çalışması gerçekleştirilen yıldırım darbe akımı üretici devresinden akan 8/20 μ s dalga formundaki akım

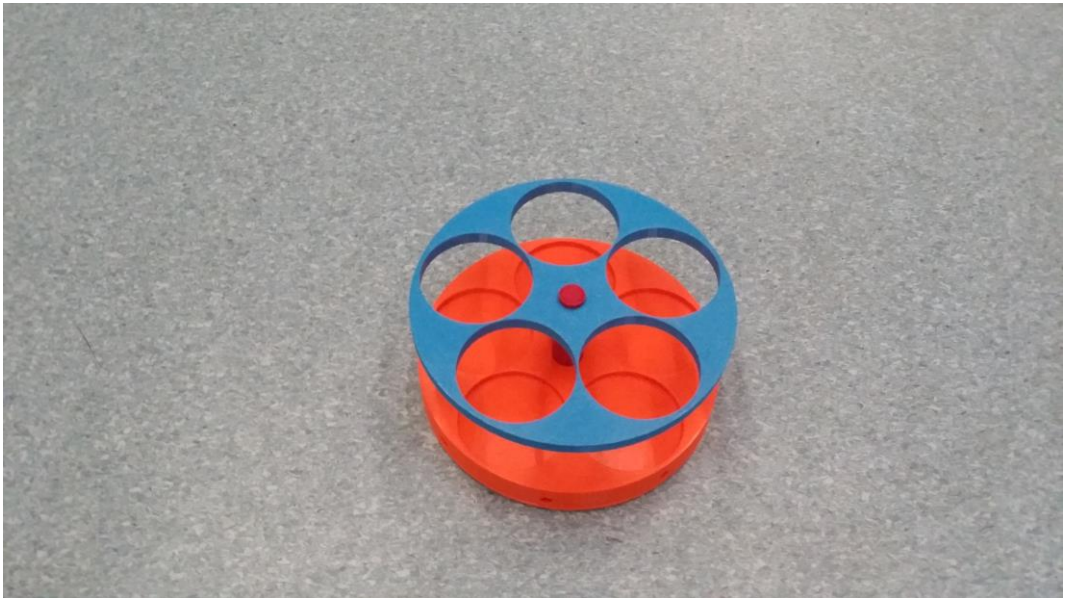
5.3 Darbe Kondansatörü

Darbe kondansatörünü oluşturmak için Şekil 5.4’ te verilen 400 V_{rms} ve 200 μ F etiket değerine sahip kondansatörler kullanılmıştır. Tez kapsamında 2 adet darbe kondansatörü uygulanmıştır. Darbe kondansatörünün ilki toplam 4 katlı olup 1 metre yüksekliğe sahiptir. Ayrıca birinci darbe kondansatörü setinin maksimum çalışma gerilimi 8 kV’ tur. İkinci darbe kondansatörü ise toplam 8 katlı olup 2 metre yüksekliğe sahiptir. İkinci darbe kondansatörü ise maksimum çalışma gerilimi 16 kV’ tur. Her iki darbe kondansatörü, 5 kondansatörün birbirine seri bağlanması ile elde edilen kondansatör bloklarından oluşmaktadır. Kondansatörleri birbirine seri biçimde bağlamak için klemensler kullanılmıştır. Ayrıca her kondansatör katının çıkış bağlantılarını pvc borunun iç hacminden dış kısmına aktarabilmek için kablo pabucu ve metrik 8 civata kullanılmıştır.

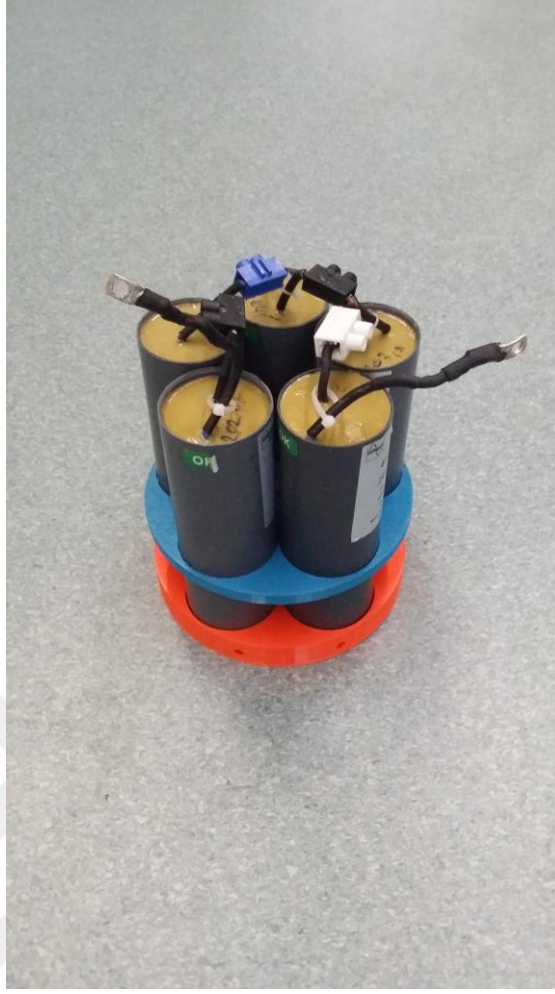


Şekil 5.4. Darbe kondansatörlerini oluşturmak için kullanılan kondansatör blokları

Darbe kondansatörünü oluşturan blokların pvc borunun iç hacminde sabit bir şekilde tutabilmek için 3 boyutlu yazıcı kullanarak sabitleyici bir yapı üretilmiştir. Bu sabitleyici yapı Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’ da paylaşılmıştır.

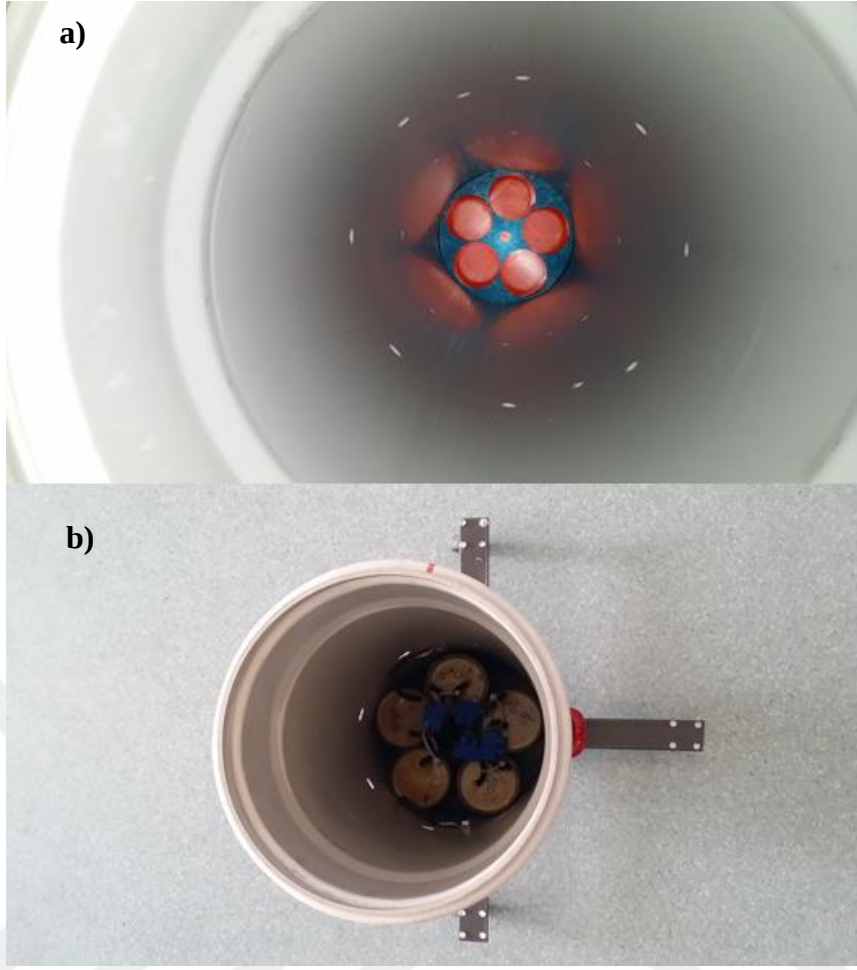


Şekil 5.5. Kondansatöleri bir arada tutan sabitleyici yapı



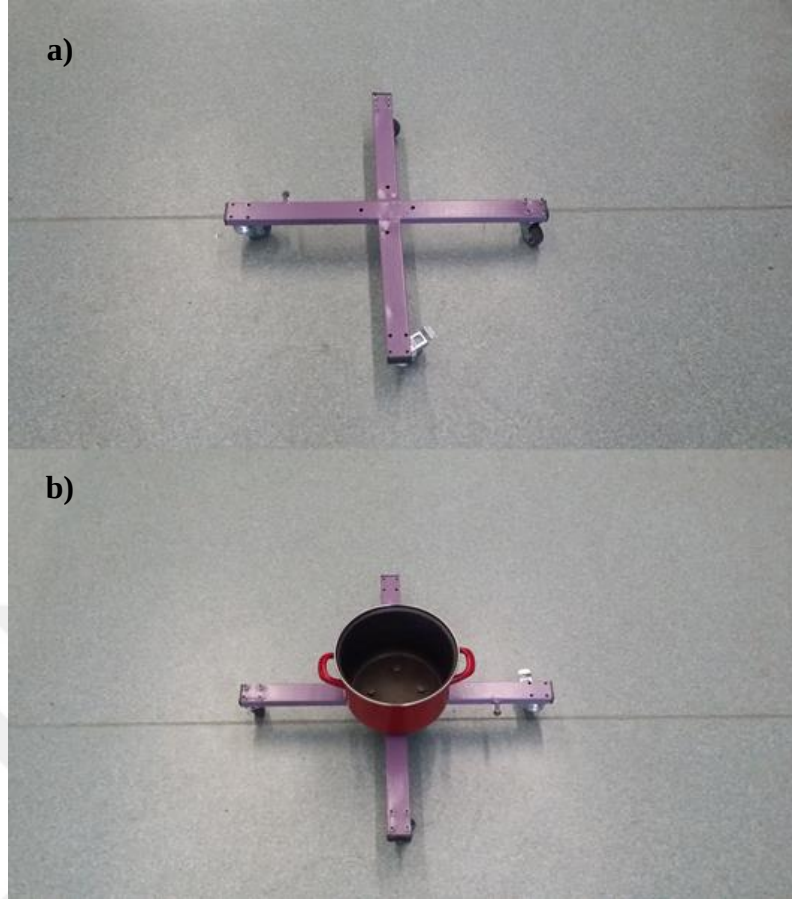
Şekil 5.6. Birbirine seri biçimde bağlanan 5’li kondansatör katı bloğu

Birbirine seri biçimde bağlanan 5’ li kondansatör bloğu ve sabitleyici yapının pvc boru içine montajlanmış hali Şekil 5.7’ de gösterilmiştir.



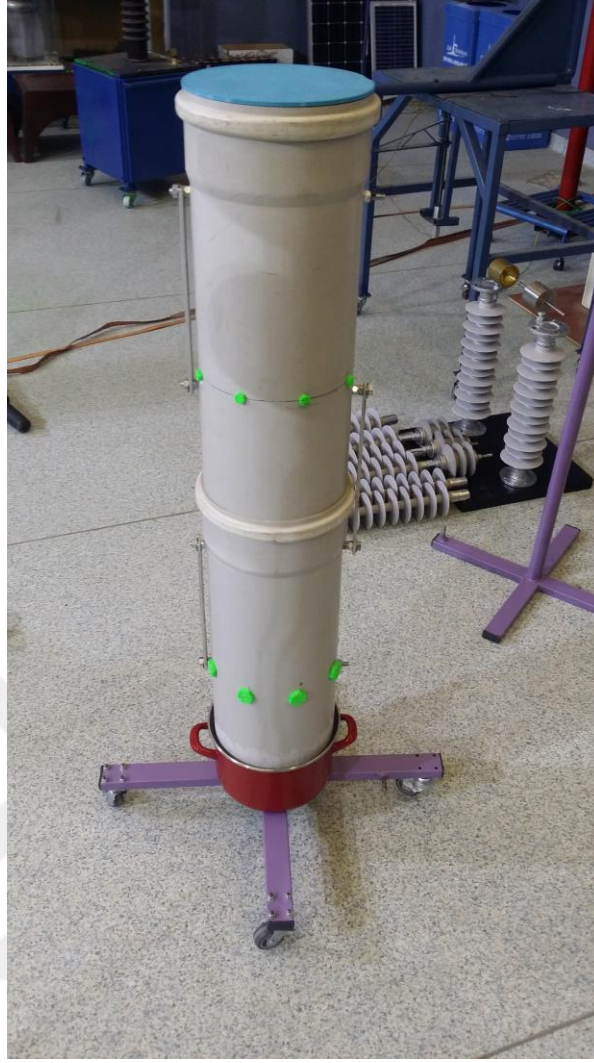
Şekil 5.7. Kondansatör bloklarının pvc boru içine yerleştirilmesi; a) Sabitleyici yapının pvc boru içine montajı, b) Kondansatör blokları ve sabitleyici yapının pvc boru içine montajı

Kondansatör bloklarından oluşan darbe kondansatörlerinin taşınmasını ve hareketini kolaylaştırmak için toplamda 2 adet kaide tasarlanmıştır. Tasarlanan kaide Şekil 5.8’ de verilmiştir. 4 cm x 2 cm ölçülerinde demir profiller kullanılarak üretilen taşıyıcı yapılara 4 adet tekerlek takılmıştır. Üretilen bu yapıların üzerine 20 cm çapındaki pvc boruyu sabitleyebilecek bir flanş bağlantısı yapılmıştır. Üretilen hareketli kaide yapılarını deney sırasında topraklayabilmek için, her iki kaidenin gövdesine topraklama civatası montajı yapılmıştır. Darbe kondansatörleri üretilirken 5’ li kondansatör blokları pvc boru içine, 3 boyutlu yazıcı ile PLA malzemeden üretilen metrik 8 civata yardımıyla sabitlenmiştir. Bu sayede yüksek gerilime yakın ortamlarda metalik malzeme kullanımı en aza indirgenmiştir.



Şekil 5.8. 8 kV tepe değerine sahip darbe kondansatörü setine ait flanş ve taşıyıcı ayak yapısı; a) Tekerlekli ayaklar, b) Tekerlekli ayakların üzerine montajlanan flanş yapısı

Hareketli ayak ve flanş yapısı üzerine sabitlenen darbe kondansatörü setleri Şekil 5.9 ve 5.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Hareketli ayak ve flanş yapısı üzerine sabitlenen 8 kV' luk darbe kondansatörü setinin nihai hali

Toplam 4 kata sahip olan 8 kV' luk darbe kondansatörü setinin katları arasındaki fiziksel bağlantı, her katın giriş ve çıkışına yerleştirilen metrik 8 civataların alüminyum baralar kullanılarak kısa devre edilmesiyle sağlanmıştır. Üretilen 8 kV' luk darbe kondansatörü setinin her katına ait ölçülen sığa değerleri Tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1. 8 kV’ luk darbe kondansatörü setine ait katların sığa değerleri

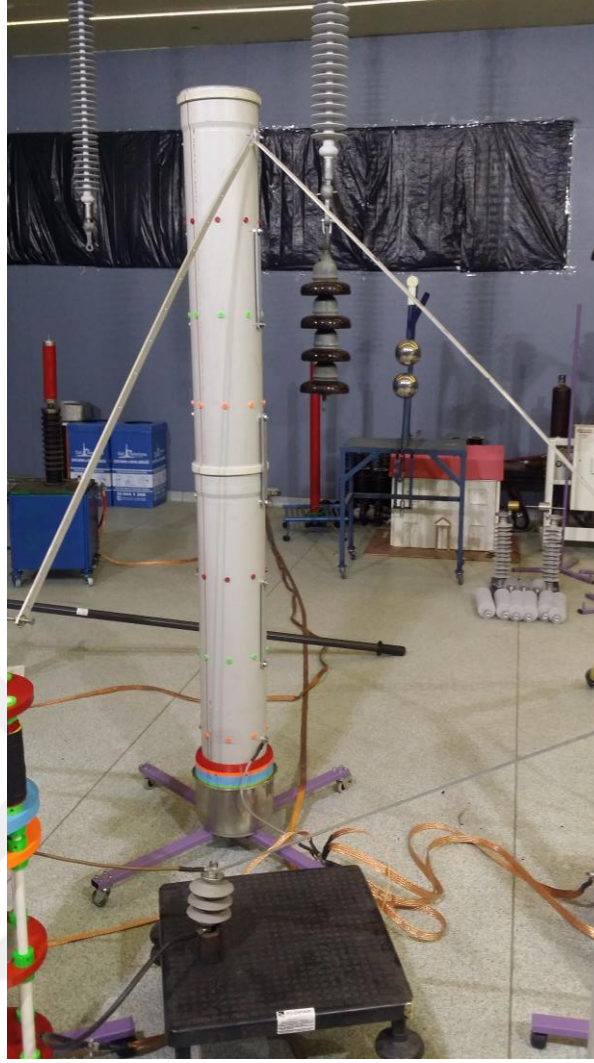
Ölçülen Kat	Ölçülen Sığa Değeri
1 Numaralı Kat	40.644 μ F
2 Numaralı Kat	40.715 μ F
3 Numaralı Kat	40.817 μ F
4 Numaralı Kat	40.903 μ F

Şekil 5.9’ da görseli paylaşılan darbe kondansatörü setinin 7500 V çıkış gerilimi verilen transformatör ile şarj edilmesi durumunda deney sisteminin giriş enerjisi (5.42) denklemi yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (5.42)$$

$$W = \frac{1}{2} 10.19 * 10^{-6} * 7500^2 \quad (5.43)$$

$$W = 286.59375 J \quad (5.44)$$



Şekil 5.10. Hareketli ayak ve flanş yapısı üzerine sabitlenen 16 kV' luk darbe kondansatörü setinin nihai hali

Toplam 8 kata sahip olan 16 kV' luk darbe kondansatörü setinin katları arasındaki fiziksel bağlantı da, 8 kV' luk darbe kondansatöründeki setindeki yöntemle sağlanmıştır. Üretilen 16 kV' luk darbe kondansatörü setinin her katına ait ölçülen sığa değerleri Tablo 5.2' de verilmiştir.

