

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DARBE AKIM ÜRETECİ TASARIMI VE ÜRETİMİ

BURAK YILMAZ

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DARBE AKIM ÜRETECİ TASARIMI VE ÜRETİMİ

BURAK YILMAZ

Dr. Öğr. Üyesi Hasbi İSMAİLOĞLU
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Nuran YÖRÜKEREN
Kocaeli Üniversitesi

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali YALÇIN
Sakarya Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 30.01.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Aşırı gerilimlerden koruma aygıtları olan parafudrların, ilgili standarda uygunluğunun belirlenmesi için farklı karakteristiklerdeki darbe akımları ile sınanmaları gerekmektedir. Bu tezde darbe akımlarının üretilmesi için gerekli olan darbe akım üreteçleri ve üretilen akımların ölçülmesi için Rogowski akım sensörü tasarımı ve üretimine yönelik olarak yapılan çalışmalar sunulmuştur. Darbe akım üreteci seti tasarımı ve üretimi “7180089” numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Tez konusu darbe akımı üreteçlerinin (4/10 μ s, 8/20 μ s, 30/80 μ s) ve ölçme sistemi (Rogowski akım sensörleri) tasarım, üretim çalışmaları, ülke genelinde yapılan ilk çalışmalar arasında yer almaktadır.

Tez çalışmasına konu olan TÜBİTAK projesine fikir öncülüğü yapan, laboratuvar çalışmalarında tüm tasarım aşamalarını planlayan, tasarım çalışmalarını yürüten, değerli bilgilerini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam; Dr. Öğr. Üyesi Hasbi İSMAİLOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Proje boyunca emeği geçen tüm proje ekibine ve çalışma arkadaşlarıma, proje için gerekli ortamı ve desteği sağlayan ELOPAR A.Ş. Yüksek Gerilim Laboratuvarı yönetimine teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan, motive eden, hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, sevgili dedem Ahmet Yılmaz, babam Namık Kemal Yılmaz, annem Gül Yılmaz başta olmak üzere tüm aileme minnet duygularımı sunarım.

Aralık – 2019

Burak YILMAZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. AŞIRI GERİLİMLER VE AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA.....	4
1.1. Aşırı Gerilimler	4
1.2. Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma Aygıtları	8
1.3. Koruma Aygıtları Üzerinde Yapılan Deneyler	10
2. DARBE AKIMLARI	11
2.1. Darbe Akımları	13
2.2. Dikdörtgen Darbe Akımlar	16
2.3. Kısa Süreli Alternatif Darbe Akımları	18
3. DARBE AKIMLARININ ÜRETİLMESİ	20
3.1. Darbe Akımlarının Üretilmesi	20
3.2. Dikdörtgen Darbe Akımlarının Üretilmesi	27
3.3. Kısa Süreli Alternatif Darbe Akımlarının Üretilmesi	29
4. DARBE AKIMLARININ ÖLÇÜLMESİ	31
4.1. Şönt Direnç	32
4.2. Bobinli Akım Ölçüm Sistemleri	37
4.2.1. Manyetik nüveli akım transformatörleri.....	41
4.2.2. Rogowski akım sensörü.....	43
5. DARBE AKIM ÜRETECİ SETİ TASARIMI VE ÜRETİMİ.....	49
5.1. Devre Simülasyonları ve Tasarım Çalışmaları	54
5.1.1. 4/10 µs Darbe akımı için bobin tasarımı.....	55
5.1.2. 8/20 µs Darbe akımı için bobin tasarımı.....	60
5.1.3. 30/80 µs Darbe akımı için bobin tasarımı.....	63
5.2. Setlerin Laboratuvar Ortamında Üretilmesi.....	66
5.3. Darbe Akımı Ölçümleri İçin Rogowski Bobini Tasarımı	70
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	74
6.1. 30/80 µs Darbe Akımı Deneysel Çıktıları.....	74
6.2. 8/20 µs Darbe Akımı Deneysel Çıktıları.....	77
6.3. 4/10 µs Darbe Akımı Deneysel Çıktıları.....	78
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	82
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	84
ÖZGEÇMİŞ	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Şematik olarak işletme gerilimi ve gerilim yükselmesinin zamana bağlı değişiminin gösterimi.....	5
Şekil 1.2.	Şematik olarak işletme gerilimi ve iç aşırı gerilimin zamana bağlı değişiminin gösterimi.....	5
Şekil 1.3.	Yıldırım darbe akımının temsili gösterimi.....	6
Şekil 1.4.	Yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri.....	7
Şekil 1.5.	36 kV'luk transformatör tipi geçit izolatörü ve koruma elektrodu.....	8
Şekil 1.6.	Polimer gövdeli atlama aralıksız metal oksit parafudr ($U_r = 36$ kV, $U_c = 29$ kV, $I_n = 10$ kA, $I_s = 20$ kA, ELOPAR)	9
Şekil 2.1.	Darbe akımı dalga şekli ve parametreleri.....	14
Şekil 2.2.	Dikdörtgen darbe akımı dalga şekli ve parametreleri	17
Şekil 2.3.	Dikdörtgen darbe akımı salınımlı durum	18
Şekil 2.4.	Kısa süreli alternatif akım örnekleri. a) geçici DC bileşen 2 ve simetrik kısa süreli alternatif akım 1, b) simetrik kısa süreli alternatif akım	19
Şekil 3.1.	Darbe akım üretici eşdeğer devresi	21
Şekil 3.2.	Dairesel düzen ile oluşturulmuş darbe akım üretici örneği (100 kV 150 kA 150 kJ HAEFELY).....	22
Şekil 3.3.	Tasarımı gerçekleştiren darbe akım üretici ve ölçüm seti.....	22
Şekil 3.4.	Deney numunesi direnç değeri ile T_1 , T_2 karşılaştırma eğrileri	23
Şekil 3.5.	Kesme aralığı içeren üretici tipi eşdeğer devresi.....	24
Şekil 3.6.	Darbe akım üretici ile üretilen darbe akım şekli (1), Kesme aralığı tekniğiyle elde edilen darbe akım şekli (2).....	24
Şekil 3.7.	Darbe akımı analizi yapılacak olan RLC devresi.....	25
Şekil 3.8.	Denklem (3.5) ve (3.6) ya göre hesaplanmış zayıf sönümlü darbe (1), $8/20$ μ s Darbe (2) ve Aşırı sönümlü darbe (3).....	27
Şekil 3.9.	Dikdörtgen darbe akım üretici yapısı	28
Şekil 3.10.	Kısa Süreli alternatif darbe akım üretici.....	29
Şekil 4.1.	Düşük değerli (R_m) direnç ile darbe akım ölçüm devresi	32
Şekil 4.2.	Yüksek akım ölçümleri için farklı ölçüm direnç örnekleri, AC akım ölçümü şöntü (solda), darbe akım şöntleri (sağda 3 örnek) (HILO TEST WSM ve ISM model şönt dirençleri)	33
Şekil 4.3.	Düşük değerli direnç üzerinden darbe akım ölçüm sisteminde elektromanyetik girişim örneği	34
Şekil 4.4.	Bir koaksiyel kablunun empedansı $Z_K = U_{St}/I_{St}$. I_{St} : Girişim akımı, U_{St} : Üretilen girişim gerilimi	35
Şekil 4.5.	Ölçüm üzerindeki girişim etkisini önlemek için koaksiyel kablunun ve ölçüm cihazının çift ekranla korunması.	35
Şekil 4.6.	Darbe akımı ölçümleri için geniş bantlı bir koaksiyel şöntün temel yapısı. 1; Akım giriş ucu, 2; yalıtım halkası, 3; direnç, 4; akım dönüş iletkeni, 5; çıkış terminaline giden ölçüm bağlantısı, 6; koaksiyel çıkış terminali.....	36

Şekil 4.7.	Amper yasasını ve Faraday yasasını açıklayan şematik diyagram. 1; Akım taşıyan iletken, 2; ölçüm sargısı, $H(t)$; $i(t)$ tarafından üretilen manyetik alan, $U_i(t)$; ölçüm sargısı uçlarında endüklenen gerilim.....	38
Şekil 4.8.	İletken içinden $i(t)$ akımı tarafından üretilen manyetik alan $H(t)$ nedeniyle toroidal bir bobinin çıkışında indüklenen gerilim $U_i(t)$	39
Şekil 4.9.	Bobinli ölçüm sistemlerinin iletken etrafına konumlandırılması.....	40
Şekil 4.10	Pasif entegrasyon devresi ile ölçüm bobininin eşdeğer devrenin şematik gösterimi a) öz endüktans ve R direnci ile entegrasyon, b) harici kapasitans (C) ve direnç (R) ile entegrasyon.	41
Şekil 4.11.	Manyetik çekirdek ve dahili integral alma devresine sahip kelepçe tipli akım ölçüm bobini (PEARSON ELEKTRONİK INC.).....	42
Şekil 4.12.	Ticari olarak kullanılan Rogowski akım sensörü örnek tipleri a) İki parçalı Rogowski bobini (Fotoğraf: PTB), b) Esnek Rogowski akım sensörü ve entegratörü (PEM)	44
Şekil 4.13.	Bir Rogowski bobini ile ölçümde iletkenin konumunun etkisi. a) Ölçüm yapılacak olan iletkenin konum bilgisi veren görsel b) Dönüş açısının bir sonucu olarak endüklenen çıkış gerilimi merkez konuma göre sapması	45
Şekil 4.14.	8/20 μ s darbe akımı için sayısal entegrasyon uygulama örneği. U_i : Rogowski bobininin endüklenmiş çıkış gerilimi, i : U_i 'nin sayısal entegrasyonu ile elde edilen darbe akımı	46
Şekil 4.15.	Adım yanıtı için sayısal entegrasyon temsili uygulama örneği. U_i : Rogowski bobini uçlarında indüklenmiş çıkış gerilimi, g : U_i 'nin sayısal entegrasyonu ile elde edilen adım yanıtı.....	47
Şekil 5.1.	Yıldırım darbe akımı artık gerilim ölçüm seti (8/20 μ s). 1: Yüksek gerilim besleme trafosu, 2: Doğrultma katı, 3: Kondansatör grubu, 4: Gerilim bölücü, 5: Ara bağlantı, 6: Topraklama şeridi.....	50
Şekil 5.2.	Deneylerin kumanda edildiği kontrol odası	51
Şekil 5.3.	Deney numunesi (Parafudr) ve kalibrasyonlu akım ölçüm şöntü (ELOPAR 36/10 kV/kA, HILOTEST $I_{pmax}=20$ kA)	52
Şekil 5.5.	Ölçümlerin yapıldığı osiloskoplar (Sol: Atten marka 2 kanallı 200 MHz kalibrasyonlu osiloskop, Sağ: Siglent marka 4 kanallı 300 MHz osiloskop)	53
Şekil 5.6.	TÜBİTAK projesi ile hedeflenen çalışmalar (Görsel 7180089 numaralı TÜBİTAK Projesinden alınmıştır).....	54
Şekil 5.7.	Darbe akım üretici (4/10 μ s) simülasyon devresi ($L=2,53$ μ H)	56
Şekil 5.8.	$U_c=100$ kV, $C=4$ μ F, $L=2,53$ μ H için simülasyon sonucu ($I_p=40$ kA, $T_1/T_2=2,5/9$ μ s)	56
Şekil 5.9.	Darbe akım üretici (4/10 μ s) simülasyon devresi ($L=4$ μ H)	57
Şekil 5.10.	$U_c=100$ kV, $C=4$ μ F, $L=4$ μ H için simülasyon sonucu ($I_p=37$ kA $T_1/T_2=3.2/10.5$ μ s)	57
Şekil 5.11.	$L=12$ μ H bobin tasarımı için kullanılan program çıktısı.....	58