Tablo 5.2. 16 kV’ luk darbe kondansatörü setine ait katların sığa değerleri

Ölçülen Kat	Ölçülen Sığa Değeri
1 Numaralı Kat	40.775 μ F
2 Numaralı Kat	40.844 μ F
3 Numaralı Kat	40.688 μ F
4 Numaralı Kat	40.878 μ F
5 Numaralı Kat	40.672 μ F
6 Numaralı Kat	40.926 μ F
7 Numaralı Kat	40.996 μ F
8 Numaralı Kat	40.766 μ F

Şekil 5.10’ da görseli paylaşılan darbe kondansatörü setinin 7500 V çıkış gerilimi verilen transformatör ile şarj edilmesi durumunda deney sisteminin giriş enerjisi (5.45) denklemi yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 \quad (5.45)$$

$$W = \frac{1}{2} 5.10 * 10^{-6} * 7500^2 \quad (5.46)$$

$$W = 143.4375 J \quad (5.47)$$

Darbe kondansatörü setindeki katlara ait kondansatörlerin sığa ölçümleri, GW Instek marka LCR – 819 model LCR metre kullanılarak 50 Hz frekans değerinde gerçekleştirilmiştir.

5.4 Yüksek Doğru Gerilim ve Doğrultma Katının Üretilmesi

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada darbe kondansatörlerine enerji beslemesi, bir varyak üzerinden çıkış gerilimi kontrol edilen trafo yardımıyla yapılmıştır. Çalışmada kullanılan varyak, 220 V_{AA} (giriş) ve 0-220 V_{AA} (çıkış) değerlerine sahiptir. Tez kapsamında trafoyu enerjilendirmek için kullanılan varyak Şekil 5.11’ de verilmiştir.



Şekil 5.11. Tez çalışması kapsamında trafoyu enerjilendirmek için kullanılan varyak

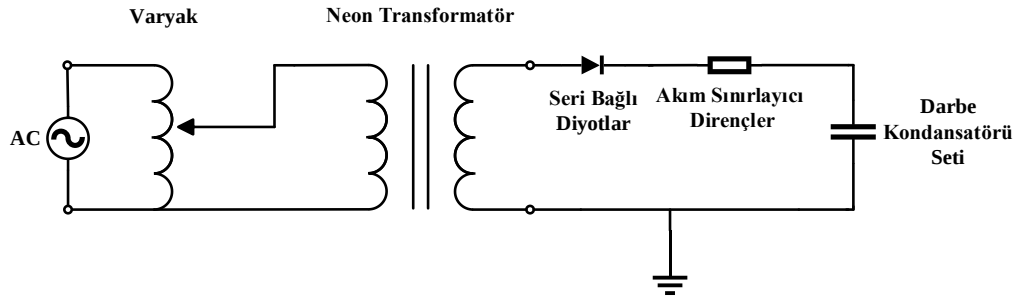
Varyak üzerinden beslenerek çıkış gerilimi yavaş yavaş arttırılan transformatörün çevirme oranı 220/7500’ dür. Çalışmada kullanılan transformatör, maksimum 30 mA çıkış verebilen neon transformatörüdür. Tez çalışması kapsamında üretilen darbe setinin enerji beslemesini yapmak için kullanılan neon transformatörü Şekil 5.12’ de paylaşılmıştır.



Şekil 5.12. Tez çalışması kapsamında üretilen darbe setinin enerji beslemesi için kullanılan neon transformatörü

Tez kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen darbe kondansatörünün şarj edilebilmesi için gerekli olan yüksek doğru gerilim, neon transformatörün yüksek gerilim sargılarındaki yüksek alternatif gerilimin doğrultulması ile elde edilmiştir. Yüksek alternatif gerilimin doğrultulması amacıyla bir doğrultma katı

tasarlanmış ve üretilmiştir. Varyak, transformatör ve doğrulma katından oluşan besleme sisteminin bağlantı şeması Şekil 5.13’ te verilmiştir.



Şekil 5.13. Darbe kondansatörü setini enerjilendirmek için kullanılan enerji besleme sistemi

Yüksek alternatif gerilim üretmek amacıyla kullanılan transformatörlerin yüksek gerilim sargıları kısa devre oluşması ihtimali göz önünde bulundurularak aşırı akıma karşı korunmalıdır. Aksi durumda oluşacak kısa devre akımının genliği anma akımından çok büyük olabilir ve bu durumun bir sonucu olarak sargılarda meydana gelen Joule kaybından dolayı yüksek gerilim sargıları kısa sürede kavrularak yanabilir (45).

Tez kapsamında kullanılan transformatörün sargılarını aşırı akımdan korumak amacıyla, doğrultma katındaki seri bağlı diyotlara seri bağlı direnç bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Doğrultma katında 6A10 diyotları kullanılmıştır. Kullanılan 6A10 diyotları 1000 V_{DA} gerilime kadar çalışma imkanı sağlamaktadır. Kullanılan diyotların ters dayanma gerilimini arttırmak için diyotlar arasında seri bağlantı yapılabilir (46). Doğrultma katında kullanılan diyotların ters dayanma gerilimini arttırmak amacıyla 25 adet diyot seri biçimde lehimlenerek bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Diyotlar birbirine lehimlenirken yüksek gerilimde sivri uç etkisini azaltabilmek için bağlantı noktalarının eğrilik yarıçapı mümkün olduğunca büyütülmüştür.

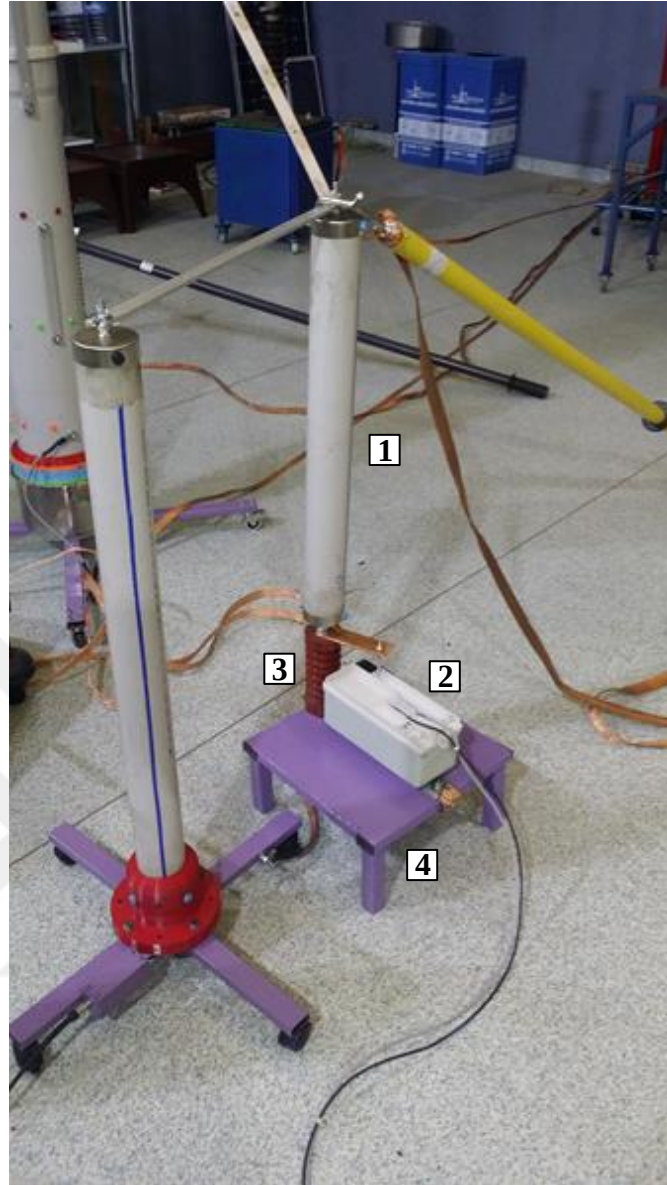
Tez çalışmasında kullanılan transformatörün etiketinde yer alan yüksek gerilim sargılarının dayanabileceği maksimum akım seviyesi 30 mA olarak belirtildiğinden dolayı, ön dirençte kullanılması planlanan dirençlerin değeri buna göre hesaplanmıştır. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen doğrultma katında toplam 52 adet 5.6 k Ω değerinde ve 5 W gücünde taş direnç kullanılmıştır. 52 adet taş direnç seri biçimde birbirine lehimlenirken eğrilik yarıçapları mümkün olduğunca

büyük tutulmaya çalışılmıştır. Toplam 291.2 k Ω değerinde tasarlanan ön direnç ile transformatörün yüksek gerilim sargılarından akan akımın 30 mA seviyesinden düşük tutulması hedeflenmiştir. Şekil 5.14’ te üretilen doğrultma katının iç yapısı paylaşılmıştır.



Şekil 5.14. Üretilen doğrultma katının iç yapısı

Şekil 5.14’ te gösterilen doğrultma katının iç yapısı, dış etkilerden korumak amacıyla yalıtkan bir pvc boru içine sabitlenmiştir. Yalıtkan boru içine sabitlenen doğrultma katının giriş ve çıkış uçlarına kapak ve diğer elemalarla bağlantısını sağlamak için civata monte edilmiştir. Ayrıca doğrultma katının, transformatörle olan bağlantısını sağlamak ve deney esnasında transformatörü uygun bir şekilde konumlandırabilmek amacıyla bir kaide üretilmiştir. Topraklama amacıyla civata monte edilen ve paslanmaya karşı boyanan kaidenin üzerine mesnet izolatör yerleştirilerek doğrultma katı için uygun bağlantı konumu sağlanmıştır. Şekil 5.15’ te üretilen kaide, ve kaidenin üzerinde konumlandırılan transformatör, mesnet izolatörü ve doğrultma katı gösterilmiştir.

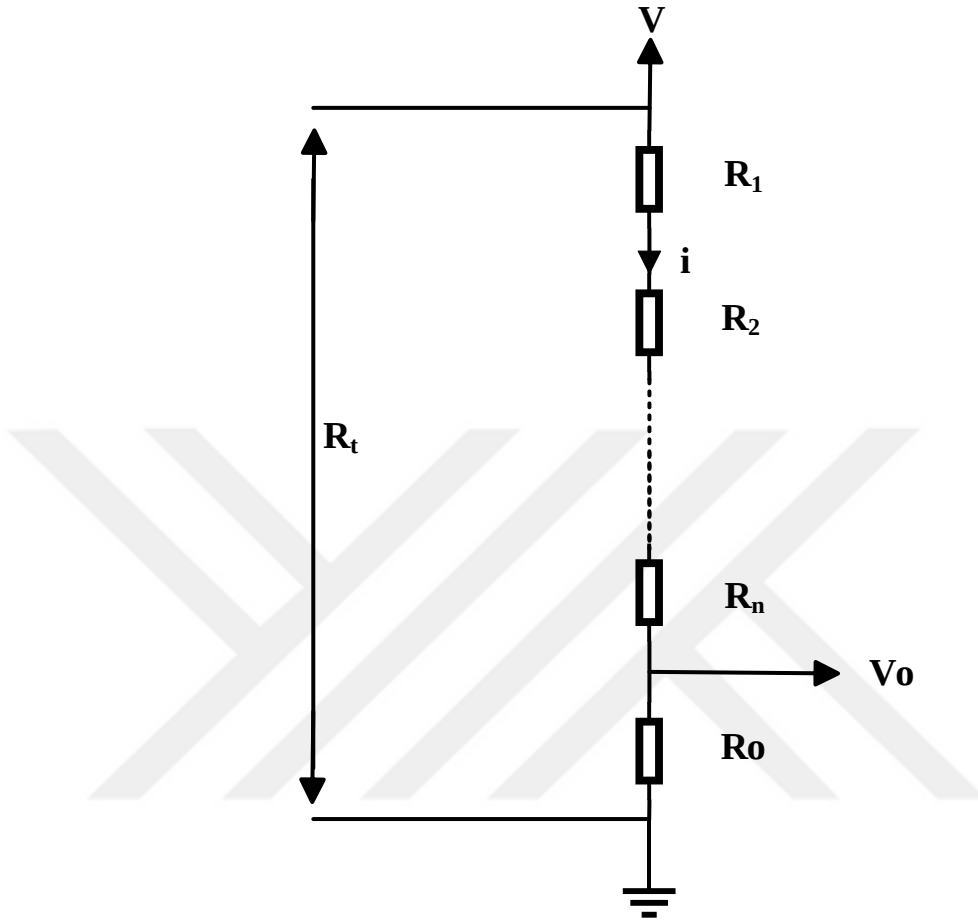


Şekil 5.15. Üretilen kaide, ve kaidenin üzerinde konumlandırılan transformatör, mesnet izolatörü ve doğrultma katı; 1) Doğrultma katı, 2) Transformatör, 3) Mesnet İzolatörü, 4) Kaide

5.5 Omik Gerilim Bölücü Tasarımı ve Üretilmesi

Yüksek gerilim deneylerinde, çalışma geriliminin seviyesini belirleyebilmek, gerçekleştirilen deneyin hassasiyeti açısından çok önemlidir. Yüksek gerilimlerin ölçülmesi, alçak gerilimlerin ölçülmesine göre daha zordur. Ölçülmek istenen yüksek gerilim seviyesi, ölçülebilecek bir seviyeye indirildikten sonra veya ölçü küreleri ya da elektrostatik yöntemler kullanılarak ölçülebilir (47). Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmada darbe kondansatörleri üzerindeki yüksek gerilimi ölçmek için omik gerilim bölücü tasarımı ve üretimi yapılmıştır.

Omik gerilim bölücü tasarımı, Şekil 5.16’ da verilen eşdeğer devreye göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.16. Omik gerilim bölücü eşdeğer devresi

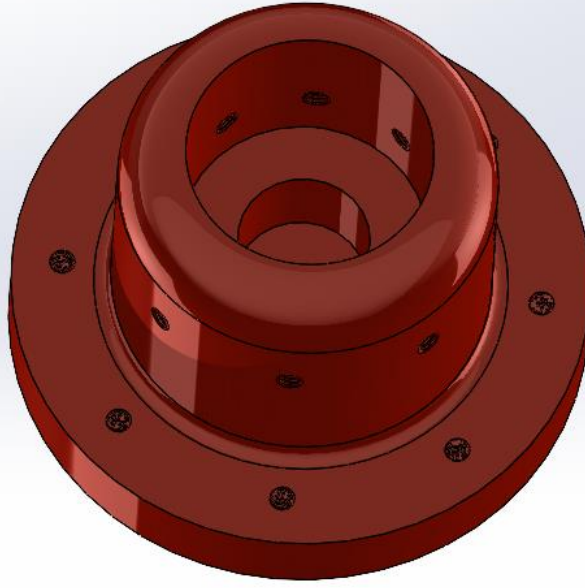
Tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen omik gerilim bölücünde 91 adet 3 W gücünde 220 k Ω değerinde direnç kullanılmıştır. Ölçme ucu ise 2 W gücünde 10 k Ω değerinde bir direnç üzerinden alınmıştır. Omik gerilim bölücünün çevirme oranı 1:2024 olarak ölçülmüştür. Omik gerilim bölücünün çevirme oranı ölçümü GW Instek marka LCR – 819 model LCR metre ile gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen omik gerilim bölücünün iç yapısı Şekil 5.17’ de verilmiştir.