Şekil 5.12. 4/10 µs'lik darbe akımı için üretilen bobinler (her biri ~12 µH).	59
Şekil 5.13. Darbe akım üretici (8/20 µs) simülasyon devresi (L=20 µH)	61
Şekil 5.14. Uc=100 kV, C=2 µF, L=20 µH, için simülasyon sonucu (Ip= 10 kA, T1/T2=7,2/19 µs)	61
Şekil 5.15. L= 60 µH bobin tasarımı için kullanılan program çıktısı	62
Şekil 5.16. 8/20 µs'lik darbe akımı için üretilen bobinler (her biri ~60 µH)	63
Şekil 5.17. 30/80 µs darbe şeklini elde etmek için kurulan simülasyon devresi	65
Şekil 5.18. Uc=10 kV, C=2,5µF, L1=50µH, L2=400µH, için simülasyon sonucu (Ip= 640 A T1/T2=45/105 µs)	65
Şekil 5.19. 30/80 µs darbe akımı için üretilen bobinler (Sol: L1=50 µH Sağ: L1=400µH)	66
Şekil 5.20. Üretilen kondansatör seti önden ve yandan görünümü	67
Şekil 5.21. Ölçme, ayar sistemi ve kaidesi	68
Şekil 5.22. 4/10 µs ve 8/20 µs darbe akımı seti olarak kullanılabilir üreteç seti	68
Şekil 5.23. 30/80 µs akım darbesi için oluşturulan set	69
Şekil 5.24. Rogowski akım sensörünün akım taşıyan bara etrafına konumlandırılması	70
Şekil 5.25. Rogowski bobini ölçüm sistemi	71
Şekil 5.26. Tasarımı tamamlanan R.B.8	72
Şekil 5.27 Sarı prob şönt direnç, pembe prob R.B.8	73
Şekil 6.1. 30/80 µs darbe akım osiloskop görüntüsü	75
Şekil 6.2. Akım sensörü ile ölçülen 536 A'lik uzun dalga darbe akımı (URB x F = 0,1 (V) x 5,359 (kA/V) ≈ 536 A).	76
Şekil 6.3. 30/80 µs Deney seti	76
Şekil 6.4. 8/20 µs Yıldırım akım darbesi artık gerilim ölçümü deney devresi	77
Şekil 6.5. 8/20 µs yıldırım akım darbesi osiloskop görüntüsü (Sarı prob: Şönt direnç ölçümü, pembe prob: Rogowski akım sensörü ölçümü)	78
Şekil 6.6. 4/10 µs yüksek akım darbesi osiloskop görüntüsü (URB x F = 122 (V) x 0,922 (kA/V) = 112,5 kA, 4/10 µs'lik darbe akımı)	79

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Darbe akımı karakteristikleri (T_1/T_2) ve ilgili standartlar	12
Tablo 2.2. Darbe akımlarının uygulandığı aygıtlar örnekleri ve toleransları [4]	15
Tablo 2.3. Standartta belirtilen kısa süreli AC akım için tolerans değerleri.....	19
Tablo 5.1. 4/10 μ s Darbe şekli için endüktans tasarım parametreleri	59
Tablo 5.3. Yaklaşık olarak 30/80 μ s darbe şeklini elde etmek için yapılan simülasyon çalışmaları	64
Tablo 5.4. 30/80 μ s Darbe şekli için endüktans tasarım parametreleri	65
Tablo 5.5. Tasarımlanan Bobinlerin sarım parametreleri.....	71
Tablo 5.6. R.B. 8 Dönüştürme oranı hesaplama çalışması.....	72
Tablo 6.1. 30/80 darbe akım deneysel sonuçları	74
Tablo 6.2. Rogowski akım sensörü çevirme oranı belirleme	75

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

I_0	: Başlangıç boşalma akımı
U_0	: Kondansatör seti şarj gerilimi
I_m	: Maksimum yıldırım akımı
U_m	: Ölçüm direnci üzerindeki gerilim
I_{st}	: Elektromanyetik Girişim sonucu akan akım
U_{st}	: Elektromanyetik sonucu endüklenen gerilim
R_m	: Ölçüm direnci (Şönt direnç)
Z_k	: Kuplaj empedansı
T_1	: Cephe süresi
μs	: Mikrosaniye
$m\Omega$: Miliohm
T_2	: Sırt yarı değer süresi
T_d	: Tepe süresi
$i(t)$: Deney numunesi içinden akan akım
α ve β	: Yıldırım dalgasının karakteristik değerleri
ϕ	: Çalıştırma açısı
ψ	: Faz açısı
Φ	: Uzaydaki manyetik akı
μr	: Bağlı manyetik geçirgenlik
I	: Akım
R	: Direnç
L	: Endüktans
C	: Kapasitans
Z	: Karakteristik empedans
H	: Manyetik alan şiddeti
M	: Karşılıklı endüktans
Q	: Yük
W	: Enerji
P	: Deney cismi
G	: Yarım dalga doğrultma diyotu
S	: Atlama küresi

Kısaltmalar

ZnO	: Çinko Oksit
r.m.s	: Root Mean Square (Karesel Ortalama Değer)
AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TS	: Türk Standardı
TÜRKAK	: Türk Akreditasyon Kurumu
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

DARBE AKIM ÜRETECİ TASARIMI VE ÜRETİMİ

ÖZET

Darbe akımları sıfırdan tepe değerine kadar hızlı yükselen, tepe değerinden sıfır değerine ise daha yavaş düşen akım tipi olarak tanımlanmaktadır. Güç sistemlerinde yer alan aygıtların, yıldırım, kısa devrelerden kaynaklı şebekedeki zorlanmalarının sonuçlarını görmek amacıyla yüksek genlikli değerlere sahip darbe akımı deneyleri yapılmaktadır. Darbe akımlarının dalga şekli, yapılacak olan deneyin amacına bağlı olarak farklı karakteristiklerde olabilmektedir. Temel olarak darbe akımları, eksponansiyel ve dikdörtgen biçimindeyken kısa süreli alternatif akım dalgası da bazı kaynaklarda darbe akımları başlığı altında incelenebilmektedir.

Bu çalışmada darbe akımlarının türlerine göre genel tarif yapılmıştır. Tanıtılan darbe akımlarını üretmek için gerekli olan üreteç yapılarına ve hesaplarına yer verilmiştir. Yüksek gerilim laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılan darbe akım üreteci, temelde seri olarak bağlanmış bir RLC (direnc, bobin ve kondansatör) devresinden oluşmaktadır. Simülasyon programında RLC devre yapıları kullanılarak devre modellenmiştir. Hesaplanan tasarım değerleri programa girilerek istenen dalga şeklinin elde edilip edilmediği kontrol edilmiştir. Simülasyon sonrası uygun değerli devre elemanları için üretim aşamasına geçilmiştir. Farklı dalga şekilleri için tasarım yapılan değerlerde devre elemanları bir araya getirilerek deney seti oluşturulmuştur. Üretilen deney setlerinden ölçüm sistemi ile akım ve karakteristik değerleri ölçülerek, standartta belirtilen tolerans aralığında olup olmadığı sınanmıştır.

Tepe değeri 100 kA seviyesinde akım değerlerinde olan darbelerin ölçümleri yaygın olarak düşük değerli ohmik dirençlerle, manyetik veya hava nüveli bobinler ile gerçekleştirilmektedir. Yüksek darbe akımlarının ölçülmesinde, manyetik nüve içermeyen, doğrusal akım-gerilim karakteristiğine sahip, montajı kolay, tasarım maliyeti düşük rogowski bobini biçimindeki akım sensörleri kullanılabilir. Bu çalışmada da bu özelliklere sahip, rogowski bobini tasarımı ve üretimi yapılmış, şönt direnc ile karşılaştırma deneyleri yapılarak, elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Darbe Akımı, Metal Oksit Parafudr, Rogowski Akım Sensörü, Yıldırım Akım Darbesi.

IMPULSE CURRENT GENERATOR DESIGN AND PRODUCTION

ABSTRACT

Impulse currents are defined as the type of current rising rapidly from zero to peak value and slower from peak value to zero value. High amplitude impulse current tests are carried out in order to see the results of the devices in the power systems due to lightning and short circuits. The waveform of the impulse currents may have different characteristics depending on the purpose of the test to be performed. Basically, the impulse currents are exponential and rectangular, while the short-term alternating current wave can be examined under the heading of impulse currents.

In this study, general definition of impulse currents were made according to impulse types. In order to generate impulse currents which is described, generator characteristics and features were included. The impulse current generator, commonly used in high voltage laboratories, consists essentially of a series connected RLC (resistor, inductor and capacitor) circuits. The circuit was modeled in the simulation program. The desired waveform was controlled by the system established using the calculated values. After the simulation, the production stage was started using the appropriate valued circuit elements. Impulse current sets were formed by bringing the circuit elements together in the values made for different waveforms. The test values were measured by measuring device and the results were found to be within the tolerance range specified in the standard.

The impulse currents with a peak value of 100 kA are generally measured with low-value resistors, magnetic or air core coils. In the measurement of high impulse currents, rogowski coil can be used which is air-cored, linear current-voltage characteristic, easy to install and low production cost. In this study, rogowski coil design and production were made. The results were compared with shunt resistance measurements.

Keywords: Impulse Current Generator, Metal Oxide Surge Arrester, Rogowski Current Sensor, Lightning Impulse Current.

GİRİŞ

Günümüzde, vazgeçilmez mahiyette olan elektrik enerjisinin kesintiye uğraması, ekonomik ve sosyal yaşamı aksatması gibi birçok probleme yol açabilecek niteliktedir. Bu yönü ile elektrik enerjisinin kaliteli ve sürekli olması büyük önem taşımaktadır. Yalıttımdan kaynaklanan arızalar ise enerji sürekliliğini bozan etkenlerin başında gelmektedir. Aygıtların yalıtım arızalarının büyük çoğunluğunun aşırı gerilimlerden kaynaklandığı görülmektedir. Aşırı gerilimler, anahtarlama olaylarından kaynaklanan iç aşırı gerilimler ve atmosferik etkilerden kaynaklanan dış aşırı gerilimler başlıkları altında incelenmektedir. Aşırı gerilimleri sınırlamak amacıyla günümüzde, metal-oksit parafudrlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yıldırım, bulutta biriken yükün komşu buluta ya da toprağa düşmesi sırasında oluşan darbe akımı biçimindeki boşalmadır. Yıldırım; insanlar, binalar ve diğer yapılar için tehlikeli olan aşırı gerilim ve aşırı akım oluşturmaktadır. Bir yapıya düşen yıldırım, binaya ve binada bulunanlara zarar verebilir. Özellikle elektrik ve elektronik sistemlerde aygıt arızalarına neden olabilir. Yıldırımdan korunma aygıtları, yıldırımın bu etkilerini sınırlamak için geliştirilmiştir. Bu aygıtlar, herhangi bir yapıya ya da sisteme yıldırım düşmesi sonucu oluşacak arızaya karşı koruma sağlamaktadır. Koruma aygıtlarının doğru şekilde çalıştığını doğrulamak için standartta belirtilen koşullara göre sınanması gerekmektedir. Koruma aygıtları, sistemlerde maruz kalabileceği zorlanmaları temsil eden deneylerle henüz sistem yerleştirilmeden, üretim aşamasında sınanmaktadır. Söz konusu deneyler, büyük çoğunluğu yüksek genlikli gerilim ve akım değerlerine sahip deney setlerinin kullanılmasını gerektirirler. Koruma aygıtı için bu deneylerin en önemlilerinden biri de yüksek akım darbesi deneyidir. Çalışma kapsamında, yüksek darbe akım üretici tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Darbe akımları genel olarak sıfırdan tepe değerine kadar hızla yükselen ve nispeten daha yavaş sıfır değerine düşen bir dalga şekli ile karakterize edilebilirler. Bu dalga şeklini oluşturabilmek için belirli bir ezonans frekansına ayarlanan R, L, C devre

yapısı kullanılmaktadır. Tepe değerine kadar hızlı bir şekilde yükselen ve ardından daha yavaş sifıra düşen karakteristiğinden dolayı darbe akımlarını özel yöntemler ile ölçmek gerekmektedir.

İzleyen bölümlerde; darbe akımlarının genel olarak incelenmesi, üretimi ve ölçüm yöntemleri konuları detaylı olarak verilmiştir. İkinci bölümde darbe akımı dalga şekillerinin standartta belirtilen tolerans değerleri tablolar halinde gösterilmiştir. Bunun yanında dalga şekli parametreleri için gereken ölçüm belirsizliği sınır değerleri verilmiştir. Üçüncü ve dördüncü bölümde darbe akımlarının üretilmesi için oluşturulması gereken devre yapıları ve hesaplarına yer verilerek simülasyon aşamasında buradaki devre yapıları kullanılmış, dalga şekilleri elde edilmiştir. Beşinci bölümde darbe akım üreteçlerinin eleman değerlerinin hesaplanması ve simülasyon çalışması ile doğrulamasına yer verilmiştir. Pspice simülasyon programı öğrenci versiyonu ile simülasyon çalışması yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre üreteçlerin üretim işlemine başlanılmıştır. Altıncı bölümde hesaplama ve simülasyon sonucunda belirlenen endüktans değerlerine göre bobin tasarımları gerçekleştirilmiştir. Deney setlerinin kaide üretimleri firma atölyesinde yapılarak montajları tamamlanmıştır. Bu çalışmaların detayları, izleyen bölümlerde ayrı ayrı verilmiştir.