Şekil 5.17. Üretilen omik gerilim bölücünün iç yapısı

Gerilim bölücünün iç yapısı, dış etkilerden korumak için 8 cm çapındaki yalıtkan pvc boru içine yerleştirilmiştir. İçine omik gerilim bölücü yerleştirilen pvc boru için Solidworks programında bir flanş tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan flanş Şekil 5.18’ de paylaşılmıştır.

a)



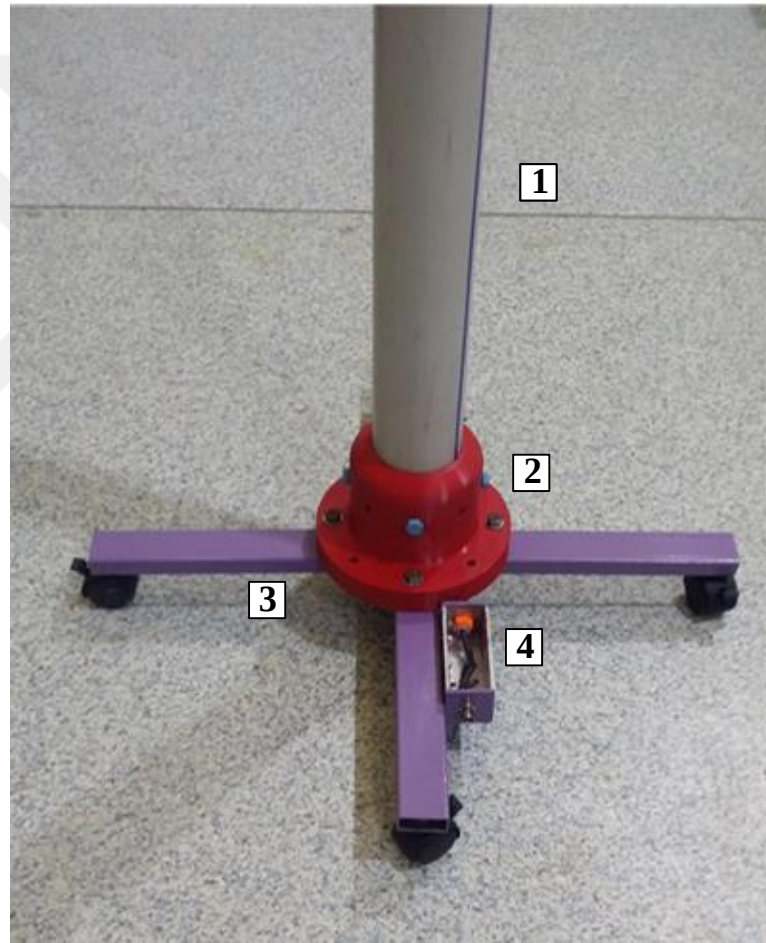
b)



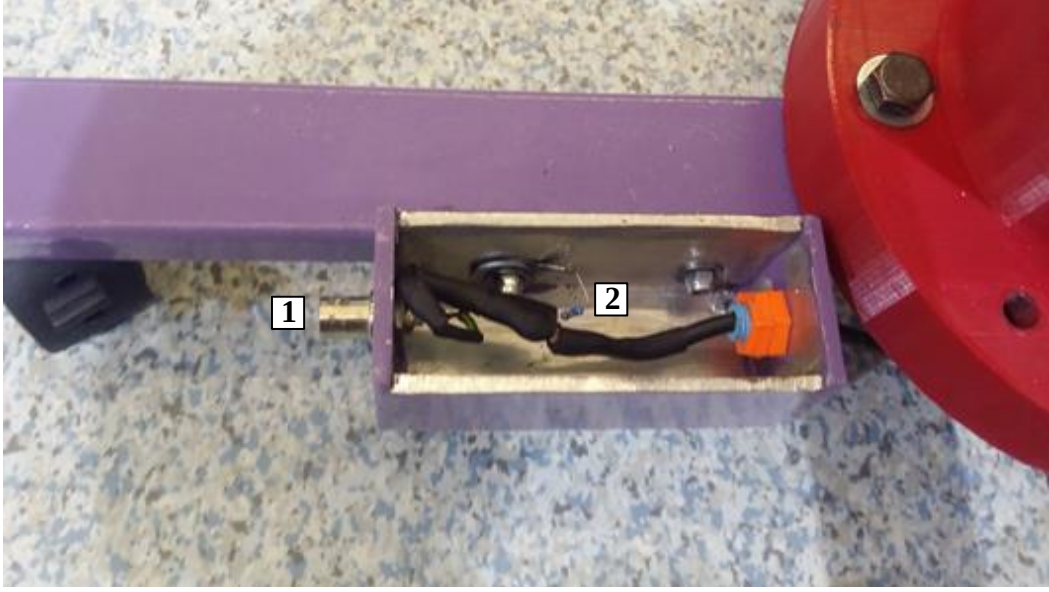
Şekil 5.18. Omik gerilim bölücüyü hareketli kaide üzerine sabitlemek için Solidworks çizim programı ile çizilen flanş; a) Flanşın üstten görünümü, b) Flanşın önden görünümü

Tasarımı gerçekleştirilen flanş 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Omik gerilim bölücüyü üzerine yerleştirmek için 2 cm x 4 cm ölçülerinde demir profillerden taşıyıcı ayak yapılmıştır. Taşıyıcı ayağın üzerine topraklama civatası montajlanmıştır. Taşıyıcı ayak paslanmaya karşı boyanmıştır. Pvc boru, flanş yardımıyla hareketli ayaklar üzerine sabitlenmiştir. Ayrıca omik gerilim bölücünün

çıkışının alındığı ölçüm direnci, kaidenin üzerine montajlanan alüminyum ölçme kutusu içine yerleştirilmiştir. Omik gerilim bölücüsüne ait ölçüm direncinin ölçme kutusuna alınmasıyla, çevirme oranının değiştirilmek istendiğinde kolaylık sağlaması hedeflenilmiştir. Bu şekilde sadece ölçme kutusunda bir direnç değişikliği ile kolaylıkla çevirme oranı değiştirilebilecektir. Kaide üzerine sabitlenen alüminyum ölçme kutusu üzerinde şase tipi bnc konnektör yardımıyla ölçüm için çıkış bağlantıları oluşturulmuştur. Üretilen omik gerilim bölücü ve bu omik gerilim bölücüye ait olan ölçme kutusunun iç yapısı sırası ile Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’ de verilmiştir.



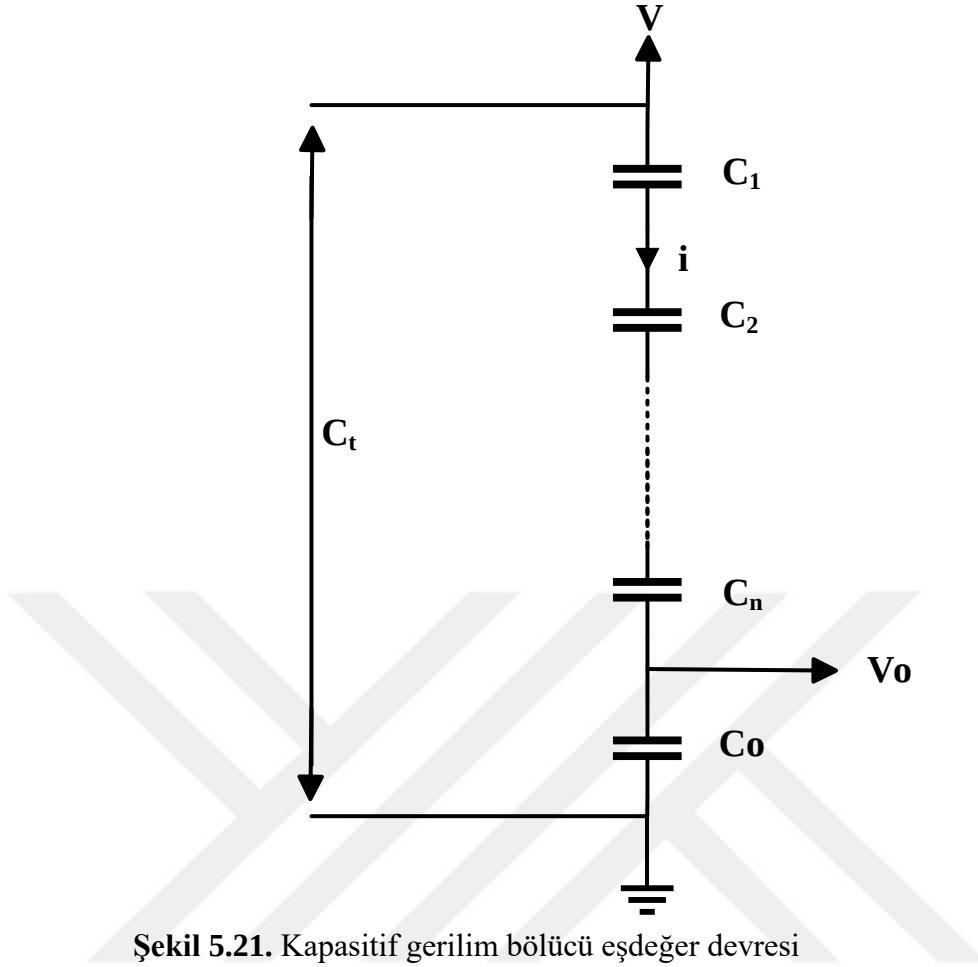
Şekil 5.19. Tasarlanan ve üretilen omik gerilim bölücü; 1) Yalıtkan pvc boru, 2) Flans, 3) Hareketli ayaklar, 4) Alüminyum ölçme kutusu



Şekil 5.20. Omik gerilim bölücüye ait ölçme kutusu; 1) Bnc konnektör, 2) Ölçme ucunun alındığı çıkış direnci

5.6 Kapasitif Gerilim Bölücü Tasarımı ve Üretilmesi

Tez kapsamında testi gerçekleştirilecek olan parafudrların üzerindeki gerilimi ölçebilmek amacıyla kapasitif gerilim bölücü tasarlanmış ve üretilmiştir. Yüksek gerilim altında çalıştırılan gerilim bölücülerde aranan özellikler olarak, devreyi fazla akım çekerek yüklememeleri ve dönüştürme oranlarının kararlı olması belirtilmektedir. Bu sebeple kapasitif gerilim bölücülerin düşük kapasiteye sahip olmaları gerektiği ifade edilmektedir (47). Bu bilgiler ışığında kapasitif gerilim bölücü tasarımı, Şekil 5.21’ de verilen devre şemasına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.21. Kapasitif gerilim bölücü eşdeğer devresi

Tez kapsamında üretimi gerçekleştirilen kapasitif gerilim bölücüde 67 adet 1 pF ve 300 V_{AA} etiket değerine sahip % 10 toleranslı mkp kondansatörler kullanılmıştır. Ölçme ucu ise 10 nF ve 300 V_{AA} değerine sahip mercimek tipi kondansatör üzerinden alınmıştır. Kapasitif gerilim bölücünün çevirme oranı 1:603 olarak ölçülmüştür. Çevirme oranı ölçümü GW Instek marka LCR – 819 model LCR metre kullanılarak 50 Hz frekans değerinde gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kapasitif gerilim bölücünün iç yapısı Şekil 5.22’ de verilmiştir.

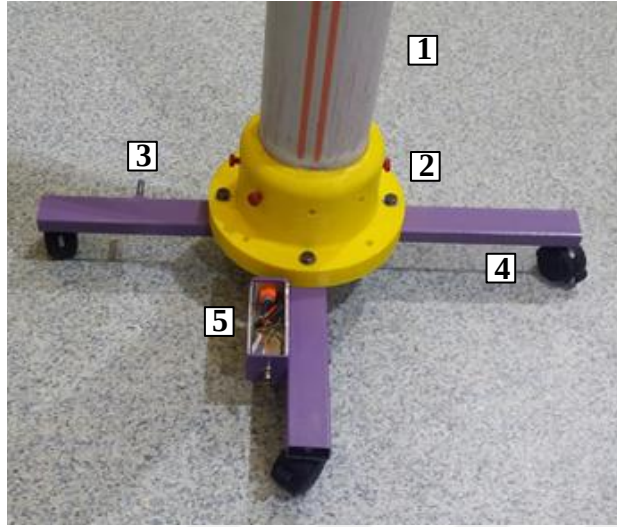


Şekil 5.22. Üretilen kapasitif gerilim bölücünün iç yapısı; 1) Kapasitif gerilim bölücünün giriş bağlantı kablosu, 2) 3 boyutlu yazıcı ile üretilen kapak, 3) Seri bağlı mkp kondansatörler, 4) Kapasitif gerilim bölücünün çıkış bağlantı kablosu, 5) 3 boyutlu yazıcı ile üretilen gerilim bölücü ayağı

Gerilim bölücünün iç yapısı, dış etkilerden korumak için 110 mm çapındaki yalıtkan pvc boru içine yerleştirilmiştir. İçine kapasitif gerilim bölücü yerleştirilen pvc boru için Solidworks programında bir flanş tasarımı yapılmıştır.

Kapasitif gerilim bölücüyü üzerine yerleştirmek için 2 cm x 4 cm ölçülerinde demir profillerden taşıyıcı ayak yapılmıştır. Yine omik gerilim bölücünün kaidesinde olduğu gibi taşıyıcı ayağın üzerine topraklama civatası montajlanmıştır. Taşıyıcı ayak paslanmaya karşı boyanmıştır. 3 boyutlu yazıcı ile kapasitif gerilim bölücü için üretilen flanş, hareketli kaide üzerine montajlanmıştır.

Pvc boru, flanş yardımıyla hareketli ayaklar üzerine sabitlenmiştir. Flanş yardımıyla hareketli ayaklar üzerine yerleştirilen pvc boru Şekil 5.23’ te verilmiştir.



Şekil 5.23. Tasarlanan ve üretilen kapasitif gerilim bölücü; 1) Yalıtkan pvc boru, 2) Flanş, 3) Topraklama civatası, 4) Hareketli ayaklar, 5) Alüminyum ölçme kutusu

Kapasitif gerilim bölücünün çıkışının alındığı ölçüm kondansatörü, yine omik gerilim bölücüde olduğu gibi kaidenin üzerine montajlanan alüminyum ölçme kutusu içine yerleştirilmiştir. Kaide üzerine sabitlenen alüminyum ölçme kutusu üzerine, şase tipi bnc konnektör yerleştirilerek ölçüm için çıkış bağlantıları Şekil 5.20’ dekine benzer yapıda oluşturulmuştur.

5.7 Küre Küre Elektrot Anahtarlama Sistemi

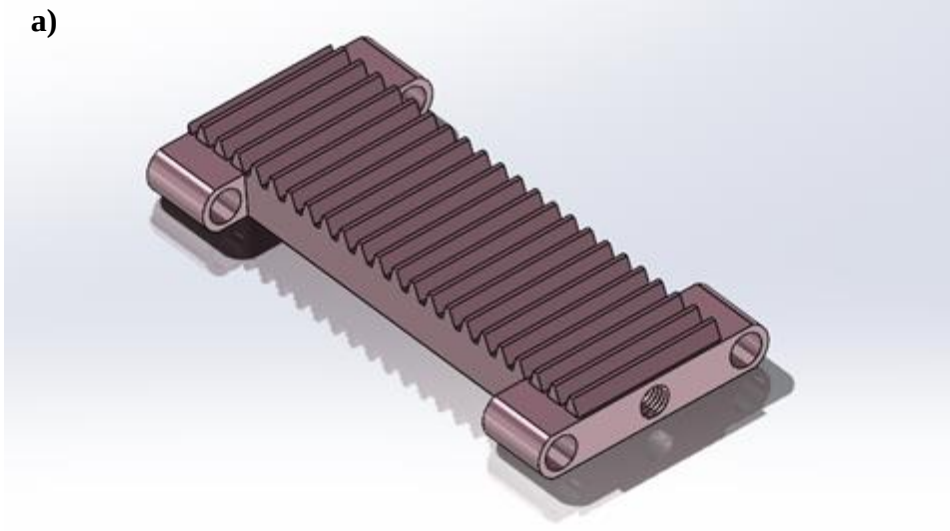
8/20 μ s dalga formunda yıldırım darbe akımı üretebilmek için şarj edilen kondansatörlerin belirli bir gerilimde, üzerinde biriktirdiği toplam Q yükünü bir anahtar üzerinden boşaltması gerekmektedir. Bu amaçla bir küre küre elektrot anahtarlama sistemi tasarlanmıştır. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminde kondansatörlerin biriktirdiği toplam Q yükünü kendi üzerinden boşaltması için 42 mm çapında paslanmaz çelik küreler kullanılmıştır. Kullanılan kürelerden biri Şekil 5.24’ te gösterilmiştir.



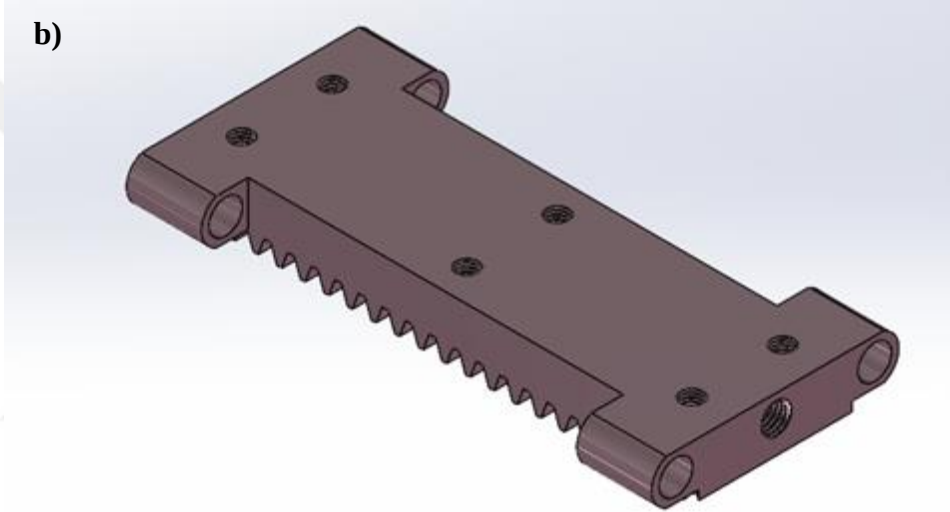
Şekil 5.24. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminde kullanılan 42 mm çapında paslanmaz çelik küre

Küre küre elektrot anahtarlama sistemi, kürelerden biri hareketli iken diğeri sabit pozisyonda kalacak şekilde tasarlanmıştır. Kürenin hareket edebilmesi için redüktörlü doğru akım motorunun miline bağlı bir dişli sistemi ve bu diş yapısına uygun diş yapısında kremayer dişli sistemi Solidworks programında modellenmiştir. Solidworks programında çizimi gerçekleştirilen kremayer dişli modeli Şekil 5.25' te paylaşılmıştır.

a)



b)



Şekil 5.25. a) Redüktörlü doğru akım motorunun miline bağlı dişli ile uyumlu olarak tasarlanan kremayer dişlisinin üstten görünümü, b) Kremayer dişlisinin alttan görünümü

Kremayer dişlisinin bir eksen üzerinde hareketini sağlayabilmek için 8 mm çapında 30 cm uzunluğunda silindirik çubuklar tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sayede kremayer dişlisinin üzerinde bulunan silindirik kanallar kullanılarak kremayer dişlisinin y eksenini boyunca hareket etmesi hedeflenilmiştir. Ayrıca silindirik çubukları, koruyucu bir mahfazaya sabitleyebilmek için 4 adet sabitleyici parça tasarımı ve üretimi yapılmıştır.

Küre küre elektrot sisteminin hareket etmesini sağlamak için tasarlanan hareket mekanizması koruyucu bir mahfaza içine yerleştirilmiştir. Koruyucu mahfaza için 8 cm çapında ve 35 cm uzunluğunda yalıtkan pvc boru kullanılmıştır.

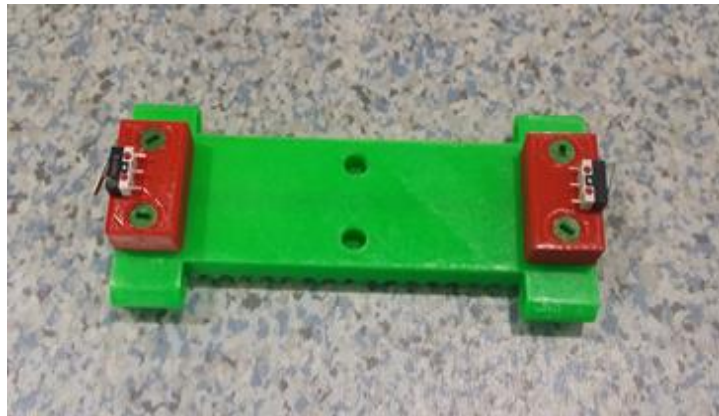
Koruyucu mahfazanın giriş ve çıkış kısımları için Solidworks programında kapak tasarlanmış ve üretilmiştir.

Tasarlanan küre küre elektrot anahtarlama sisteminde y ekseninde hareket etmesi istenen küreler için her iki yönde de sınır anahtarı kullanılmıştır. Bu sayede +y ve -y yönünde sınır bölgesine gelen kremayer dişlisinin daha fazla hareket etmesinin önüne geçilmiştir. Sınır anahtarlarını kremayer dişlisinin üzerine sabitleyebilmek için Solidworks programı kullanılarak sınır anahtarı sabitleyici parça tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiştir.

Sınır anahtarlarının üzerine yerleştirildiği sınır anahtarları sabitleyici parçalar, kremayer dişlisinin üzerine montajlanmıştır. Koruyucu bir mahfaza içine yerleştirilecek olan kremayer dişlisinin, üzerinde bulunan sınır anahtarlarının kontak uçlarına kablo bağlantıları yapılmıştır. Şekil 5.26' da sınır anahtarlarının üzerine yerleştirildiği kremayer dişlisi gösterilmiştir.



a)

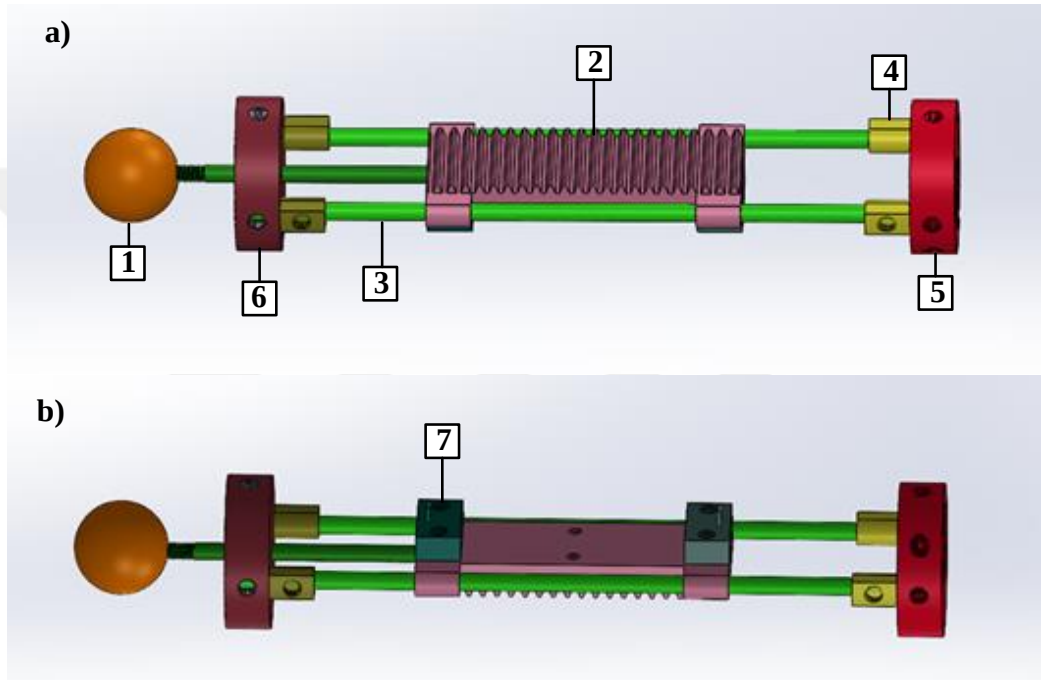


b)

Şekil 5.26. a) Kremayer dişlisinin üstten görünümü, b) Kremayer dişlisi üzerine yerleştirilen sınır anahtarları

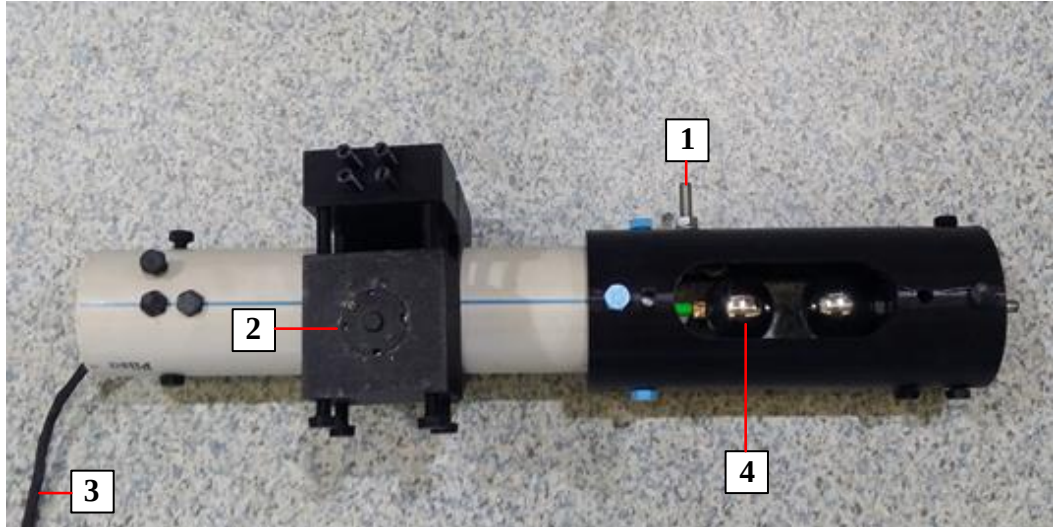
Kremayer dişlisinin ileri geri hareketine bağlı olarak hareket etmesi planlanan çelik kürenin, kremayer dişlisine bağlantısı için her iki ucu metrik 8 diş yapısında olan bir mil tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen 8 mm çapındaki bu mil ile çelik küre ve kremayer dişlisinin birbiri ile olan bağlantısı gerçekleştirilmiştir.

Solidworks programında tasarımı gerçekleştirilen küre küre elektrot anahtarlama sistemine ait parçaların birbiri ile montajlanmış hali Şekil 5.27' de paylaşılmıştır.



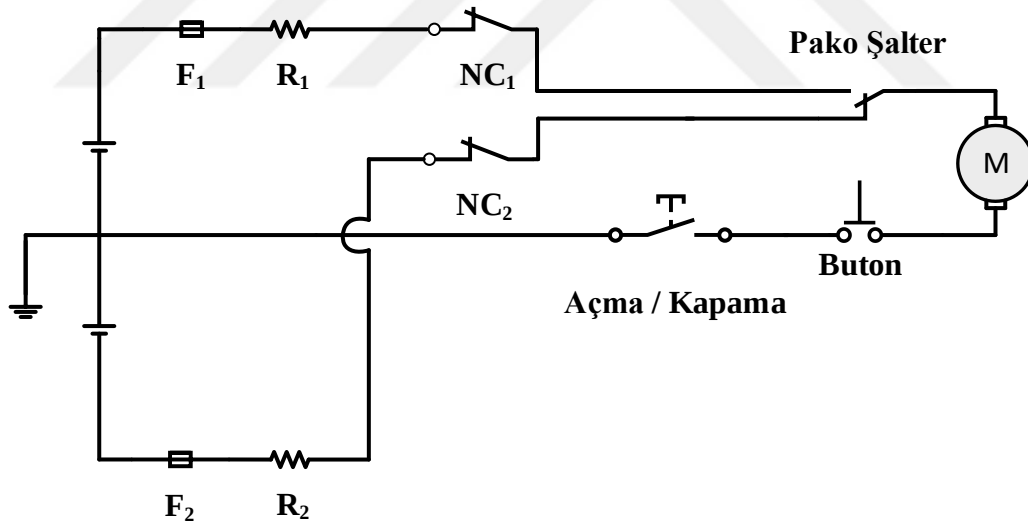
Şekil 5.27. Tasarımı gerçekleştirilen küre küre elektrot anahtarlama sistemi parçalarının birbiri ile montajlanmış hali; a) Üstten görünüm, b) Altan görünüm; 1) Paslanmaz çelik küre, 2) Kremayer dişlisi, 3) Kremayer dişlisinin y ekseninde hareketine yardımcı olan 8 mm çapındaki silindirik çubuklar, 4) 8 mm çapındaki silindirik çubukları koruyucu mahfaza içinde sabitleyen, sabitleyici parçalar, 5) Koruyucu mahfazaya yerleştirilen üst kapak, 6) Koruyucu mahfazaya yerleştirilen alt kapak, 7) Sınır anahtarının üzerine yerleştirildiği sınır anahtarı sabitleyici parça

Üretimi gerçekleştirilen küre küre elektrot anahtarlama sisteminin nihai hali Şekil 5.28' de verilmiştir.



Şekil 5.28. Üretimi gerçekleştirilen küre küre elektrot anahtarlama sisteminin nihai hali; 1) Çelik küreyi, şarj edilen darbe kondansatörlerine bağlamak için çıkarılan metrik 8 bağlantı ucu, 2) Redüktörlü doğru akım motoru, 3) Sınır anahtarlarına ait kablo bağlantıları, 4) Paslanmaz çelik küre

Küre küre elektrot anahtarlama sistemini kontrol etmek için tasarlanan kontrol devresine ait şema Şekil 5.29’ da verilmiştir.

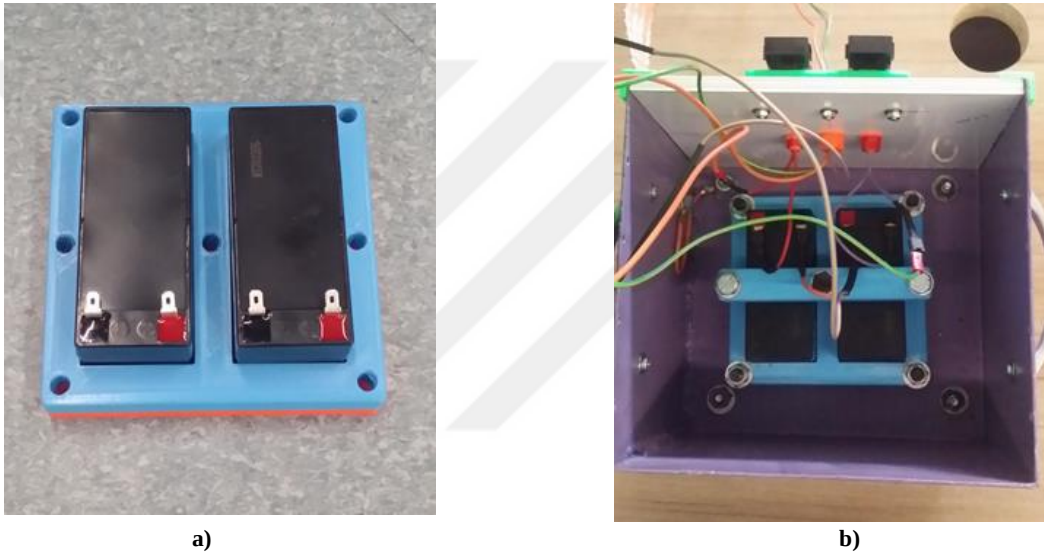


Şekil 5.29. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminin kontrol devresi; F_1 ve F_2 : Sigorta, R_1 ve R_2 : Direnç, NC_1 : Yukarı yöndeki sınır anahtarının normalde kapalı kontağı, NC_2 : Aşağı yöndeki sınır anahtarının normalde kapalı kontağı

Şekil 5.29’ da devre şeması verilen küre küre elektrot anahtarlama sisteminin kontrol devresi, 20 cm x 20 cm x 20 cm ölçülerinde üretilen bir kumanda panosu içine yerleştirilmiştir. İstenilen ölçülerde kesilen 1 mm kalınlığındaki sac levha yardımıyla oluşturulan pano, paslanmaya karşı boyanmıştır. Kontrol devresinin içine yerleştirildiği kumanda panosunu topraklayabilmek için metrik 8

civata ve buna uygun somun yardımıyla topraklama ucu çıkarılmıştır. Kumanda panosunun taşıma kulpları ve 3 boyutlu yazıcı ile üretilen taşıyıcı ayaklar, panoya montajlanmıştır.