Darbe akımlarının ölçülmesinde şönt direnç, Özel akım transformatörü ve Rogowski bobini ölçüm aygıtları kullanılmaktadır. Darbe akımlarının ölçülmesi başlığı altında ölçüm aygıtları ve yapıları detaylı olarak incelenmiştir. Darbe akım şöntü, akım ölçüm değeri 20 kA (8/20 μ s için) ile sınırlı olması nedeniyle daha yüksek genlikte üretilecek olan 4/10 μ s darbe akımı ölçümü için kullanılamamaktadır. Akım ölçüm transformatörleri ise yapısında manyetik nüve bulundurması kaynaklı doyuma girmesi nedeniyle doğru ve güvenilir ölçüm yapamamaktadır. Bu nedenle manyetik nüve içermeyen, doğrusal akım-gerilim karakteristiğine sahip, montajı kolay, tasarım maliyeti düşük Rogowski akım sensörleri tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan setler ile darbe akımları parafudra uygulanmış ve şönt direnç üzerinden ölçülen değerler, parametreleri ile birlikte kaydedilmiştir. Bunun yanında üretilen 100 kA seviyesindeki akımları ölçmek için üretilen Rogowski akım sensörünün ölçüm sonuçları şönt direnç ile karşılaştırılarak çevirme oranı belirlenmiştir. Üretilen

yüksek akım darbesi (100 kA-4/10 μ s) çevirme oranı kullanılarak Rogowski akım sensörü üzerinden ölçülmüştür. Uygulanan darbe akımlarının ölçme sonuçları son bölümde verilmiş, dalga şekli parametrelerinin standartta verilen toleranslara göre uygunluğu yorumlanmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen dalga şekilleri ile deneysel olarak elde edilen dalga şekilleri karşılaştırılmıştır.



1. AŞIRI GERİLİMLER VE AŞIRI GERİLİMLERE KARŞI KORUMA

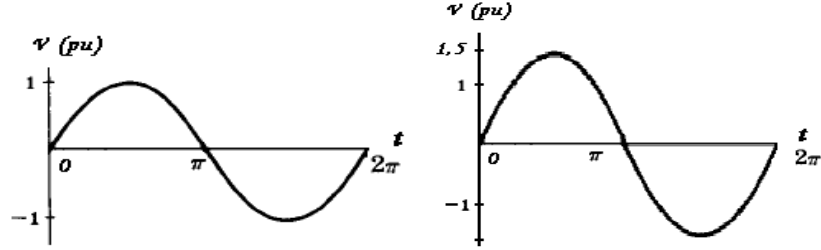
Yüksek ve orta gerilim güç sistemlerinde kullanılan aygıtların yalıtımları; gerilim yükselmeleri, devre açma kapama, toprak ve faz kısa devreleri, rezonans olayları gibi etkenlerle oluşan iç aşırı ve atmosferik etkilerden oluşan dış aşırı gerilimlerle zorlanır. Bu aşırı gerilimler, enerji düzeyleri yüksek değerlere ulaşmamasına rağmen güç sistemlerinde kullanılan aygıtların yalıtımlarını bozarak kısa devre arızalarına dolayısıyla enerji kesintilerine sebebiyet verebilmektedir. Günümüzde, vazgeçilmez olan elektrik enerjisinin kesintiye uğraması, ekonomik ve sosyal yaşamı aksatması gibi birçok problemlere yol açabilmektedir [12]. Aşırı gerilimlerin genlikleri, şebekenin yapısına ve ortaya çıkmalarına yol açan olaylara bağlı olarak, normal işletme geriliminin birkaç katına kadar çıkabilmektedirler. Aşırı gerilimlerin ortak özellikleri, yalnızca ortaya çıktıkları bölümlerde değil; tüm sistem üzerinde yürüyen dalgalar biçiminde, ışık hızı düzeyindeki hızlarla yayılarak, sistemde yer alan tüm aygıtların yalıtımlarının zorlanmasına yol açabilmeleridir [2].

1.1. Aşırı Gerilimler

Yüksek gerilim sistemlerinde yer alan aygıtların boyut ve tasarımları, genel olarak gerilim yükselmelerine dayanacak biçimde yapılmaktadır. İç aşırı gerilimler, daha çok yüksek gerilim sistemlerinde sorun yaratabilmekte; dış aşırı gerilimler ise tüm gerilim düzeylerindeki sistemler üzerinde etkili olmaktadır. Bu bakımdan, iç aşırı gerilimlere karşı, yüksek gerilim sistemlerinin; dış aşırı gerilimlere karşı ise tüm enerji sistemlerinin korunması gerekmektedir [2]. Güç sistemlerinde ortaya çıkan aşırı gerilimler; gerilim yükselmeleri, iç aşırı gerilimler ve dış aşırı gerilimler biçiminde sınıflandırılabilirler.

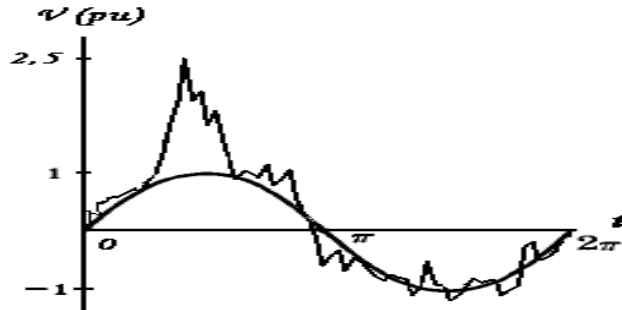
İşletme esnasında meydana gelen generatörün yükünün kalkması, generatörün kapasitif yüklenmesi, hava hattının yükünün kalkması, toprak kısa devresi frekansta önemli ölçüde değişikliğe sebep olmadan gerilimin yükselmesine neden olabilirler (Şekil 1.1.). Bu gerilim yükselmeleri birkaç saniye sürebileceği gibi birkaç saate kadar da sürebilir. Normal olarak şebekenin yalıtımı, bu gibi gerilim

yükselmelerine dayanacak şekilde boyutlandırılır. Aslında işletme frekanslı gerilim yükselmeleri, tesisin kendisinden kaynaklandığı için iç aşırı gerilim olarak tanımlanabilir. Ancak bunlar süre, frekans, yükseklik ve etki bakımından iç aşırı gerilimlerden biraz farklıdır [1].



Şekil 1.1. Şematik olarak işletme gerilimi ve gerilim yükselmesinin zamana bağlı değişiminin gösterimi.

İç aşırı gerilimler, genel olarak devre açma-kapama (anahtarlama) olayları sonucunda oluşan aşırı gerilimlerdir (Şekil 1.2.). İç aşırı gerilimlerin genlikleri, işletme geriliminin düzeyine, iletim hattının uzunluğuna ve empedansına, kompanzasyon derecesi ve düzeyine, kesici karakteristiklerine, besleme kaynağı düzenine, yeniden kapama öncesinde iletim hattı üzerinde artık yüklerin olmasına önemli ölçüde bağlıdır. Genlikleri işletme geriliminin 2-3 katı, yüksek gerilim şebekesinin özelliğine göre orta ya da yüksek frekanslı gerilimlerdir (Şekil 1.2.) [2]. Az veya çok sönümlü ve nisbeten kısa süreli (ms'ler düzeyinde) gerilimler olup, işletme frekansının yarı dalgası içinde sönerler. Özellikle çok yüksek gerilim sistemlerinde yalıtımı zorlayan ve yalıtımın boyutlandırılmasında, öncelikle dikkate alınması gereken gerilimlerdir [1].

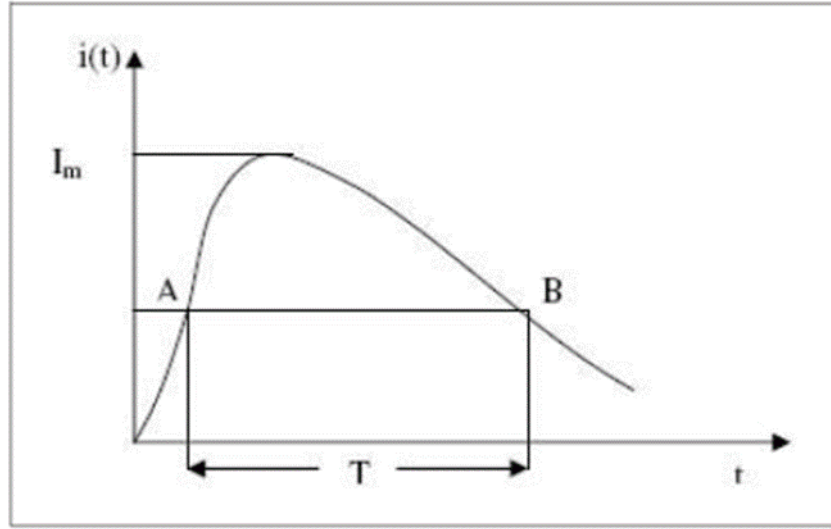


Şekil 1.2. Şematik olarak işletme gerilimi ve iç aşırı gerilimin zamana bağlı değişiminin gösterimi

Yüksek gerilim hatlarında dış aşırı gerilimler, ya doğrudan doğruya yıldırım düşmesiyle veya tesirle elektriklenme suretiyle meydana gelirler. Yıldırımın faz hattına, direğe veya toprak hattına düşmesi halinde meydana gelen aşırı gerilimlere “doğrudan yıldırım düşmesiyle meydana gelen aşırı gerilimler” denir. Yıldırım bulutundaki elektrik yükü ile hatta tesirle elektriklenme suretiyle bir yük dalgası meydana geldikten sonra, yıldırımın yüksek gerilim hattının dışında herhangi bir yere düşmesiyle hatta serbest kalan yük dalgasının her iki tarafa doğru hareketiyle meydana gelen aşırı gerilimlere de “tesirle elektriklenme suretiyle meydana gelen aşırı gerilimler” denir [1].

Yıldırım akımı darbe karakterinde olup, değeri sıfırdan tepe değerine kadar hızla yükselir ve nispeten yavaş bir seyirle tekrar sıfır değerine düşer. Kutbiyeti pozitif veya negatif olabilir (çoğunlukla negatiftir). Genel olarak bir yıldırım akımı Denklem (1.1) ile gösterilebilir [1]. (I_0 : Başlangıç boşalma akımı, α ve β : yıldırım dalgasının karakteristiğine uygun sabit değerlerdir.)

$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1.1)$$



Şekil 1.3. Yıldırım darbe akımının temsili gösterimi

Standart darbe gerilimi genel olarak Denklem (1.2) ile matematiksel olarak gösterilebilir.

$$u(t) = U_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1.2)$$

Standart yıldırım darbe gerilimi (1,2/50 μ s), cephe süresi 1,2 μ s, sırt yarıdeğer süresi 50 μ s olan darbe gerilimi olarak tanımlanır. Deneylerde, T₁ cephe süresinin doğrudan belirlenmesindeki güçlük nedeniyle tepe değerinin %30 ile %90'ı arasında geçen süre belirlenir ve bu değer kullanılarak, %100'e karşı düşen cephe süresi belirlenir.

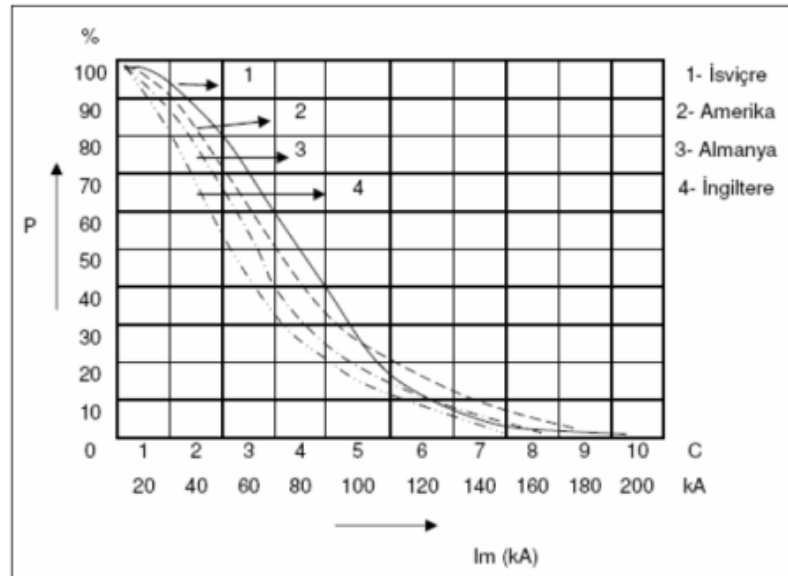
Genel olarak yıldırım akımlarının yarı değer süreleri 30 ile 100 μ s arasında değişir. Eğer T=50 μ s kabul edilirse, yıldırım akımının en büyük değeri I_m ile yıldırımdaki elektrik yükü arasında;

$$Q = 50 \times 10^{-6} \times I_m \quad (1.3)$$

bağıntısı yazılabilir. Buna göre I_m = 20kA olan bir yıldırımın elektrik yükü [1];

$$Q = 50 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^3 = 1 \text{ C}$$

Yıldırım akımları, bazı ülkeler için araştırmacılar tarafından ölçülmüştür. İsviçre, Amerika, Almanya ve İngiltere'de yapılan ölçmeler sonucunda bir bölgeye düşen yıldırım akımlarının tepe değerlerinin (I_m) "birikmeli olasılık dağılımları", yani apsis eksenindeki akım değerine eşit veya bundan daha büyük akım değerine sahip yıldırım sayısının düşen toplam yıldırım sayısına oranları tespit edilmiş ve birikmeli olasılık eğrileri çıkartılmıştır. Birikmeli olasılık eğrileri Şekil 1.4.'de gösterilmiştir [1].