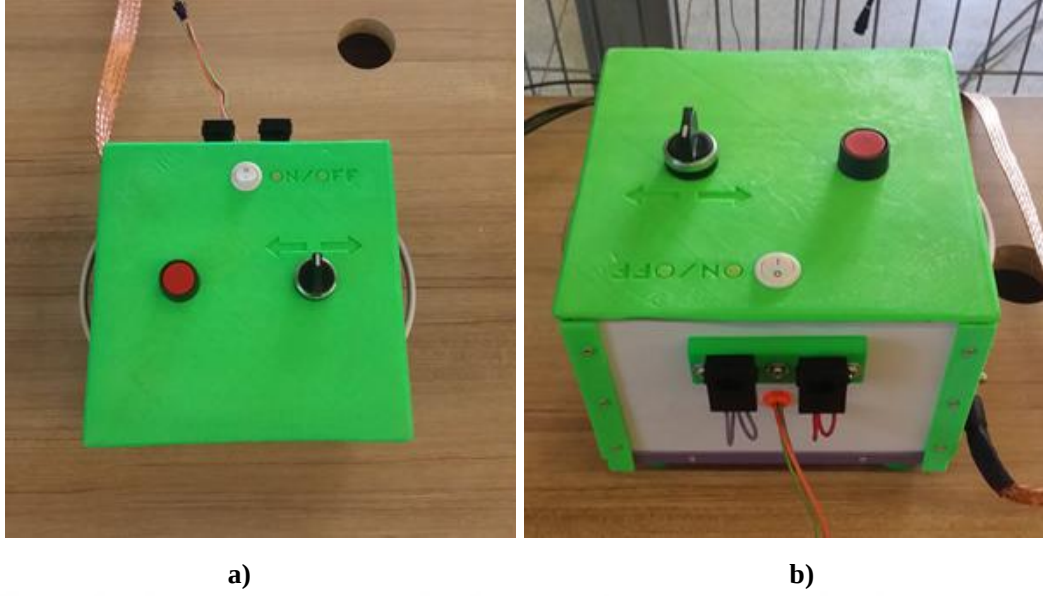
Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen küre küre elektrot anahtarlama sisteminin hareket etmesini sağlayacak olan redüktörlü doğru akım motorunun enerji beslemesi için 12 V ve 1.3 Ah etiket değerine sahip 2 adet kuru tip akü kullanılmıştır. Akülerin, kumando panosu içinde sabit olarak kalması için 3 boyutlu yazıcı kullanılarak akü yuvası üretilmiştir. Kullanılan aküler ve üretilen akü yuvası Şekil 5.30' da verilmiştir.



Şekil 5.30. Küre küre elektrot anahtarlama sistemine enerji vermek için kullanılan aküler; a) Akülerin akü yuvasına yerleştirilmiş hali, b) Akü yuvasının kumanda panosu içine montajlanmış ve diğer bağlantıların yapılmış hali

3 boyutlu yazıcı ile üretilen kablo rakorları yardımıyla kumanda panosunun giriş ve çıkış yuvaları oluşturulmuştur. Ayrıca aşırı akım sigortalarını yerleştirebilmek için yine 3 boyutlu yazıcı yardımıyla sigorta tutacağı üretilerek panoya sabitlenmiştir.

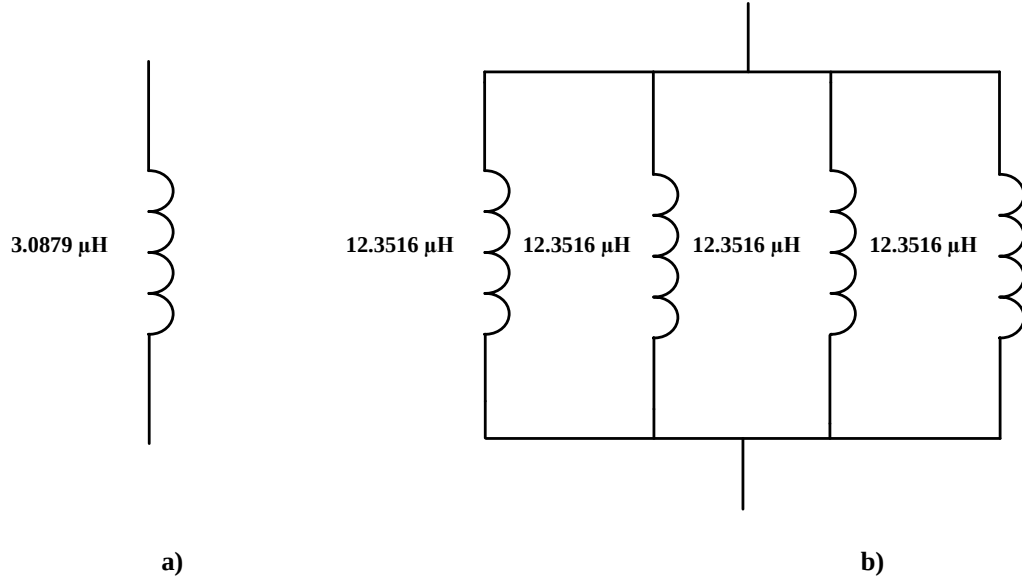
Kontrol panosu için Solidworks programında kapak tasarlanmıştır. 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen kapak, panoya takılmıştır. Tasarım esnasında kapak üzerine açılan yuvalara pako şalter, açma kapama butonu ve yaylı buton takılmıştır. Kontrol devresi şemasında gösterilen sigortalar, kumanda panosunun dışına yerleştirilerek arıza durumunda kolay bir şekilde değiştirilmesi hedeflenmiştir. Üretimi gerçekleştiren kumanda panosu Şekil 5.31' de verilmiştir.



Şekil 5.31. Küre küre elektrot sisteminin kontrol edildiği kumanda panosu; a) Üstten görünüm, b) Arkadan görünüm

5.8 Bobin ve Direnç Elemanlarının Tasarım ve Üretimi

Darbe akımı üretici deney sisteminde kullanılması gerekli olan bobinin endüktans değeri Bölüm 5.1’ de (5.37) denklemi ile verilmiştir. Darbe akımı üretici devresi ile çok yüksek değerlerde akım üretileceğinden dolayı sarılan bobinin bu yüksek akım karışısında zarar görmemesi için gerekli olan endüktans değerini sağlamak için yaklaşık olarak eşit değerde 4 adet bobin sarımı gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla gerekli olan $3.0879 * 10^{-6}H$ endüktans değeri 4 katına çıkarılarak $12.3516 * 10^{-6}H$ seçilmiştir. Akımın tek koldan akması ve 4 kola dağılarak akması durumunda gerekli olan endüktans değerleri Şekil 5.32’ de paylaşılmıştır.



Şekil 5.32. a) Akımın tek koldan akması durumunda gerekli olan bobinin endüktans değeri, b) Akımın 4 kola dağılarak akması durumunda gerekli olan bobinlerin endüktans değerleri

Gerekli olan endüktans değeri belirlendikten sonra bobin tasarımında kullanılacak olan bakır kablo belirlenmiştir. Bobinlerin sarımı için izolasyonlu tel çapı 4.25 mm ve izolasyonsuz kablo çapı 2.7 mm olan bakır nya kablo kullanılmıştır. Bakır kablonun etrafına sarılacağı karkas çapı ise 43 mm olarak belirlenmiştir. Bobin tasarımı gerçekleştirilirken bu özelliklerdeki bakır kablo ve karkasın kullanılması durumunda gerekli olan sarım sayısı Coil64® bobin tasarım programı yardımıyla hesaplanmıştır. Coil64® programı kullanılarak hesaplanan değerler Şekil 5.33’ te paylaşılmıştır. Bobin sarımı için seçilen parametreler Tablo 5.3’ te verilmiştir.

Tablo 5.3. Bobinlerin sarımı için seçilen parametreler

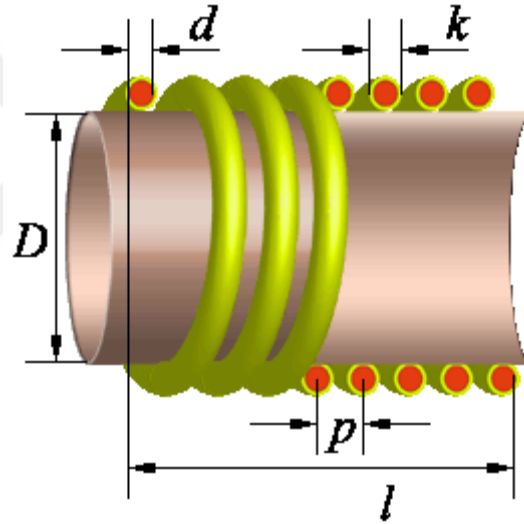
Parametre	Değer
Frekans (f)	25 kHz
Karkas çapı (D)	43 mm
Kablo çapı (d)	2.7 mm
İzolasyonlu Tel Çapı (k)	4.25 mm
Sargı arası adım (p)	5 mm

Tablo 5.3' te 1. Satırda belirtilen frekans değeri (5.42) denkleminde göre belirlenmiştir. (5.48) denklemindeki C ve L yerine sırası ile (5.28) ve (5.41) eşitlikleri ile ifade edilen değerler yazılarak f_r değeri hesaplanmıştır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.48)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{3.0879 * 10^{-6} * 13.125 * 10^{-6}}} \quad (5.49)$$

$$f_r = 25 \text{ KHz} \quad (5.50)$$



Girdi:

İnduktans L: 12,3516 microH
 Frekans f: 25 kHz
 Karkas çapı D: 43 mm
 Kablo çapı d: 2,7 mm
 İzolasyonlu Tel çapı k: 4,25 mm
 Sargı arası adım p: 5 mm

Sonuçlar:

Bobinin sarım sayısı N = 32,005
 Potansiyel olmadan tel uzunluğu lw = 4,754 m
 Sarım uzunluğu l = 164,276 mm
 Tel ağırlığı m = 243,863 g
 Bobin direnci Rdc = 0,014 Ohm
 Bobin reaktans X = 1,940 Ohm

Şekil 5.33. Coil64 programı yardımıyla belirlenen sarım sayısı

Coil64 programı yardımıyla hesaplanan sarım sayısı 32 olarak hesaplanmıştır. $N = 32$ sarımlı bir bobin üretebilmek için gerekli olan 43 mm çapındaki silindirik karkas Solidworks programı ile tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı yardımıyla üretilmiştir. Tasarlanan ve üretilen karkaslar Şekil 5.34' te gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 5.34. a) Solidworks programı ile tasarlanan 17 cm uzunluğundaki ve 43 mm çapındaki silindirik karkas, b) 3 boyutlu yazıcı ile üretilen karkaslar

Bobinlerin sarılabilmesi için gerekli olan karkaslar 3 boyutlu yazıcı ile üretildikten sonra karkasların etrafına bakır kablo sarılmıştır. Bakır kablonun sarıldığı karkaslar Şekil 5.35’ te verilmiştir.

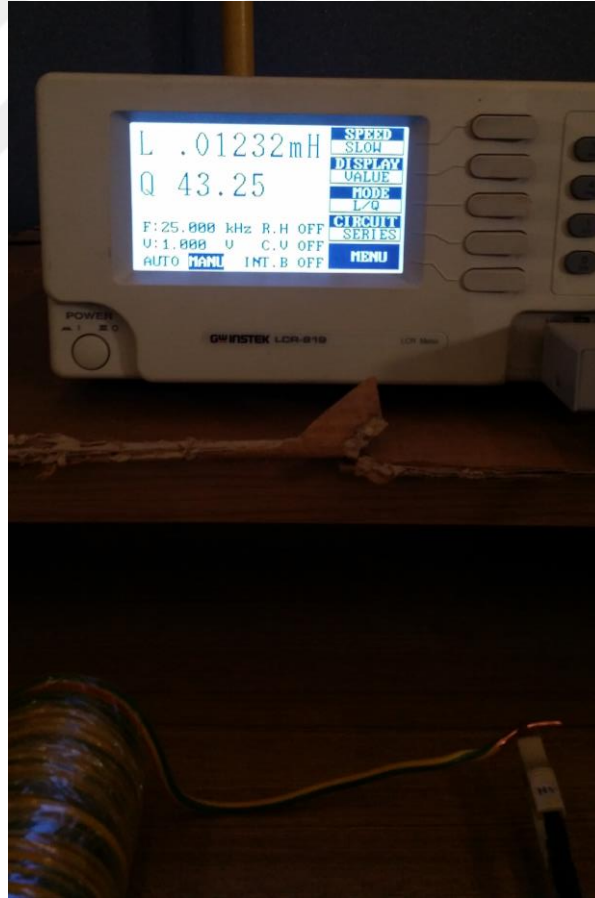


Şekil 5.35. Karkas etrafına sarılan 2.7 mm çapındaki bakır nya kablo

Üretimi gerçekleştirilen 4 bobinin endüktansı GW Instek marka LCR – 819 model LCR metre kullanılarak 25 kHz frekans değerinde ölçülerek kontrol edilmiştir. Şekil 5.36’ da, sarımı gerçekleştirilen bobinin LCR metre ile endüktans ölçümü gösterilmiştir. Sarımı gerçekleştirilen bobinlere ait ölçülen endüktans değerleri Tablo 5.4’ te verilmiştir.

Tablo 5.4. Üretilen bobinlerin ölçülen endüktans değerleri

Ölçülen Bobin Numarası	Ölçülen Endüktans Değeri
1. Bobin	12.32 μ H
2. Bobin	12.38 μ H
3. Bobin	12.36 μ H
4. Bobin	12.34 μ H



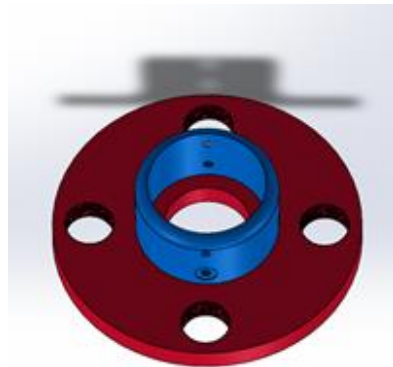
Şekil 5.36. Üretimi gerçekleştirilen 1. bobinin LCR metre ile ölçümü

4 adet bobin üretildikten sonra, bobinlerin giriş ve çıkış uçlarına kablo pabucu takılmıştır. Kablo pabucu takılan bobinlerin etrafına, ısıyla daralan makaron yerleştirilerek yüksek akım geçişi sırasında elektrostatik kuvvetlerden dolayı sargıların hareket etmesinin önüne geçilmiştir. Koruyucu makaron yerleştirilen bobinler Şekil 5.37’ de paylaşılmıştır.



Şekil 5.37. Üretilen bobinlerin giriş ve çıkış uçlarına takılan kablo pabucu ve bobinlerin etrafına yerleştirilen ısıyla daralan makaron

İstenilen endüktans değerindeki 4 bobin üretilip bağlantı uçları hazırlandıktan sonra Solidworks programı kullanılarak küre küre elektrot anahtarlama sistemi ve bobinleri bir arada tutabilmek için Şekil 5.38’ de paylaşılan model tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı yardımı ile üretilmiştir.