Şekil 1.4. Yıldırım akımlarının birikmeli olasılık eğrileri

Bu eğrilere göre yıldırım akımları birkaç kA ile 200kA arasında oldukça geniş sınırlar içinde değişmektedir. En çok meydana gelen yıldırım akımları 10 kA'ın altında olanlardır. 200 kA'den büyük yıldırım akımlarına nadiren rastlanır. Bu eğriler yardımıyla bir yere düşen yıldırımın kaç kA ya da Coloumb olacağını olasılığı kolayca tespit edilebilir. Örneğin, Almanya'da çıkarılan eğriye göre (Şekil 1.4 - 3 eğrisi) bir yere düşen yıldırımın 20 kA olması olasılığı %85'dir. Dağlık bölgelerde düşme olasılığı düzlük bölgelere göre yaklaşık iki kat yüksektir [1].

1.2. Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma Aygıtları

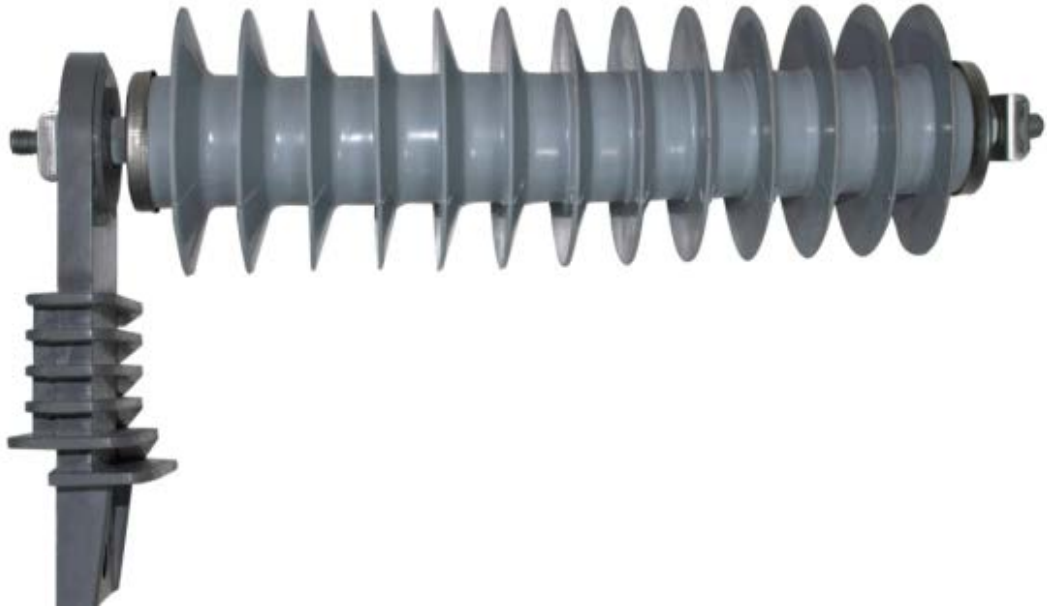
Enerji sistemlerinde arıza ve kesintilere yol açan etkenlerin başında, söz konusu aşırı gerilimler yer almaktadır. Günümüzde aşırı gerilime karşı koruma amacıyla yaygın ve güvenilir olarak kullanılan aygıtlar "Metal Oksit Parafudr"lardır (Şekil 1.6.). Öte yandan, bu amaçla koruma elektrotları ve atlama aralıklı değişken dirençli parafudr gibi aygıtların kullanıldığı da görülmektedir. Ancak, koruma elektrotlarının dik cepheli darbe gerilimlerinde gecikmeli çalışmaları, çalıştıklarında kısa devre etkisi göstermeleri ve elektrotlar arasında oluşan arkin sönmesinin enerji kesilmesine bağlı olması nedeniyle güvenli bir koruma aygıtı sayılmazlar (Şekil 1.5.) [2,23]. Benzer biçimde, atlama aralıklı değişken dirençli parafudrlarda yer alan atlama aralıklarının ve aralarında yer alan yalıtım malzemelerinin kirlenmeye duyarlı olmaları nedeniyle güvenilirlikleri düşüktür [2].



Şekil 1.5. 36 kV'luk transformator tipi geçit izolatörü ve koruma elektrodu

Metal oksit parafudrlarda ana bileşeni çinko-oksit (ZnO) olan direnç blokları kullanılır. Yapılarında herhangi bir atlama aralığı bulunmadığından, “Atlama aralıksız parafudrlar” olarak da adlandırılırlar. Parafudrlar, çinko-oksit dirençlerin bir özelliği olarak belirli bir gerilim seviyesinin altında direnç değerlerinin çok yüksek olması nedeniyle yalıtkan özellik gösterirler. Beyan geriliminin üzerinde ise direnç değerinin düşmesiyle üzerlerinden daha fazla akım geçirirler. Gerilim seviyesi beyan gerilim değerinin altına düşünce tekrar yalıtkan hale geçerler. Beyan gerilimi, parafudr bağlantı uçları arasında, kısa süreli olarak bulunmasına izin verilen en yüksek işletme geriliminin etkin değeridir. [12].

Günümüzde, metal-oksit parafudrlarda porselen korungaç (mahfaza) yerine polimer gövde daha fazla kullanılmaktadır. Polimer gövdeli parafudrlarda, metal oksit direnç blokları cam elyafı destekli polyesterle birleştirilmekte ve bu yapının üzerine polimer kılıf geçirilmektedir. Ancak, polimer kılıfın, içinde boşluk kalmayacak ve sızdırmazlığı sağlayacak biçimde yerleştirilmesi gerekmektedir [2]. Polimer gövde, parafudrların, hafif ve mekanik darbelere dayanıklı olmasını ve boyutlarının küçülmesini sağlamaktadır. Bu özellikleri kurulumlarının kolay olması önemli üstünlükleridir [2].



Şekil 1.6. Polimer gövdeli atlama aralıksız metal oksit parafudr ($U_r = 36$ kV, $U_c = 29$ kV, $I_n = 10$ kA, $I_s = 20$ kA, ELOPAR)

1.3. Koruma Aygıtları Üzerinde Yapılan Deneyler

Metal oksit parafudrların tasarımı, üretimi ve performansına yönelik olarak terimler-tarifler, tip deneyleri, rutin deneyleri kabul deneyleri ilgili standartta tanımlanmıştır [3]. Tip deneyleri standartta, parafudrun performansının tespiti ve ilgili standarda uygunluğunu gösteren deneyler olarak; rutin deneyler ise tip deneyleri ile belirlenmiş özellikleri sağlayacak yeterlilikte, parafudrun malzemeleri, bölümleri veya her bir parafudr üzerinde yapılan deneyler olarak tanımlanmıştır.

Darbe akım üretici tasarım ve yapımı ile metal-oksit parafudr için ilgili standartta yer alan rutin deneylerini ve tip deneylerinin bir bölümünü yapma olanağının elde edilmesi hedeflenmiştir. Böylece, metal oksit parafudrların, elde edilecek farklı karakteristiklere sahip darbe akımları sınanması öngörülmüştür. Standartta tanımlanan yapılan darbe akımları; 2.,3. ve 4. bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir [4]. Darbe üretici tasarımı ve üretimi gerçekleştirildiğinde metal-oksit parafudr standardında yer alan yıldırım darbe akımı artık gerilim deneyi (8/20 μ s), anahtarlama artık gerilim deneyi (30/80 μ s) ve yurt dışında sayılı laboratuvarlar tarafından yapılabilen 100 kA genlik değerine sahip yüksek akım darbesi (4/10 μ s) deneyleri yapılabilecektir.

Artık gerilim tip deneyi ile en yüksek artık gerilimi tayin etmek için gerekli olan akım ve gerilim değerleri belirlenir. Böylece, belirtilen darbe akımına maruz bırakılan parafudrun gerilimi ile rutin deneylerde ölçülen gerilim seviyesi arasındaki oranın hesaplanmasını da yapılabilir. İmalatçının seçtiği rutin deney işlemine bağlı olarak, referans gerilimi veya anma boşalma akımının 0,01 ile 2 katı arasındaki uygun değerli yıldırım darbe akımındaki artık gerilim değeri alınabilir [3].

Parafudrun yüksek akım darbesi, doğrudan yıldırıma maruz kalan parafudrun kararlılığını sınamak için uygulanan 4/10 darbe biçimli boşalma akımıdır. TÜBİTAK projesi kapsamında tasarlanan 100 kA Darbe Akım Setinin (4/10 μ s) yurt içinde benzeri bulunmamaktadır. Yurt dışında ise sayılı laboratuvarlarda bulunmaktadır. İlgili standartta, çalışma çevrimi deneyi altında parafudr numunesini şartlandırma amaçlı kullanılmaktadır. 10 kA ve 20 kA anma boşalma akımına sahip parafudrlar için yüksek akım darbesi deney genliği 100 kA olarak belirlenmiştir.

2. DARBE AKIMLARI

Güç sistemlerinde, gerilim yükselmeleri, açma - kapama (anahtarlama - switching) aşırı gerilimleri ve atmosferik etkilerden kaynaklanan aşırı gerilimler çoğu zaman yüksek enerji düzeylerine sahip olmasalar da aygıt yalıtımlarını bozarak, sistem kısa devrelerine yol açabilmektedirler [2].

Güç sistemlerinde yer alan aygıtların, yıldırım düşmesi, kısa devrelerden kaynaklı şebekedeki zorlanmalarının sonuçlarını görmek amacıyla yüksek genlikli değerlere sahip darbe akımı deneyleri yapılmaktadır. Darbe akımlarının dalga şekli, yapılması planlanan deneyin amacına bağlı olarak çok farklı karakteristiklerde olabilmektedir. Temel olarak darbe akımları, eksponansiyel ve dikdörtgen biçimli darbe akımı formundayken kısa süreli alternatif akım dalgası da bu başlık altında incelenebilmektedir. Eksponansiyel darbe akımlarının Türkçe literatürdeki karşılığı “Üstel Fonksiyonların Farkı” olarak tanımlanabilmektedir (Denklem (1.1)). Ancak yabancı literatürde eksponansiyel olarak bilindiği için bu çalışmada da “Üstel Fonksiyonların Farkı” yerine “Darbe Akımı” ifadesi kullanılmıştır. Kısa süreli alternatif akım dalgası, güç frekansının sınırlı süresinde geçici bir DC bileşeniyle üst üste binen bir dalga şekli olması nedeniyle darbe akımları başlığı altında incelenebilir [10]. Süre olarak darbe akımlarına göre daha uzun süreli olmaları nedeniyle sözü edilen kısa devre darbe akımları bu çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Buna rağmen literatürde bazı kaynaklarda kısa süreli alternatif akım dalgası darbe akımlarına dahil edilmiştir [10]. Darbe akımları en genel haliyle tepe değerleri ve zaman parametreleriyle karakterize edilir. Kullanım yerine göre akımın darbe yükü ve enerji büyüklüğü genel olarak önem kazanmaktadır. Dalga şeklini ifade etmek için ilgili standartta “ T_1/T_2 ” gösterimi kullanılmaktadır. Bu ifadede ilk sembol sanal cephe süresini (T_1) ve ikincisi sanal sırt yarı değer süresini (T_2) gösteren iki sayının kombinasyonudur. Her iki değer için birim mikro saniyedir ve “/” işaretinin herhangi bir matematiksel anlamı yoktur [3].