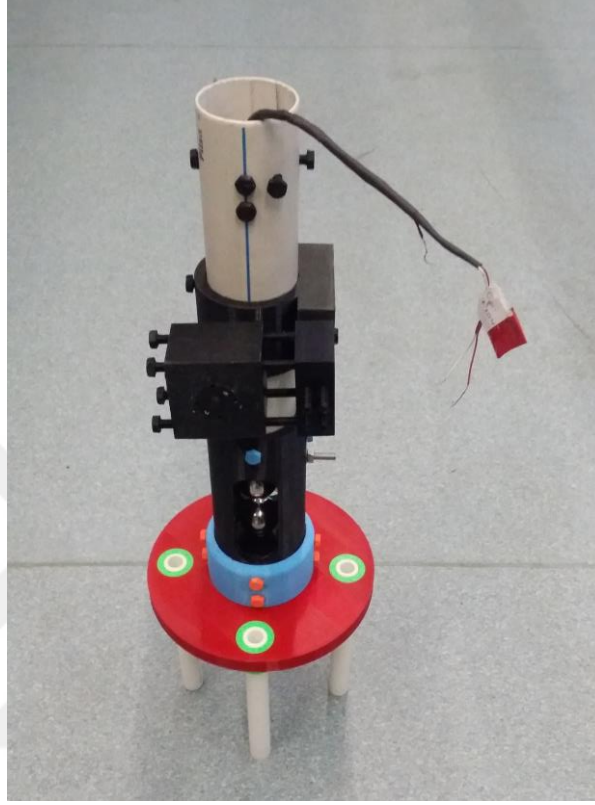
a)



b)

Şekil 5.38. a) Küre küre elektrot anahtarlama sistemi ve bobinleri bir arada tutabilmek için tasarlanan model b) Tasarlanan modelin 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş hali

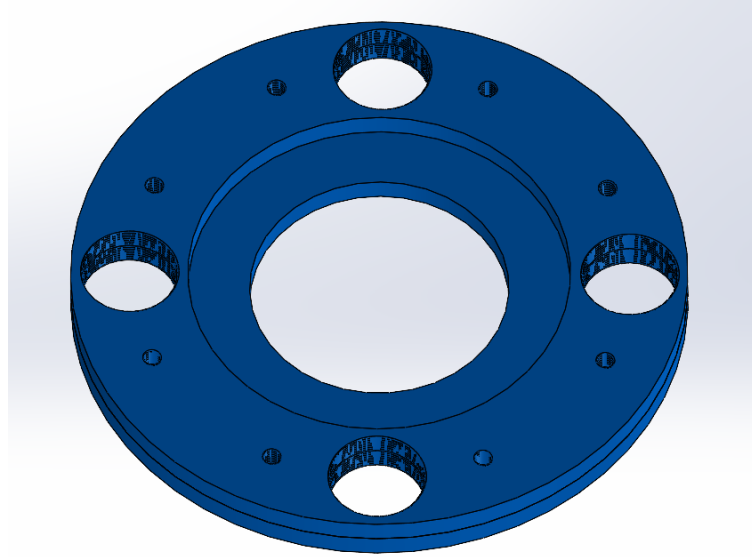
Şekil 5.38’ de paylaşılan model üretildikten sonra küre küre elektrot anahtarlama sistemi üretilen bu model içine yerleştirilmiştir. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminin için yerleştirildiği yapı Şekil 5.39’ da verilmiştir.



Şekil 5.39. Küre küre elektrot anahtarlama sisteminin içine yerleştirildiği disk ve bu diske montajlanan pvc borular

Küre küre elektrot anahtarlama sisteminin içine yerleştirildiği diske 4 adet 25 cm uzunluğunda ve 3 cm çapında pvc boru montajlanarak bir sonraki disk için bağlantı kısımları oluşturulmuştur. Bağlantı kısımlarının oluşturulabilmesi için tasarımı yapılan diskler 1.25 mm dış adımına sahip 40 mm çapında dış açılmıştır. Açılan bu dişlere uygun olarak pvc boru sabitleyici parça tasarlanmış ve üretilmiştir.

Şekil 5.39’ da gösterilen yapı fiziksel olarak üretildikten sonra Şekil 5.40’ ta gösterilen ikinci model disk 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir.



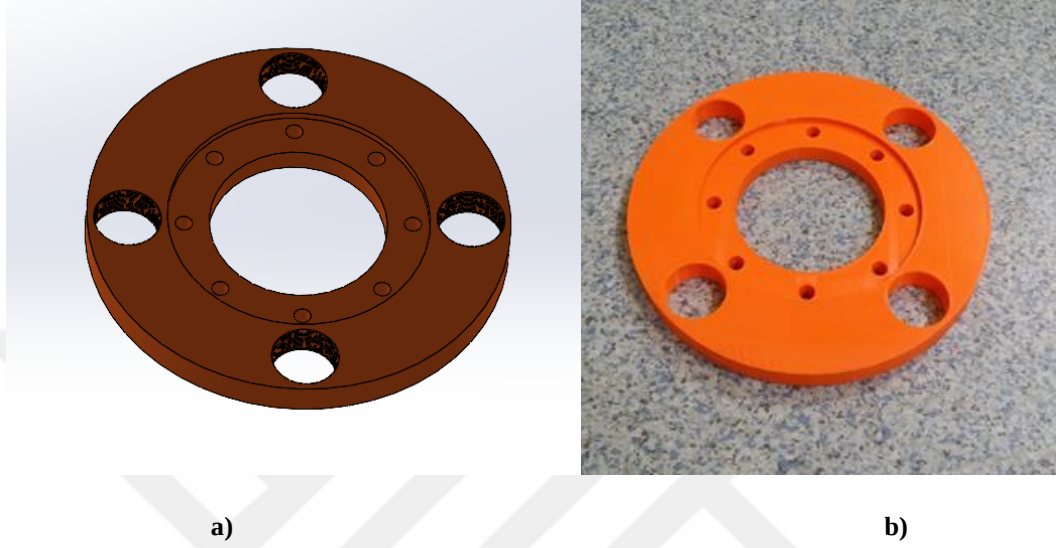
Şekil 5.40. Tasarımı yapılan ikinci model disk

İkinci model disk üretildikten sonra iki disk pvc boru ile birleştirilmiştir. Pvc borular kullanılarak iki disk arasına bobinler yerleştirilmiştir. İki disk arasına yerleştirilen bobinler Şekil 5.41’ de paylaşılmıştır.



Şekil 5.41. Bobinler ve 3 boyutlu yazıcı ile üretilen disklerin birleştirilmiş hali

Şekil 5.41’ de gösterildiği gibi 4 adet bobinin uçları metrik 8 civata yardımı ile birleştirilerek 15 cm çapındaki alüminyum disk üzerinde birleştirilmiştir. Şekil 5.42’ de paylaşılan üçüncü model disk 3 boyutlu yazıcı ile üretilerek ikinci alüminyum disk bu model içine yerleştirilmiştir.



Şekil 5.42. a) Üzerine 15 cm çapındaki alüminyum diskin yerleştirilmesi için tasarlanan üçüncü model disk b) Üretilen üçüncü model disk

Şekil 5.42’ de paylaşılan üçüncü model disk üretildikten sonra Şekil 5.41’ deki yapıyla yine pvc borular yardımıyla birleştirilmiştir. Üretilen fiziksel yapı Şekil 5.43’ te paylaşılmıştır.



a)



b)

Şekil 5.43. Alüminyum disk ve üretilen üçüncü model disk yardımı ile oluşturulan yapı a) Yukarıdan görünüm b) Aşağıdan görünüm

Şekil 5.43' te gösterilen fiziksel yapı üretildikten sonra, deney numunesini yerleştirebilmek ve Şekil 5.44' teki yapıyı hareketli ayaklar üzerine yerleştirebilmek için iki adet disk daha 3 boyutlu yazıcı yardımı ile üretilmiş ve gerekli bağlantılar yapıldıktan sonra Şekil 5.44' teki nihai yapı elde edilmiştir. 3 boyutlu yazıcı ile üretilen diskleri taşıyan hareketli ayaklara yine diğer kaidelerde olduğu gibi gövdesi üzerinden topraklanmak için metrik 8 civata bağlantısı yapılmış ve paslanmaya karşı boyanmıştır.



Şekil 5.44. Bobin ve küre küre elektrot sisteminden oluşan yapı

Darbe akımı üretici devresinde kullanılması gerekli olan ve Bölüm 5.1’ de (5.41) denklemi ile değeri hesaplanan direnç üretimi için paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. Paslanmaz çeliğin öz direnç değeri $6.9 \times 10^{-7} \Omega \text{m}$ alınarak gerekli olan uzunluk değeri (5.51) denklemi ile hesaplanmıştır (48).

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (5.51)$$

(5.51) denkleminde R (direnç), ρ (özdirenç) ve A (kesit alanı) terimlerinin değeri yerlerine yazılarak (5.52) denklemi elde edilebilir. Direnç üretimi için 1 mm çapında paslanmaz çelik tel kullanıldığı için hesaplamalarda $r = 0.5 \text{ mm}$ alınmıştır.

$$0.97 = \frac{6.9 * 10^{-7} * l}{\pi(0.5 * 10^{-3})^2} \quad (5.52)$$

(5.52) denkleminde l terimi yalnız bırakılırsa (5.53) denklemi elde edilebilir.

$$l = \frac{\pi(0.5 * 10^{-3})^2 * 0.97}{6.9 * 10^{-7}} \quad (5.53)$$

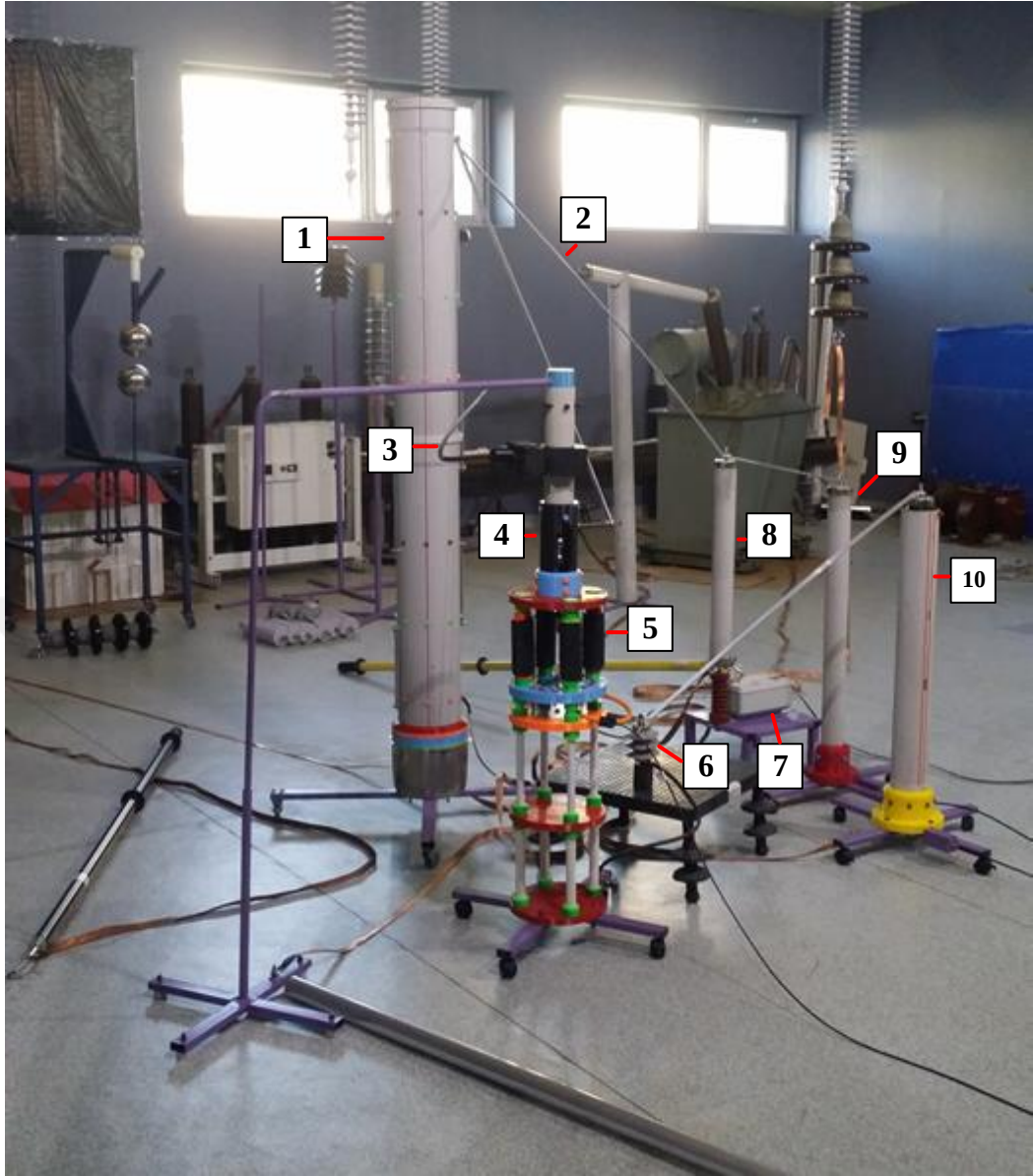
İşlemlere devam edildiğinde direnç üretiminde gerekli olan paslanmaz çelik telin uzunluğu (5.55) eşitliğinde elde edilmektedir.

$$l = \frac{6.9 * 10^{-7} * l}{\pi(0.5 * 10^{-3})^2} \quad (5.54)$$

$$l = 1.1041 \text{ m} \quad (5.55)$$

0.97 Ω değerinde direnç elde etmek için 110 cm uzunluğunda 1 mm çapında paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. Gerekli uzunlukta kesilen tel, bobinler ile deney numunesi arasına bağlanmıştır.

Geliştirilen deney sisteminin nihai hali Şekil 5.45' te verilmiştir.



Şekil 5.45. Geliştirilen deney sisteminin nihai hali; 1) Darbe kondansatörü seti, 2) Bağlantı barası, 3) Küre küre elektrot anahtarlama sistemindeki redüktörlü doğru akım motoruna ait bağlantıların ekranlanması amacıyla kullanılan esnek metal kılıf, 4) Küre küre elektrotlar, 5) Bobinler, 6) Deney numunesi (parafudr), 7) Transformatör, 8) Ön direnç ve diyot katı, 9) Omik gerilim bölücü, 10) Kapasitif gerilim bölücü

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

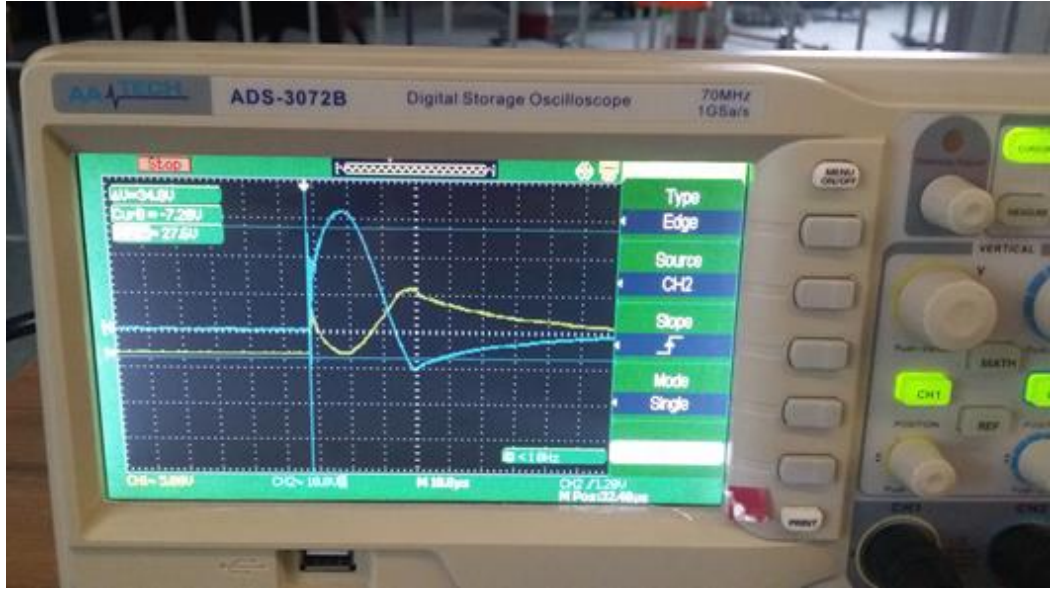
Tez çalışması ile geliştirilen deney sistemi kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde 8/20 μ s dalga formunda standart yıldırım darbe akımı üretilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde yıldırım darbe akımını gözlemleyebilmek için AATECH marka ADS – 3072B model osiloskop kullanılmıştır. Osiloskobun frekans bant genişliği üretici firma tarafından 70 MHz olarak belirtilmektedir.

Geliştirilen deney sistemi kullanılarak üretilen yıldırım darbe akımını gözlemleyebilmek için şönt direnç kullanılmıştır. Kullanılan şönt direncin değeri 11.5 m Ω 'dur.

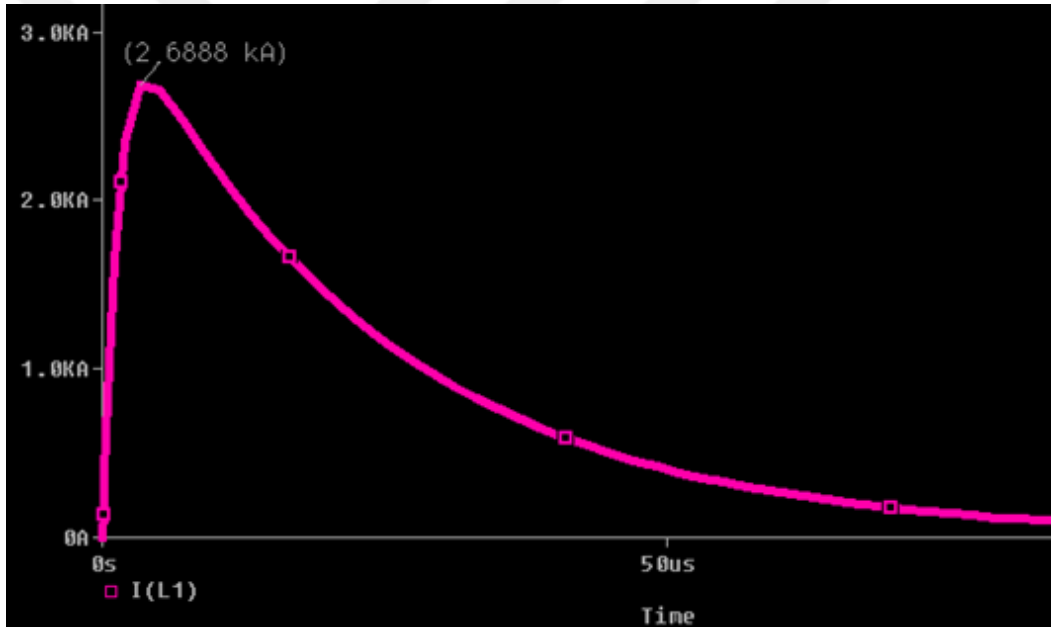
Geliştirilen deney sistemi ile farklı gerilim seviyelerinde standart yıldırım darbe akımı üretilmiştir. Farklı gerilim seviyelerinde elde edilen 8/20 μ s yıldırım darbe akımının osiloskop görüntüleri bu bölümde paylaşılmaktadır.

Geliştirilen deney sistemine ait yıldırım darbe akımı devresinde, kullanılması gereken darbe kondansatörünün değeri Bölüm 5' te (5.28) denklemi ile 13.125 μ F olarak hesaplanmıştır. Deney sistemine ait deneyler ise 13.125 μ F sığasına sahip darbe kondansatörü yerine 10.19 μ F ve 5.1 μ F sığasına sahip darbe kondansatörleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu durumun temel sebebi mevcut kondansatörlerle 13.125 μ F sığasına sahip darbe kondansatörü üretilmemesidir.

Geliştirilen deney sistemi ile 7500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deneye ait osiloskop görüntüsü Şekil 6.1' de paylaşılmıştır.



a)



b)

Şekil 6.1. a) 7500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu üretilen 8/20 μ s yıldırım darbe akımının osiloskop görüntüsü (CH1: Parafudr üzerine düşen gerilim, CH2: 8/20 μ s dalga formunda yıldırım darbe akımı), b) Pspice analiz programı yardımıyla 7500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile elde edilen yıldırım darbe akımı

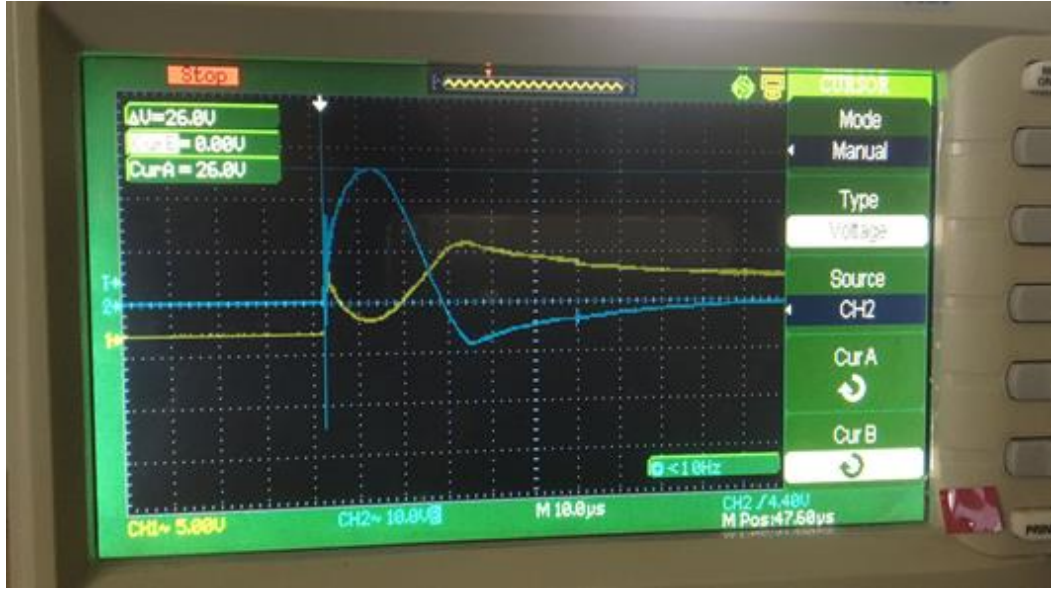
Şekil 6.1' de osiloskop görüntüsü verilen yıldırım darbe akımının tepe değeri denklem (6.1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$I_{tepe} = \frac{31V}{11.5m\Omega} = 2695 \text{ Amper} \quad (6.1)$$

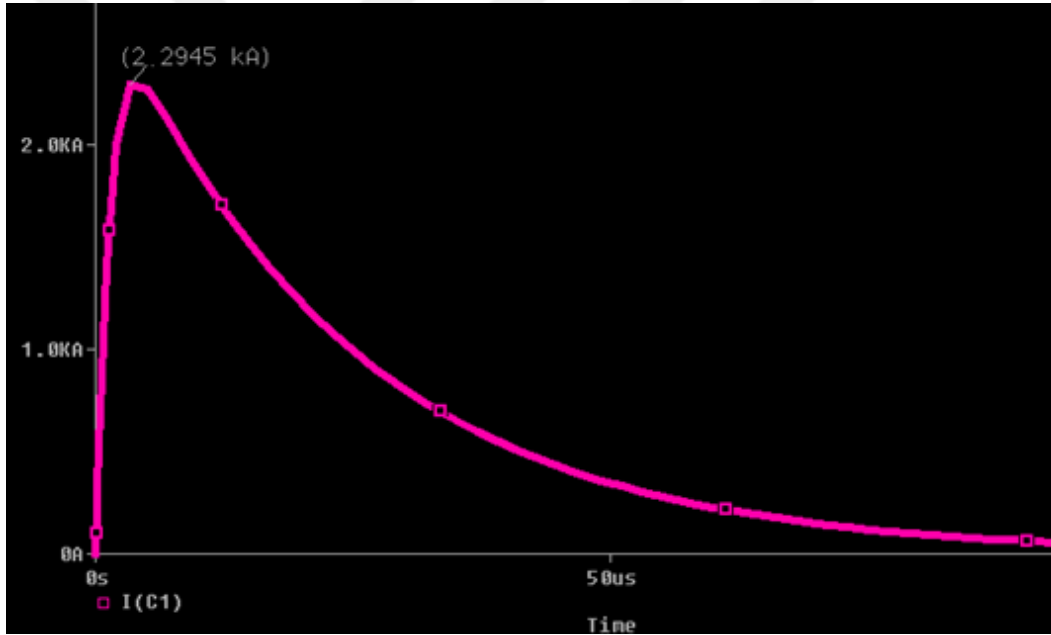
Şekil 6.1' de Pspice analiz programı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmasının sonucunda elde edilen grafik verilmiştir. Grafikteki yıldırım darbe akımının tepe değeri 2688 A'dır. Benzetim çalışmasında elde edilen yıldırım darbe akımının tepe değeri, 7500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney ile elde edilen tepe değerine çok yakındır. Teorik hesaplamalar ve deney verileri 7500 V gerilim seviyesinde birbirleri ile uyumlu sonuçlar vermiştir.

6400 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deneye ait osiloskop görüntüsü Şekil 6.2' de paylaşılmıştır.





a)



b)

Şekil 6.2. a) 6400 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu üretilen 8/20 μ s yıldırım darbe akımının osiloskop görüntüsü (CH1: Parafudr üzerine düşen gerilim, CH2: 8/20 μ s dalga formunda yıldırım darbe akımı), b) Pspice analiz programı yardımıyla 6400 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile elde edilen yıldırım darbe akımı

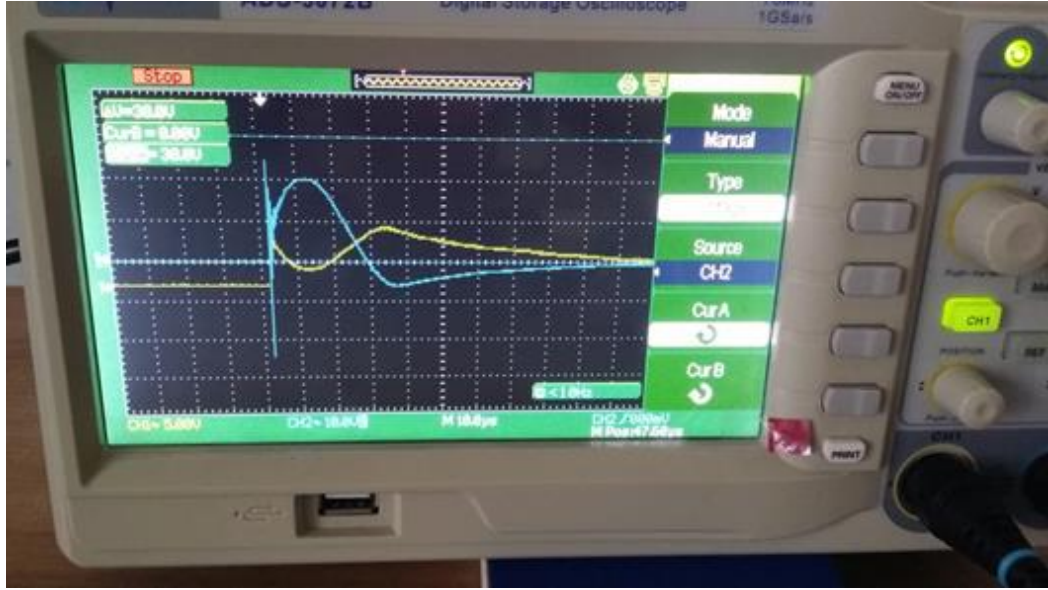
Şekil 6.2' de osiloskop görüntüsü verilen yıldırım darbe akımının tepe değeri denklem (6.2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$I_{tepe} = \frac{26V}{11.5m\Omega} = 2260 \text{ Amper} \quad (6.2)$$

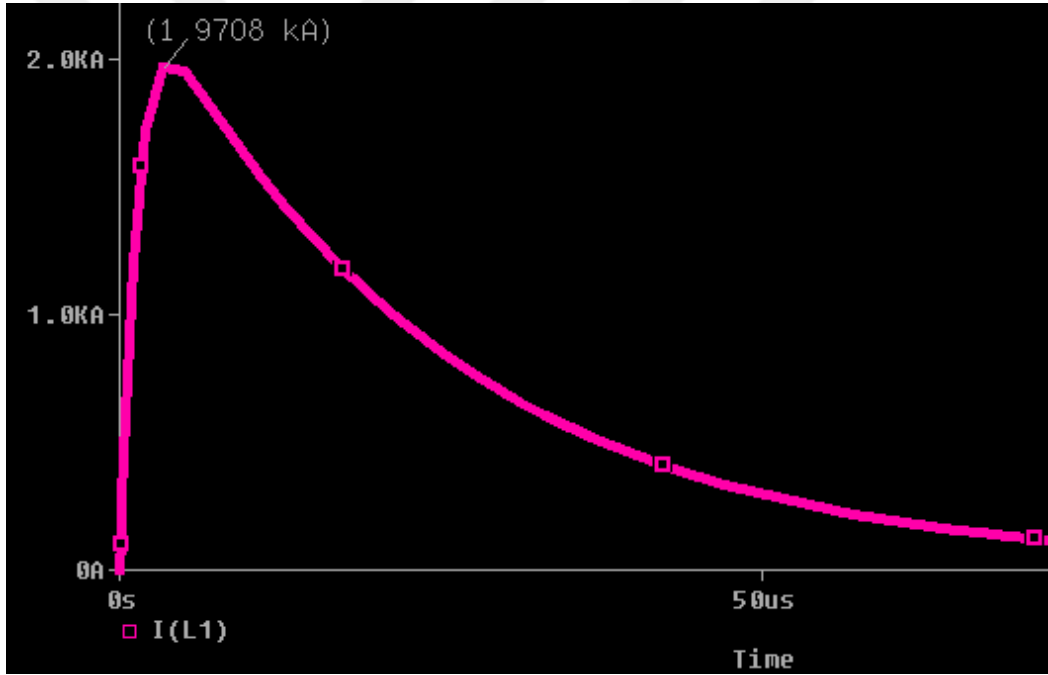
Şekil 6.2' de Pspice analiz programı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmasının sonucunda elde edilen grafik verilmiştir. Grafikteki yıldırım darbe akımının tepe değeri 2295 A'dır. Benzetim çalışmasında elde edilen bu değer, 6400 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu denklem (6.2) ile hesaplanan 2260 A değerine oldukça yakın bir değerdir.

5500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deneye ait osiloskop görüntüsü Şekil 6.3' te paylaşılmıştır.





a)



b)

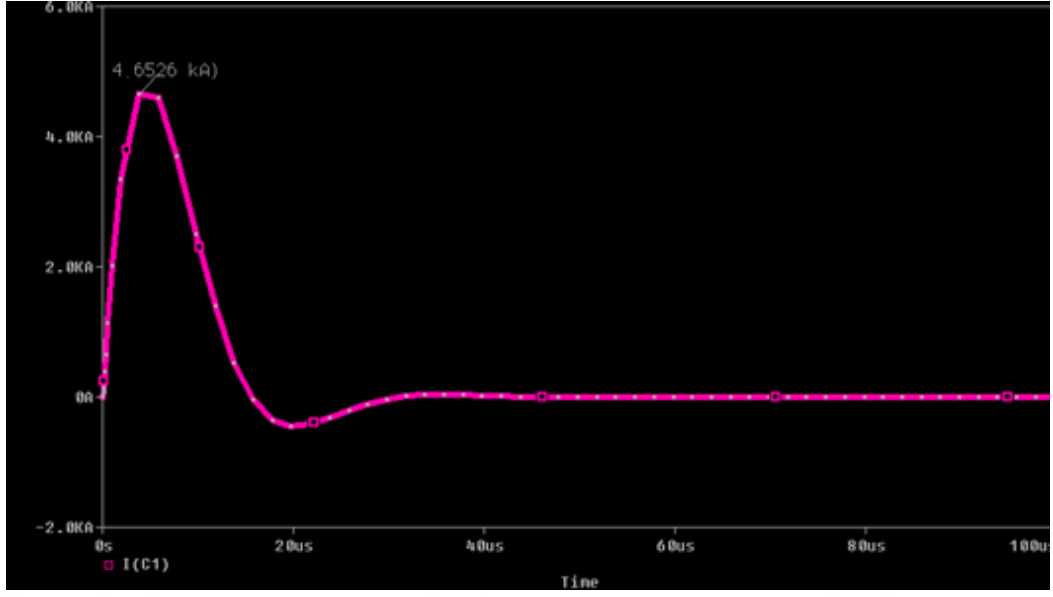
Şekil 6.3. a) 5500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu üretilen 8/20 μ s yıldırım darbe akımının osiloskop görüntüsü (CH1: Parafudr üzerine düşen gerilim, CH2: 8/20 μ s dalga formunda yıldırım darbe akımı), b) Pspice analiz programı yardımıyla 5500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen benzetim çalışması ile elde edilen yıldırım darbe akımı

Şekil 6.3' te osiloskop görüntüsü verilen yıldırım darbe akımının tepe değeri denklem (6.3) yardımıyla hesaplanmıştır.