Yıldırım akımları darbe karakterinde olup, değeri sıfırdan tepe değerine kadar hızla yükselir ve nispeten daha yavaş sıfır değerine düşer. Çoğunluğun negatif kutbiyette olduğu varsayılır [1].

Tablo 2.1. Darbe akımı karakteristikleri (T_1/T_2) ve ilgili standartlar

Dalga Şekli	Zaman parametresi ve yer aldığı IEC standardı		
	T_1 (μs)	T_2 (μs)	IEC
0.25/100	0.25	100	62305-1
1 / ≤ 20	1	≤ 20	60099-4
2 / 20	2	20	60099-8
4 / 10	4	10	60099-4 60099-8
5 / 300	5	300	61000-4-5 61643-21
6 / 310	6	310	61643-311
8 / 20	8	20	60099-4 61000-4-5 61643-11
10 / 250	10	250	61643-21
10 / 350	10	350	61643-11 62305-1
10 / 1000	10	1000	61643-21
30 / 80	30	80	60099-4
(30-100) /(60-200)	$30 < T_1 < 100$	$2 \cdot T_1$	60099-4

Darbe akımları, hava taşıtlarında yıldırımdan korunma ve güvenliğin öne çıkması üzerine kullanılmaya başlanmıştır. Gerek hava taşıtı gerek donanımlarının yıldırım akımına tepkilerinin sınanması amacıyla darbe akımlarının deneylerinin yapılması gerekli görülmüştür. Hava taşıtının yakıt deposunun korunması, test edilmesi için darbe akımı ile deneylere gerek duyulmuştur. Ayrıca anten sistemlerindeki radyo alıcı, verici sistemlerin deneylerinde kullanılmak üzere hava taşıma endüstrisinde deney sistemleri olarak yerini almıştır. Havacılık endüstrisinde yıldırımdan korunma ile ilgili öngörülen deney akımlarından biri de 200 kA akım darbesidir [13,19,20].

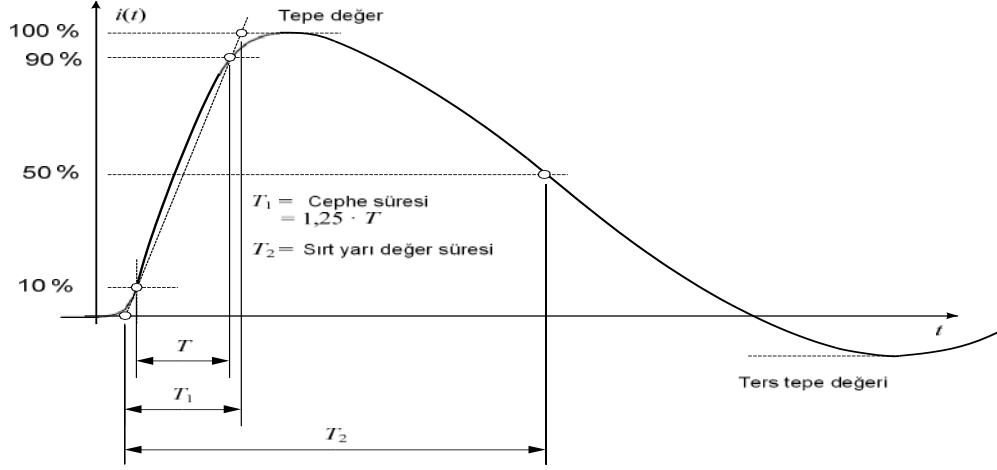
Günümüzde darbe akımları, hava taşıtları endüstrisi dışında, elektrik iletimi ve dağıtım sistemlerindeki donanımların deneylerinde aygıtta uygulanmaktadır. İç ve dış aşırı gerilimlerden kayanaklanan zorlanmalara karşı koruma için kullanılan aygıtların tip ve rutin deneylerinde darbe akımları kullanılmaktadır. Darbe akımının dalga şekli, uygulanacağı deney numunesi, deney türü ya da deney standardına göre farklılık göstermektedir. Tablo 2.1.'de T_1 , T_2 parametreleri ile IEC standartlarındaki karşılıkları verilmiştir. Deneylerin amacına bağlı olarak darbe akımlarının dalga şekilleri farklılıklar göstermektedir. Temel olarak,

Eksponansiyel darbe akımı (Darbe akımı),
Dikdörtgen dalga darbe akım,
Kısa süreli alternatif akım dalgası,
olmak üzere üç tip darbe akımı vardır.

2.1. Darbe Akımları

Darbe akımları tepe değerine kadar hızlı (Eksponansiyel bir artış ile) yükselen, tepe değerine ulaştıktan sonra nispeten daha yavaş olarak düşüş gerçekleştiren bir akım tipidir. İlgili standartta darbe akımı, “Kısa sürede sıfırdan tepe değerine yükselir ve daha sonra yaklaşık olarak eksponansiyel olarak ya da çok yavaş sönümlü bir sinüs eğrisi şeklinde sıfıra düşer” olarak tanımı verilmiştir [4]. Genel olarak 3 parametre ile gösterilirler. Sıfırdan tepe değerine kadar olan süre cephe süresi (sanal cephe süresi), en yüksek genliğe ulaştığı nokta tepe değeri ve tepe değerinden yarı değere düşene kadar geçen süre sırt yarı değer süresi (sanal sırt yarı değer süresi) olarak tanımlanır (Şekil 2.1.) [4].

Darbe akımının ifade edilmesini sağlayan göstergeler, deney akımı değerinin (tepe değeri) yanı sıra, T_1 cephe zamanı ve T_2 yarı değerine kadar olan süredir. Her iki zaman parametresi için tepe değerinin %10 ile %90'ını kesen bir doğru parçasının zaman eksenini (x eksenini) ile kesiştiği nokta sanal başlangıç noktası (sanal orijin) olarak kabul edilir. Zaman parametreleri bu değere referans alınarak ölçülür (Şekil 2.1.). Zaman parametrelerine ilişkin standart tanımları aşağıda verilmiştir [3].



Şekil 2.1. Darbe akımı dalga şekli ve parametreleri

T_1 : Mikrosaniye cinsinden akımın tepe değerinin % 10'undan % 90'ına kadar yükselmesi için geçen sürenin 1,25 katı (Şekil 2.1.) [3].

T_2 : Sanal başlangıç noktası ile akımın tepe değerinin yarı değerine düştüğü an arasında geçen zaman aralığı. Bu süre mikrosaniye olarak ifade edilir (Şekil 2.1.).

Cephe süresi boyunca salınımlar var ise, % 10 ve % 90'daki referans noktaları, salınımların ortalama eğrisi üzerinde tespit edilir. 8/20 μ s darbe akımının cephe süresi $T_1 = 8 \mu$ s, yarı değer süresi $T_2 = 20 \mu$ s'dir. Darbe akımı (8/20 μ s) için toleranslar, tepe değeri için $\pm\%$ 10 ve zaman parametreleri için $\pm\%$ 20'dir. Diğer darbe şekilleri için toleranslar farklı olabilir. Darbe akımının diğer tipleri için tolerans değerleri ve aygıt tipleri Tablo 2.2.'de verilmiştir. Genişletilmiş belirsizliğin sınır değerleri, tepe değeri için % 3 ve zaman parametreleri için % 10'dur [10]. Deney akımının sıfır değerinden geçtiğinde, diğer alternanstaki genliği, ilgili standart tarafından aksi belirtilmediği sürece tepe değerin %30'unu aşmamalıdır. %30'u geçtiği durumda deney numunesinde zıt kutup akımından zarar görme tehlikesi oluşur. Bir darbe akımının yükü, $i(t)$ dalga şeklinin mutlak değeri üzerindeki integral süresi olarak tanımlanır:

$$Q = \int_0^{\infty} |i(t)| dt \quad (2.1)$$

Açığa çıkan enerji, darbe akımı karesinin zaman integrali olarak Joule integrali şeklinde tanımlanır:

$$W = \int_0^{\infty} i^2(t) dt \quad (2.2)$$

Tablo 2.2. Darbe akımlarının uygulandığı aygıtlar örnekleri ve toleransları

Deney altındaki aygıt tipi	Darbe akım tipi	Cephe süresi T1 (μ s)	Yarı değer süresi T2 (μ s)	Zaman parametreleri için toleranslar
Atlama aralıksız parafudr deneyi	1/ \leq 20	1	\leq 20	T1 \pm 10 % T2 \leq 20 μ s
Atlama aralıksız parafudr deneyi	4/10	4	10	(3,5 < T1 < 4,5) μ s T2 \pm 10
Atlama aralıksız parafudr deneyi	8/20	8	20	(7 < T1 < 9) μ s (18 < T2 < 22) μ s
Parafudr deneyi				T1 \pm 10 % T2 \pm 10 %
Elektronik aygıtlar				T1 \pm 20 % T2 \pm 20 %
Telekomünikasyon ve sinyal ağlarına bağlı aşırı gerilim koruyucu cihazlar				T1 \pm 20 % T2 \pm 20 %
Atlama aralıksız parafudr deneyi	30/80	30	80	(25 < T1 < 35) μ s (70 < T2 < 90) μ s
Atlama aralıksız parafudr deneyi	30-100/60-200	30-100	60-200	-
Telekomünikasyon ve sinyal ağlarına bağlı aşırı gerilim koruyucu cihazlar	5/300	5	300	T1 \pm 20 % T2 \pm 20 %
Atlama aralıksız parafudr deneyi	10/350	10	350	Verilmemiştir
Telekomünikasyon ve sinyal ağlarına bağlı aşırı gerilim koruyucu cihazlar	10/350 10/250	10	350 250	T1 \pm 30 % T2 \pm 20 %

Bu çalışma kapsamında 8/20 μ s ve 4/10 μ s'lik darbe akımları üreticilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böylece, atlama aralıksız metal oksit parafudra, üretilen darbe akımının uygulanması ve ilgili standart maddelerine uygun olarak, akım parametrelerinin ve artık gerilimin ölçülmesi hedeflenmiştir. Parafudr standardına göre 8/20 μ s akım darbesi, deney numunesinin yıldırımdan koruma seviyesini belirlemede kullanılırken; 4/10 μ s akım darbesi, çalışma çevrimi deneyinde numuneyi şartlandırma amaçlı kullanılmaktadır. 8/20 μ s darbe akım tipi aynı zamanda yıldırım akım darbesi ifadesi ile standartlarda yer almaktadır. Tablo 2.2.'de görüldüğü üzere aynı akım darbesi şekli birden fazla standardın içeriğinde yer almaktadır. Uygulanacağı deney numunesinin karakteristiğine göre tolerans değerlerinde değişimler olmaktadır.

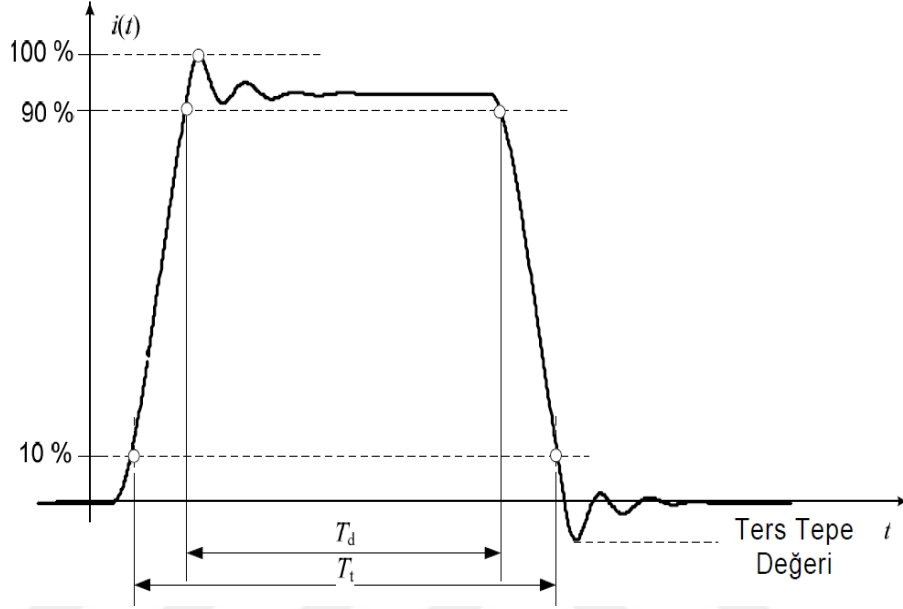
Başlangıçta doğrusal olmayan elemanların test edilmesi için kullanılan belirli akım dalga şekillerinin, standart bir dalga şekli elde etmede bazı sorunlara yol açan doğrusal elemanlara da uygulandığı görülmüştür. Örneğin, 8/20 μ s dalga şekli parafudr deneyinde yer almaktadır. Parafudr, direnci (akım-gerilim ilişkisi) doğrusal bir değişim göstermediğinden, doğrusal olmayan bir eleman bir eleman olarak tanımlanır. Doğrusal olmayan yükler söz konusu olduğunda, bu dalga şekli kolayca elde edilebilir. Bununla birlikte, doğrusal elemanlar kullanılması durumunda, bu parametrelere genel olarak erişilemez; çünkü, sadece R, L ve C elemanlarını içeren bir üreteç ile Tablo 2.2.'de verilen T_1 ve T_2 parametre kombinasyonlarının sadece çok küçük bir kısmını elde etmek mümkündür [4]. Bu yüzden doğrusal elemanların testi için kullanılacak akım değerlerinin toleransları geniş tutulmaktadır.

2.2. Dikdörtgen Darbe Akımlar

En büyük değerine hızla yükseldikten sonra, belirli bir süre yaklaşık olarak sabit kalan ve daha sonra hızla sıfıra düşen akım dikdörtgen akım darbesi olarak tanımlanmaktadır. Dikdörtgen darbeyi tanımlayan parametreler; polarite, tepe değeri, tepe değerinin sanal süresi ve toplam sanal süredir [3]. Atlama aralıksız parafudr standardındaki, “Tekrarlı yük aktarma oranını (Qrs) doğrulama deneyi” ve “Çalışma çevrimi deneyi” maddelerine göre dikdörtgen darbe akımı deney numunesinden geçirilmektedir. İletim ve dağıtım hatlarında kullanılmayan (örneğin, transformatör merkezinde kullanımı amaçlanan) parafudrlar için 2 ms ila 4 ms sanal toplam süresi bulunan uzun süreli (dikdörtgen biçimli) darbeler veya 2 ms ila 4 ms toplam süresi bulunan tek kutuplu sinüs biçimli yarım dalga darbeler uygulanmaktadır [3].

Dikdörtgen darbe akımları Şekil 2.2. ve Şekil 2.3.'te gösterildiği gibi yaklaşık olarak dikdörtgen bir şekle sahiptir, uzun süreli darbe akımı olarak da bilinmektedir. Bu darbe akımının gösterimi için de akım ve zamandan oluşan parametreleri bulunmaktadır. Tepe süresi T_d ve toplam süresi T_t ' den oluşan zaman parametreleri ve deney akımı tepe değeri \hat{i} ile karakterize edilmektedir. Salınımlar da dahil olmak üzere akımın maksimum değeri, darbe akımının değeridir. Bu darbe akım tipi sıfır değerine kısa sürede düşerek sonlanmaktadır. Bir dikdörtgen darbe akımının süresi (T_d), akımın tepe değerinin %90'ından büyük olduğu süre olarak tanımlanan sanal bir parametredir (Şekil 2.2.). Salınım olduğu durumda (Şekil 2.3.), T_d , akımın sürekli

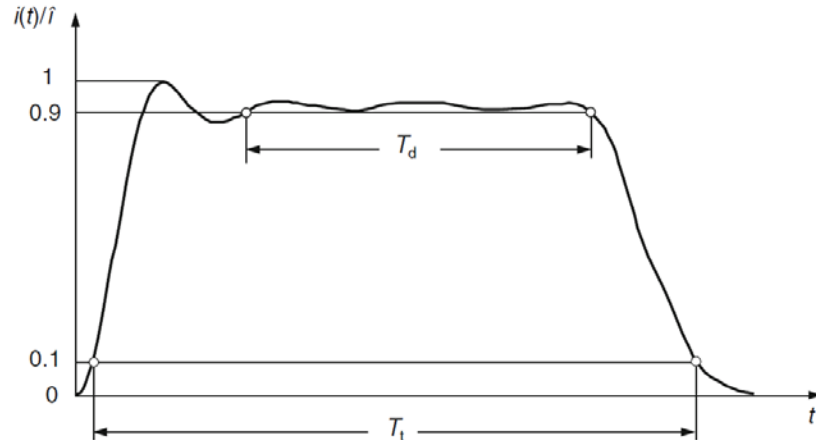
olarak tepe değerinin %90'ından daha yüksek olduğu en uzun süre olarak alınır. T_d süresi için nominal değerler 500, 1000 ve 2.000 μs hatta 3.200 μs kadar uzayabilmektedir. Tepe değeri süresinin uzun olması deney numunesinin daha ağır şartlarda sınanmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.2. Dikdörtgen darbe akımı dalga şekli ve parametreleri

Bir dikdörtgen darbe akımının toplam süresi (T_t), akımın tepe değerinin % 10'undan büyük olduğu zaman olarak tanımlanan sanal bir parametredir (Şekil 2.2.) [4]. Çıkış süresinde küçük salınımlar olduğu durumda, %10 değerine ulaşılma süresini belirlemek için ortalama bir eğri çizilerek ölçülmektedir. Buna ek olarak $T_t \leq 1.5T_d$ eşitliğinin sağlanması gerekmektedir. Standartta, yükselme süresi ile ilgili başka koşul belirtilmemiştir.

Dikdörtgen darbe akımlarının üretilmesi sırasında toleransın alt sınır değeri sıfır, üst tolerans değeri hem \hat{i} hem de T_d için +% 20'si kadardır. Sıfır çizgisinin altındaki dikdörtgen darbeleri akımın olası bir ters tepe değeri, \hat{i} deney akımı değerinin % 10'unu geçmemelidir. Denklem (2.1) ile yük değeri ve Denklem (2.2) gereğince Joule integrali için alt tolerans sınırı tekrar sıfırdır. İzin verilen ölçüm belirsizlikleri, tepe değeri için % 3 ve zaman parametreleri için % 10'dur. Ters alternansta oluşan tepe değeri, normal tepe değerinin %10 değerini aşmamalıdır.



Şekil 2.3. Dikdörtgen darbe akımı salınlı durum

2.3. Kısa Süreli Alternatif Darbe Akımları

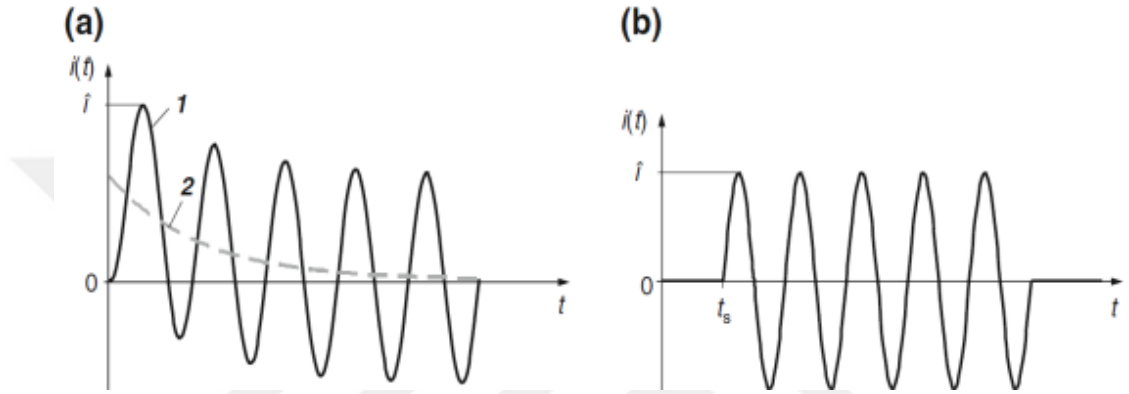
Yüksek alternatif akım darbeleri, güç sistemlerindeki kısa devrelerden kaynaklanır ve genellikle birkaç periyot boyunca sürmektedir. İlgili güç sistemi aygıtının zorlanması kısa süreli alternatif akımlar kullanılarak güç laboratuvarında test edilmektedir. Anahtarlama açısı (ϕ), gerilimin sıfır geçişi ile karşılaştırıldığında kısa devrenin başladığı anı karakterize etmektedir. Ağırlıklı olarak kısa süreli alternatif akımın dalga şeklini belirlemektedir. Genel olarak, dalga şekli geçici olmayan bir DC bileşeni ile üst üste gelen alternatif bir güç frekanslı akım ile karakterize edilen, simetrik olmayan bir dalga şeklidir (Şekil 2.4. a). Kısa süreli alternatif akımın \hat{i} tepe değeri, üst üste binmiş DC bileşeni nedeniyle, sabit alternatif akımın değerini yaklaşık olarak ikiye katlamaktadır. Maksimum akım genliği böylece birkaç 100 kA değerine çıkabilmektedir. DC bileşeninin azalmasından sonra kısa süreli akım, kısa devre direncine ve endüktansına bağlı olarak faz veya empedans açısı ile gerilimi düşürmektedir. Belirli anahtarlama ve faz koşulları için bir DC bileşeni bulunmayan simetrik kısa süreli bir akım ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.4. b). Deney standartlarında gerçək r.m.s değeri:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (2.3)$$

kısa süreli akımların diğer akım değerleri ilgili standartta tanımlanmıştır [4]. Simetrik AC bileşeni (r.m.s değeri), kısa süreli akımın üst ve alt tepe değerleri arasındaki fark I_n 2,83'e bölünmesi ile elde edilmektedir. Genel olarak alternatif akımın değeri, bir

yarım dalganın tepe değeri ile zıt kutuplu iki komşu yarım dalganın ortalama tepe değeri arasındaki farkı 2,83'e (üç-tepe yöntemi) bölerek tanımlanmaktadır. Standartta, kısa süreli değişken akımların üretilmesi sırasındaki tolerans sınırları, tepe ve etkin (r.m.s.) değerleri için $\pm 5\%$ olarak verilmiştir. İlgili standartta belirtilen genişletilmiş belirsizlik değeri 5% 'i geçmemelidir [4].

$$\phi = \arctan \frac{X}{R} = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (2.4)$$



Şekil 2.4. Kısa süreli alternatif akım örnekleri. a) geçici DC bileşen 2 ve simetrik kısa süreli alternatif akım 1, b) simetrik kısa süreli alternatif akım

Standartta göre, ilgili teknik komite aksini belirtmedikçe, deney akımındaki tolerans Tablo 2.3.'te verildiği gibi olmalıdır [4].

Tablo 2.3. Standartta belirtilen kısa süreli AC akım için tolerans değerleri

Büyükük	Tolerans
Tepe değeri	$\pm 5\%$
Simetrik AC bileşen	$\pm 5\%$
$\cos \phi$	$\pm 0,05$
Frekans	$\pm 5\%$
Süre	İlgili teknik komite tarafından tanımlanacak

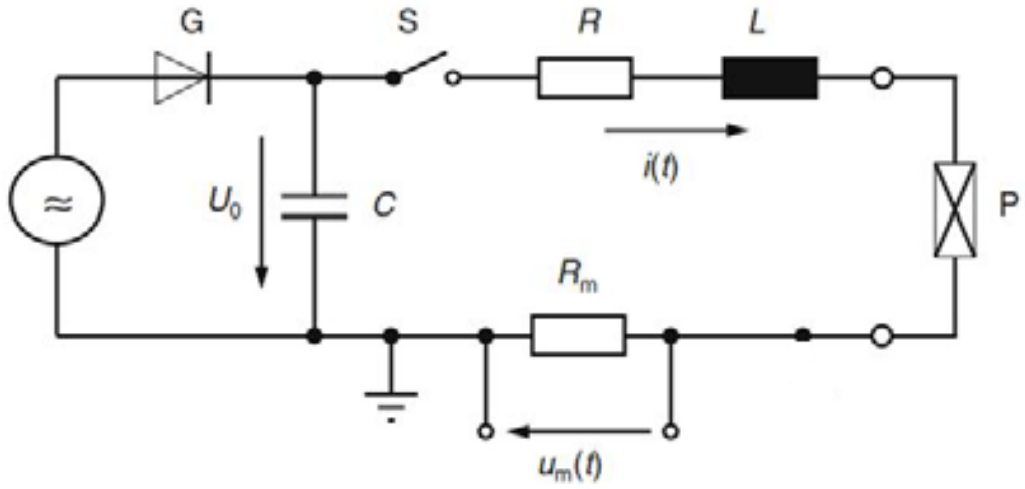
3.DARBE AKIMLARININ ÜRETİLMESİ

Bu bölümde darbe akımlarının üretim yöntemleri ve parametrelerin hesaplamalarına yer verilmiştir. Ağırlıklı olarak darbe akımları ve dikdörtgen darbe akımlarının üretilmesi incelenmiştir. Ekspansiyel darbe akımı başlığı altında özellikle 4/10 μ s, 8/20 μ s, 30/80 μ s darbe tiplerinin üretimi ve üreteçlerinin yapısı açıklanmıştır.