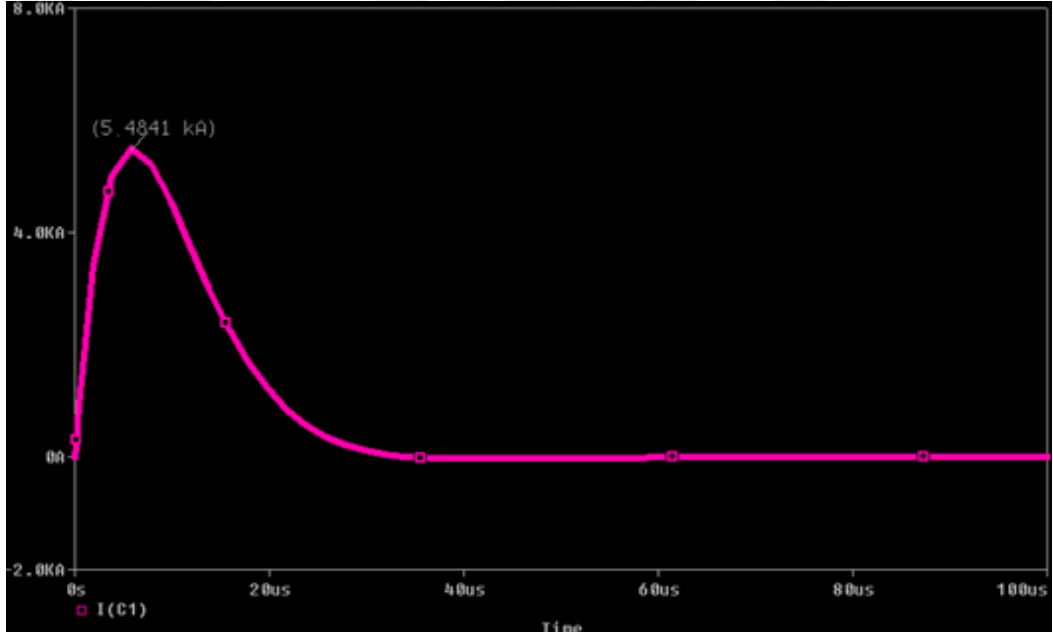
$$I_{tepe} = \frac{20V}{11.5m\Omega} = 1739 \text{ Amper} \quad (6.3)$$

Şekil 6.3' te Pspice analiz programı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmasının sonucunda elde edilen grafik verilmiştir. Paylaşılan grafikte yıldırım darbe akımının tepe değeri 1971 A'dir. 5500 V gerilim seviyesinde gerçekleştirilen deney sonucu denklem (6.3) ile tepe değeri hesaplanan yıldırım darbe akımının, benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu ifade edilebilir.

Pspice programı yardımıyla 7500 V gerilim seviyesinde, 5 µF ve 10 µF sığa değerine sahip darbe kondansantörleri ile üretilen yıldırım darbe akımlarının benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasına ait sonuçlar Şekil 6.4' te verilmiştir.



a)



b)

Şekil 6.4. a) 7500 V gerilim seviyesinde 5 μF sığa değerine sahip darbe kondansatörü ile üretilen yıldırım darbe akımı, b) 7500 V gerilim seviyesinde 10 μF sığa değerine sahip darbe kondansatörü ile üretilen yıldırım darbe akımı

Şekil 6.4' te paylaşılan a) resminde, 5 μF sığasına sahip kondansatör ile üretilen yıldırım darbe akımının sırt yarı değer süresinin Şekil 6.4' te paylaşılan b) resmindeki 10 μF sığasına sahip kondansatör ile üretilen yıldırım darbe akımının sırt yarı değer süresine göre daha küçük olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Parafudrlar, elektrik güç sistemlerinde yıldırım deşarjlarına karşı koruma amacıyla çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu tez çalışması ile yaygın olarak kullanılan parafudrların, laboratuvar ortamında test edilebilmesini sağlayan bir deney sistemi geliştirilmiştir. Bunun için ilk olarak 8/20 μ s dalga formunda standart yıldırım darbe akımı üretebilmek amacıyla yıldırım darbe akımı üretici devresi analiz edilmiştir ve gerekli olan devre parametreleri hesaplanarak R, L ve C değerleri belirlenmiştir.

Devre parametrelerinin doğruluğu Pspice programı ile analiz edildikten sonra deney sistemi için gerekli olan darbe kondansatörü, omik gerilim bölücü, kapasitif gerilim bölücü, doğrultma katı, küre küre elektrot anahtarlama sistemi, bobin ve direnç elemanları fiziksel olarak tasarlanıp üretilmiştir. Pspice programı ile benzetim çalışmaları gerçekleştirilirken, fiziksel olarak üretilen ve birbirleri ile bağlantıları sağlanan darbe kondansatörü, omik gerilim bölücü, kapasitif gerilim bölücü, doğrultma katı, bobin ve direnç elemanları arasındaki geçiş direnci dikkate alınarak simülasyonlar buna göre yapılmıştır.

Tamamen yerli imkanlarla geliştirilen deney sisteminin tüm elemanları tez çalışması kapsamında üretilmiştir. Tez çalışması kapsamında küre küre elektrot anahtarlama sisteminde ihtiyaç duyulan ve talaşlı imalat gerektiren mekanik parçalar ve diğer elektriksel elemanlar için gerekli olan sabitleyici ve destek parçalarının tasarımı katı model çizim programları yardımıyla sağlanarak üretimi 3 boyutlu yazıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde yüksek maliyetlerin önüne geçilmesi hedeflenerek daha uygun maliyette bir deney sistemi geliştirilmiştir.

Geliştirilen deney sistemine ait 8 kV ve 16 kV sığa değerine sahip iki darbe kondansatörü, alçak gerilim kondansatörlerinden oluşmaktadır ve tez çalışması bu yönüyle literatürdeki çalışmalardan farklılık göstermektedir. Geliştirilen deney sisteminin iki farklı darbe kondansatörüne sahip olması farklı güç ve gerilim seviyelerinde çalışmaya olanak sağlamaktadır. 8 kV ve 16 kV gerilim seviyelerinde çalışma imkanı sağlayan deney sisteminin gücü 320 Joule ve 640 Joule seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Geliştirilen iki darbe kondansatörü birbirleri ile aynı dış mahfazaya sahip olmasından dolayı birbirleri ile yekpare olarak bağlanabilmektedir. Bu şekilde bir bağlantı yapısı ile toplamda 24 kV gerilim

seviyesinde çalışma imkanı sağlamaktadır. Deney sisteminin bu özelliği daha yüksek ve farklı, gerilim ve güç seviyelerindenki çalışmalara olanak sağlamaktadır. Yine üretimi gerçekleştirilen deney sisteminde kullanılan bobin ve dirençlerin değerleri değiştirilerek farklı tepe değerine sahip yıldırım darbe akımları üretilebilmesi mümkündür. Deney sisteminin bu şekilde tasarlanması ile yıldırım darbe akımının cephe süresi, sırt yarı değer süresi ve cephe süresine etki eden parametreler incelenebilir.

Üretimi tamamlanan deney sistemi ile gerçekleştirilen deneylerde $8/20 \mu s$ dalga formunda standart yıldırım darbe akımı üretilebilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu üretilen yıldırım darbe akımının cephe süresinin $8 \mu s$ ve sırt yarı değer süresinin ise $20 \mu s$ olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca geliştirilen deney sistemi ile 2.7 kA seviyelerinde parafudr testleri gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 6' da, geliştirilen deney sistemi ile elde edilen yıldırım darbe akımına ait osiloskop görüntüleri ve bilgisayar ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonucu Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3' te verilmiştir. Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 incelendiğinde benzetim çalışmaları sonucu ile elde edilen deneysel sonuçların birbirleri ile tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca (6.1), (6.2) ve (6.3) eşitlikleri incelendiğinde, diğer parametrelerin sabit kalması koşulu ile uygulanan gerilim seviyesi azaldığında elde edilen yıldırım darbe akımına ait tepe değerin azaldığı çıkarımı yapılabilir.

Bölüm 6' da farklı sığa değerine sahip darbe kondansatörleri ile aynı gerilim seviyesinde gerçekleştirilen benzetim çalışması sonucu Şekil 6.4' te verilmiştir. Şekil 6.4 incelendiğinde darbe kondansatörünün sığa değişiminin sırt yarı değer süresini etkilediği görülmektedir. Yüksek sığa değerine sahip darbe kondansatörünün, aynı gerilim seviyesinde sırt yarı değer süresini büyüttüğü ifade edilebilir.

Aynı gerilim seviyesinde ve elektrot açıklığında gerçekleştirilen tüm deneylerde, elde edilen dalga şekillerinin birbiri ile aynı olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda geliştirilen deney sisteminin kararlı şekilde çalıştığı çıkarımına varılmıştır.

8. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

1. Özkaya M. Yüksek Gerilim Tekniği Cilt II. 3rd ed. İstanbul: Birsen Yayınevi; 2005.
2. Guo Z, Han M, Wang X. 100 kV, 10 pps repetitive impulse current generator. In: Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference. IEEE; 1999. p. 785–7.
3. Lorthongkam C, Thomrongsittapitak C. Design of Impulse High-Current Generator Using the IMC Simulation Program. In 2000.
4. Elektrikte Güvenli Çalışma [Internet]. Available from: https://www.emo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=136328&sube=13
5. Gonos IF, Leontides N, Topalis F v., Stathopoulos IA. Analysis and design of an impulse current generator. 2002; Available from: <https://www.researchgate.net/publication/236855552>
6. Machts R, Hunold A, Drebenstedt C, Rock M, Leu C, Haueisen J. Measurement and analysis of partial lightning currents in a head phantom. PLoS One. 2019 Sep 1;14(9).
7. Ioannou S. Comparative Study of Metal Oxide Varistors (MOVs) for Failure Mode Identification [Internet]. 2004. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/281202416>
8. Carobbi CFM, Bonci A. Elementary and Ideal Equivalent Circuit Model of the 1,250 – 8/20 μ s Combination Wave Generator. 2013;
9. Wang X, Dai M, Peng Q. Development of Impulse Heavy Current Grounding Test System. In 2015.
10. Kishore NK, Bhakta P, Sharan RK. On the development of an impulse current generator. In 1997.
11. Moreira de Assis W, Modesto Lisboa M, Rocha Ribeiro A, Vinicius Alves Nunes M, Melo Moraes A, Rodrigo Mnafano Manito A, et al. Experimental Validation of Electrical Model Residual Voltage Test Circuit in Surge Arresters. In: 2019 International Symposium on Lightning Protection (XV SIPDA). 2019.
12. Halim NH, Azmi A, Yahya Y, Abdullah F, Othman M, Laili MS. Development of A Small Scale Standard Lightning Impulse Current Generator. In 2011.
13. Haryono T, Sirait KT, Tumiran, Hamsah Berahim. The Design of A High Amplitude Impulse Current Generator. In IEEE; 2008.
14. Rousseau A, Zang X, Tao M. Multiple shots on SPDs - additional tests. In 2014.
15. Bing W, Zheng-cai F, Nan-nan Y. Design of Multi-Component Impulse Current Generator for Practical Lightning Current Simulation. In 2014.
16. Pouraimis PG, Platis AP, Koutsoubis JM, Manasis ChX. A Compact High-Voltage, Nanosecond Pulse Generator for Triggering Applications. In 2018.
17. Salman S, Xix A, Masood A, Iqbal S, Hanan M, Jan MU, et al. Design and Implementation of Surge Protective Device for Solar Panels. In IEEE; 2018.
18. Yılmaz B. Darbe Akım Üretici Tasarımı ve Üretimi. 2019.

19. Zirnheld JL, Foley VG, Dollinger RE, Sarjeant WJ. Development of enhanced fault-tolerance for a 600 kV impulse generator. In 1996.
20. Wang C, Zhang QH, Streaker C. A 12KV Solid State High Voltage Pulse Generator for a Bench Top PEF Machine. In 2000.
21. Baek JW, Yoo DW, Rim GH, Lai JSJ. Solid State Marx Generator Using Series-Connected IGBTs. IEEE Transactions on Plasma Science. 2005;33(4):1198–204.
22. Ratna Raju M, Rama Sarma V v., Satav SM, Rao KR, Surya Narayana K, Sholapurwala ZH. Fast Transient High Voltage Pulse Radiating System for Vulnerability studies of NEMP on Electronic Systems. In 2008.
23. Gómez S, Buitrago MP, Roldán FA. Portable High Voltage Impulse Generator. 2011;
24. Prabakaran T, Shyam A, Shukla R, Banerjee P, Sharma S, Deb P, et al. Development of 2.4 ns rise time, 300 KV, ~ 500 MW compact co-axial Marx generator. Article in Indian Journal of Pure and Applied Physics [Internet]. 2011;49:64–72. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/237100814>
25. Hlavacek J, Knenicky M. Very fast high voltage impulse generator. In: 2018 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2018 - Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018. p. 1–4.
26. Mehta S, Basak P, Anelis K, Paramane A. Simulation of single and multistage impulse voltage generator using matlab simulink. In Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2018.
27. Hinojosa M, Urciuoli D, Litz M, Schroen E, Tesny N, Tipton W. Development of a Compact, 240-kV, 10-J Impulse Generator for Mobile Platforms. In 2018.
28. Jayaram S, Xu X, Cross JD. High-Divider-Ratio Fast-Response Capacitive Dividers for High-Voltage Pulse Measurements. IEEE Trans Ind Appl. 2000;36(3):920–2.
29. Merev A. Yüksek Doğruluğa Sahip 100 kV Yüksek Doğru Gerilim Bölücüsü. 2005.
30. Merev A, Dedeoğlu S, Gülnihar K. 100 kV AC Yüksek Gerilim Bölücüsü Yapımı. 2008; Available from: <https://www.researchgate.net/publication/266032489>
31. Liu JL, Ye B, Zhan TW, Feng JH, Zhang J de, Wang XX. Coaxial Capacitive Dividers for High-Voltage Pulse Measurements in Intense Electron Beam Accelerator With Water Pulse-Forming Line. IEEE Trans Instrum Meas. 2009;58(1):161–6.
32. Hobejog T, Biela J. Coaxial capacitive voltage divider with high division ratio for high voltage pulses with very fast rise times. In: Digest of Technical Papers-IEEE International Pulsed Power Conference. 2011. p. 313–8.
33. Çoban M. Yüksek Gerilimlerin Oluşturduğu Elektrik Alanların Kemik Kanseri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. 2017.
34. Hrbac R, Kolar V, Bartłomiejczyk M, Mlcak T, Orsag P, Vanc J. A Development of a Capacitive Voltage Divider for High Voltage Measurement as Part of a Combined Current and Voltage Sensor. Elektronika ir Elektrotechnika. 2020 Aug 7;26(4):25–31.
35. Holtzhausen JP, Vosloo WL. High Voltage Engineering Practice and Theory. 2021.
36. Marshall JL. Lightning Protection. New York: Wiley - Interscience; 1973.
37. Abdel-Salam M, Anis H, El-Morshedy A, Radwan R. High - Voltage Engineering Practice and Theory. Second Edition. CRC Press; 2019.

38. Naidu MS, Kamaraju V. High Voltage Engineering Practice and Theory. Second Edition. McGraw-Hill; 1995.
39. Ragaller K. Surges in High-Voltage Networks. New York: Plenum Press; 1980.
40. Özcan AT. Dağıtım Şebekelerinde Yıldırım Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma. 2005.
41. Vişoreanu-Răchiţeanu A, Vişoreanu AM. Surge Arrester for Protection Against Overvoltage of High Voltage Networks. 2020;
42. Kuffel E, Zaengl WS, Kuffel J. High Voltage Engineering Fundamentals. Second. Newnes; 2000.
43. Elektrik Devrelerine Koruma Elemanları [Internet]. Available from: <http://hbogm.meb.gov.tr/MTAO/1EnerjiUretimilletimiVeDagitimi/unite8.pdf>
44. IEEE Power Engineering Society. Surge Protective Devices Committee., Institute of Electrical and Electronics Engineers., IEEE-SA Standards Board. C62.45-2002 - IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 V and less) AC Power Circuits [Internet]. Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2003. p. 85. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1196925/metrics#metrics>
45. Mergen AF, Zorlu S. Elektrik Makineleri I. İstanbul: Birsen Yayınevi; 2009.
46. Bölüm 3 : Diyotlar [Internet]. Available from: <http://eng.harran.edu.tr/~nbesli/SEG/03.%20Diyotlar.pdf>
47. Fidan M. Harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının elektriksel kısmi boşalmalar üzerindeki etkilerinin incelenmesi. 2011.
48. Table of Electrical Resistivity and Conductivity [Internet]. Available from: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>