Yüksek darbe akımları, yüklenmiş bir kondansatörden, atlama küresi vasıtasıyla deney numunesine hızla boşaltılmasıyla üretilmektedirler. Darbe akımlarının dalga şeklini üreticinin devresi ve deney numunesi karakteristiği belirlemektedir. Dolayısıyla kullanılan akım ve gerilim ölçüm sistemi, üreticinin çıkış uçlarına değil, doğrudan deney numunesine bağlanmaktadır. Üreticinin bağlantılarını oluşturan yapıların (ara bağlantılar, civata, vb.) endüktansları çok düşük olacak şekilde ayarlanmalıdır [10]. Bir darbe akım üreticinin tasarımı için, ilgili standartlarda tanımlanmış darbe tipini tam olarak karşılayan eşdeğer bir devre tanımlanır. Eşdeğer devre, simülasyon ile doğrulandıktan sonra devre şeması gerçek aygıtlar ile üretilir [10].

3.1. Darbe Akımlarının Üretilmesi

Bir deney laboratuvarı ortamında darbe akımları üretmek için, kapasitif enerji depolaması yapan bir devre kurmak gerekmektedir. C kondansatörü, öngörülen bir U_0 gerilimi ile şarj olur ve aniden, bir tristor veya tetiklenmiş bir atlama küresinin anahtar elemanı olarak çalışmasıyla, P deney numunesi, R direnci ve L endüktansı üzerinden hızla boşaltılır (Şekil 3.1.). Bu sırada devrede bulunan R_m ölçüm direnci, direnç değeri ve bu direnç üzerindeki $u(t)$ gerilimi değerinden devreden akan $i(t)$ akımını belirlenir. Üretilen darbe akımın dalga şekli sadece R, L ve C değerlerine bağlı olmamaktadır. Deney numunesinin direnç değerinin de dalga şekli üzerinde etkisi vardır[10].

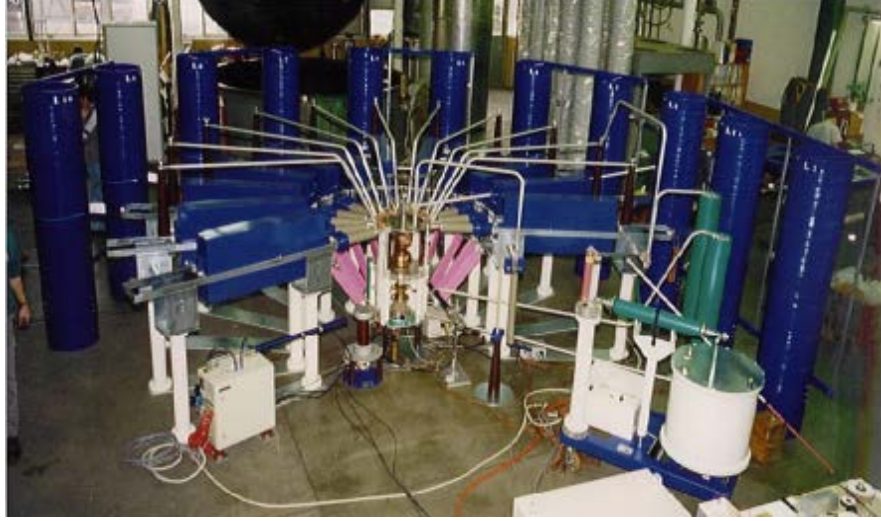


Şekil 3.1. Darbe akım üretici eşdeğer devresi

- U_0 : Kondansatör seti şarj gerilimi
- U_m : Ölçüm direnci üzerindeki gerilim
- G: Yarım dalga doğrultucu
- C: Yüksek gerilim kondansatör seti
- S: Anahtar
- L: Bobin
- P: Deney numunesi
- R_m : Ölçü direnci (Şönt direnç)
- $i(t)$: Deney numunesi içinden akan akım

Bir diğer yöntem olarak darbe gerilim üreticilerinin yeniden düzenlenmesiyle, kısa devre koşullarında darbe akımları üretebilmektedir. Ulaşılabilir akım büyüklükleri, kapasitörlerinin kapasitansına bağlı olarak, örneğin 8/20 μ s akım darbesi için, 40-70 kA seviyelerinde olabilmektedir.

Genellikle masa tipi kompakt darbe akım üreticilerinde 10 kA mertebelerinde akım değerleri üretilebilirken; büyük hacimli üreticilerde 200 kA'ler veya daha yüksek akımlar üretilebilmektedir. Çok yüksek akım genliklerini üretebilen akım üreticileri, paralel bağlı birçok kondansatörün hilal şeklinde veya tamamen dairesel bir düzen içinde modüler biçimde düzenlenmesiyle oluşturulmaktadır (Şekil 3.2.) [10].



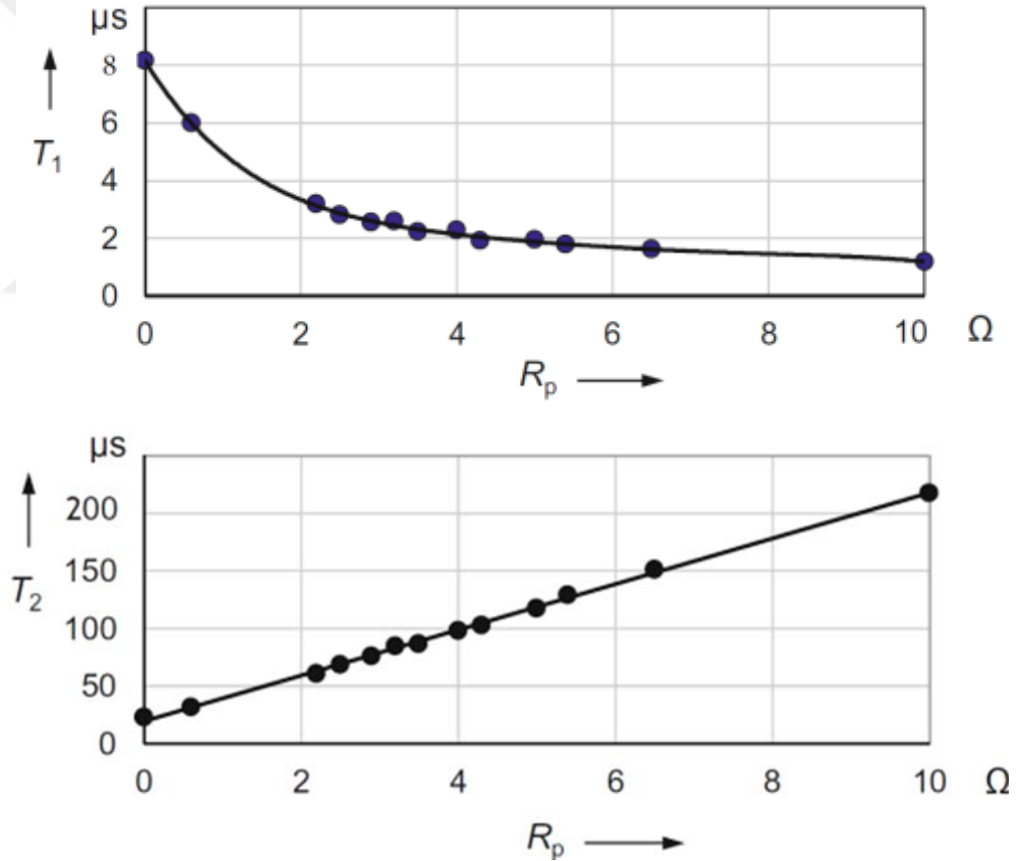
Şekil 3.2. Dairesel düzen ile oluşturulmuş darbe akım üretici örneği (100 kV 150 kA 150 kJ HAEFELY)

Bu çalışma kapsamında üretic, yarım daire düzeni ya da tam daire düzeni kullanarak oluşturmak yerine; iki grup halinde dikdörtgen prizması şeklinde tasarımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3.). Kapasitif enerji depolamalı darbe akımı üretimi için üretic devresi Şekil 3.1.'e benzer şekildedir. C kapasitörü, bir kondansatör seti oluşturmak üzere kendi içinde seri, birbirleriyle paralel olarak bağlanmış kondansatörlerden oluşturulmuştur (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Tasarımı gerçekleşen darbe akım üretici ve ölçüm seti

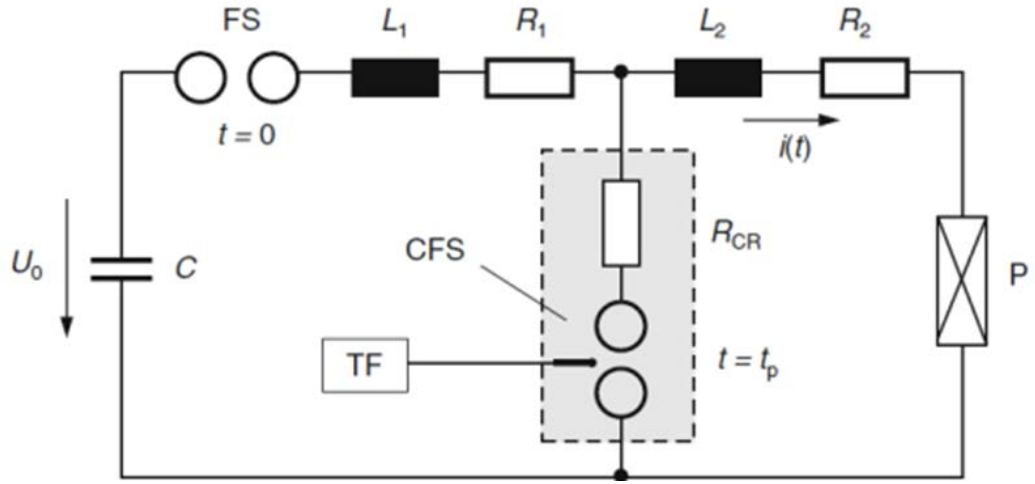
Darbe akımının dalga biçimi ve dolayısıyla parametreleri, bağlı olan deney numunesinin, ölçüm sisteminin ve bağlantı noktalarının da dahil olmak üzere tüm devrenin empedansları ile belirlenir. Şekil 3.1.'de darbe akım üretici şematik gösteriminde yer alan P deney numunesinin direncinin (R_p) değerine göre zaman parametreleri T_1 ve T_2 'nin değişimi Şekil 3.4. de gösterildiği gibi olmaktadır. Aynı etki R_m ölçüm direnci (şönt direnç) değerinin artması durumunda da geçerlidir. Deney numunesinin (R_p) direnci arttırıldığı durumda cephe süresi azalmakta, yarı değer süresi artmaktadır. Direncin artması ile gerilim düşümü de artacağından dolayı üreteç, tepe değerinde en büyük akım genliğini üretemez duruma gelmektedir. Eşdeğer devrede C ve L değerleri biliniyorsa, direncin T_1 ve T_2 üzerindeki etkisi de hesaplanabilir.



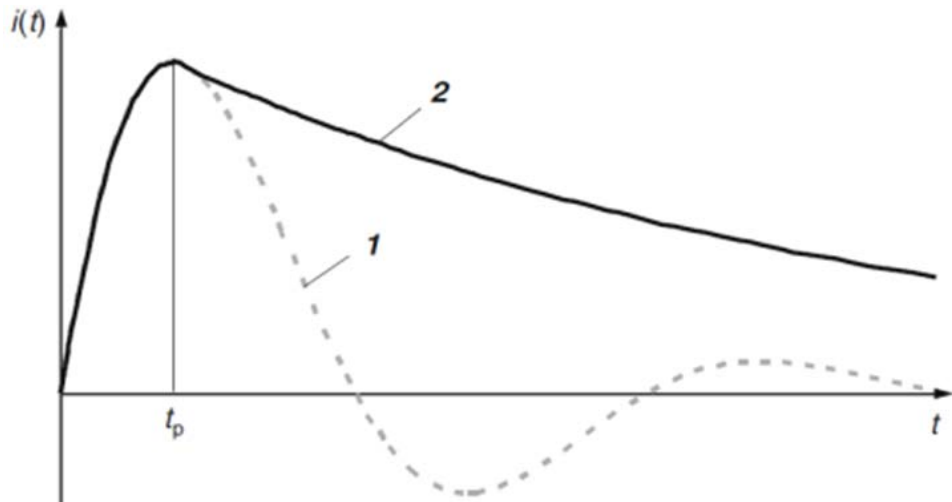
Şekil 3.4. Deney numunesi direnç değeri ile T_1 , T_2 karşılaştırma eğrileri

Şekil 3.1.'de verilen üreteçle üretilen darbe akımı zıt kutupta tepe değer oluşturabilmektedir (Şekil 2.1.). Zıt kutupta oluşan tepe değerini normal tepe değerinin üçte birini geçmemesi gerekmektedir. Parafudr ve diğer güç aygıtlarının deneylerinde bu zıt kutup değeri istenmeyen bir durum olarak görülmektedir. Şekil

3.1.'de verilen R değerinin artırılması zıt kutup değerinin düşürülmesini sağlamaktadır. Yüksek genlikli darbe akımları üretildiğinde zıt kutupta oluşan tepe değer istenmiyor ise “kesme (düzeni)” içeren standart darbe akım üreticiden daha karmaşık yapıya sahip devre kullanılmaktadır (Şekil 3.5). Şarj olan kondansatör $t=0$ anında FS atlama aralığı üzerinden $T=t_p$ süresine kadar deney numunesi üzerine boşaltılmaktadır. $T=t_p$ anında TF atlama aralığı tetiklenmekte ve akım R_{CR} üzerinden akarak L_2 ve R_2 yi kısa devre etmektedir. Dalga şekli, Şekil 3.6. daki 2 numaralı dalga şekli gibi olmaktadır. Böylece, darbe akımında sıfır geçişi önlenebilmektedir.



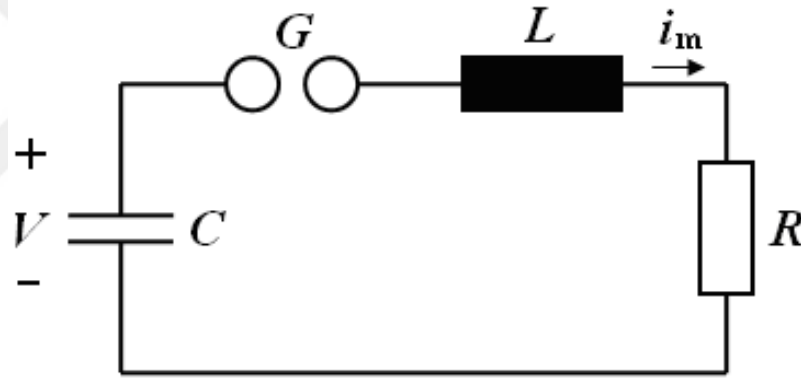
Şekil 3.5. Kesme aralığı içeren üreteç tipi eşdeğer devresi



Şekil 3.6. Darbe akım üretici ile üretilen darbe akım şekli (1), Kesme aralığı tekniğiyle elde edilen darbe akım şekli (2)

Darbe akımlarının üretimindeki bir diğer yöntem ise endüktif enerji depolama sistemlerinin kullanılmasıdır. Bu yöntem ile doğru akımla şarj edilen bir bobin, başlangıçta yüke paralel kapalı bir konumdadır. Anahtarın aniden açılmasıyla deney numunesi içinden darbe akımı geçirilmektedir. Bu yöntemin uygulanmasında, yüksek akım değerlerinde eriyen ve böylece şarj devresini kesen devre kesici ya da teller ani komutasyon anahtarı olarak kullanılmaktadır. Birden fazla (çoklu) yıldırım darbesini simüle etmek için, farklı darbe şekillerine ve her iki polariteye sahip hızlı darbe akımı dizisi oluşturabilen akım üreteçleri kullanılır [10].

Şekil 3.1.'de verilen darbe akımlarının üreteç devresi analitik olarak incelenmiştir. Deney numunesinin doğrusal bir yük olduğu varsayılarak RLC devresine Kirchhoff gerilim kanunu uygulanmıştır. Kondansatör setinin kapasitesi doğru gerilimle şarj edilir ve atlama küresi aracılığıyla R-L devre elemanlarından akım geçişi sağlanır.



Şekil 3.7. Darbe akımı analizi yapılacak olan RLC devresi

Buna göre, Şekil 3.7.'deki eşdeğer devreye uygun olarak Kirchhoff gerilim kanunu uygulanırsa,

$$U_C = U_L + U_R \quad (3.1)$$

$$U_0 - \frac{1}{C} \int i dt = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (3.2)$$

ifadeleri yazılabilir. Denklem (3.2)'de U_0 , kapasitörün başlangıç ($t=0$) anındaki şarj gerilimidir. Denklem (3.2)'nin laplace dönüşümü Denklem (3.3)'te verilmiştir [10].

$$\frac{U_0}{s} - \frac{1}{Cs} = LSi + Ri \quad (3.3)$$

Buradan, akım için;

$$i(s) = \frac{U_0}{s} \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (3.4)$$

eşitliği elde edilir. Laplace ters dönüşümü uygulandığı durumda iki farklı çözüme ulaşılır. Bu çözümler Denklem (3.5) ve Denklem (3.6) da verilmiştir [10].

$$i(t) = \left(\frac{U_0}{w_d L} e^{-\delta t} \sin w_d t \right) \quad (3.5)$$

$$i(t) = \left(\frac{U_0}{w_d^* L} e^{-\delta t} \sin w_d^* t \right) \quad (3.6)$$

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (3.7)$$

$$w_d = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (3.8)$$

$$w_d^* = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (3.9)$$

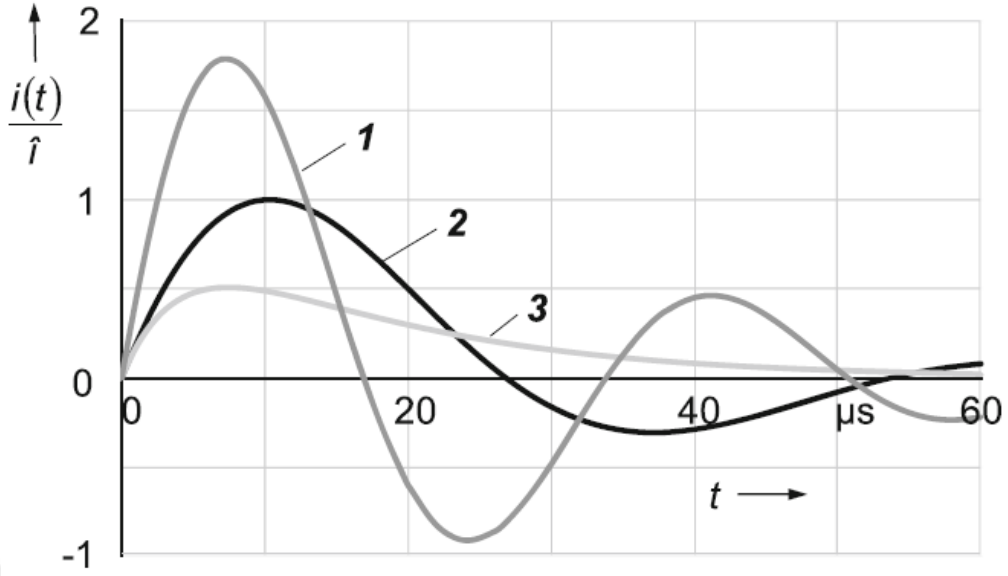
Akımın 0 değerinden ilk tepe değerine yükselmesi için geçen süre aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$T_f = \frac{1}{w} \sin^{-1} \frac{w}{\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

Yarıdeğer süresi ya da sönümlü darbenin yarı zaman süresi Denklem (3.11) kullanılarak hesaplanabilir [10];

$$T_t = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \quad (3.11)$$

Şekil 3.8'te darbe akımlarının çeşitli sönümlenme dirençleri ($R_1 < R_2 < R_3$) için dalga şekilleri çizilmiştir. 1 ile gösterilen eğri denklem (3.5) göre zayıf sönümlü darbe akımını, 2 numara ile gösterilen eğri denklem (3.5) göre 8/20 µs darbe akımını, 3 numaralı eğri, denklem (3.6)'a göre aperiodik darbe akımını göstermektedir. Denklem (3.8)'e göre $R = 0$ değeri için sönümsüz bir sinüzoidal salınım elde edilmektedir [10].



Şekil 3.8. Denklem (3.5) ve (3.6) ya göre hesaplanmış zayıf sönümlü darbe (1), $8/20 \mu\text{s}$ Darbe (2) ve Aşırı sönümlü darbe (3)

3.2. Dikdörtgen Darbe Akımlarının Üretilmesi

Başlık 2.2.'de dikdörtgen darbe akımının tanımı, parametreleri, kullanıldığı deneyler, darbe şekli, toleransları ve ölçüm belirsizliği sınır değerleri verilmiştir. Bu kısımda dikdörtgen darbe akımlarının üretilmesi konusuna yer verilmiştir. Üreteç için gerekli olan devre yapısı verilmiş, uygun devre elemanlarıyla zaman ve tepe değer parametrelerinin hesabı yapılmıştır.

Uzun süreli dikdörtgen darbe akımları üretmek için gereken jeneratörün temel devresi, Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Dikdörtgen dalgalar genel olarak 0.5 ila 5 ms arasında sürmekte, dalgaların yükselme ve düşme süreleri toplam sürenin $\pm\%10$ 'undan az olması gerekmektedir. (Bknz. Bölüm 2.2.)

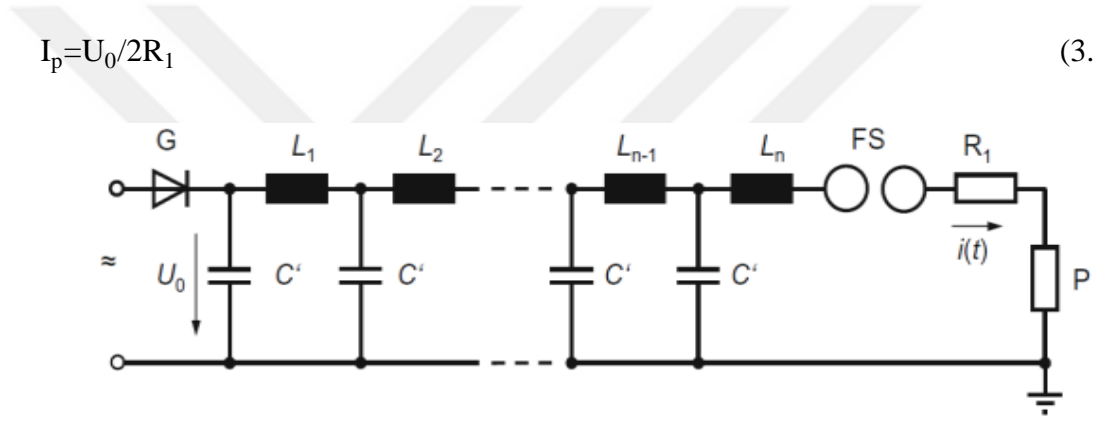
Uzun süreli dikdörtgen darbe akımları üretmek için genel olarak, LC elemanları ile n katlı bir devre oluşturulmaktadır. Birbirine paralel kondansatörler, AC gerilimin doğrultulmasıyla üretilen DC gerilim ile U_0 değeriyle yüklenmektedir. Yüklü kondansatörler, R_1 sonlandırma direnci ve P deney numunesi üzerine, bir atlama küresi (FS) yoluyla boşaltılmaktadır. Atlama küresi havanın delinme geriliminin aşılmasıyla atlama olayını gerçekleştirdiği gibi harici bir tetikleme devresi de atlamayı başlatmak için kullanılabilir. Katlı devre yapısının sonlandırma direncinin değeri genel olarak aşağıdaki eşitlik ile belirlenmektedir [10]:

Denklem (3.12)'de, devrenin kat sayısına bağılı olarak toplam endüktans ve kapasitans ($L = nL_i$ ve $C = nC'$) göz önüne alınmaktadır [10]. Şekil 2.2'de gösterilen dikdörtgen darbe akımının T_d süresi yaklaşık olarak Denklem (3.13)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Buradaki "n", LC yapısının kat sayısını temsil etmektedir. Dikdörtgen darbe akımının tepe değerinin yaklaşık olarak hesaplanması için gerekli eşitlik denklem (3.14)'te verilmektedir.

$$R_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.12)$$

$$T_d = 2 \frac{n-1}{n} \sqrt{LC} \quad (3.13)$$

$$I_p = U_0 / 2R_1 \quad (3.14)$$



Şekil 3.9. Dikdörtgen darbe akım üretici yapısı

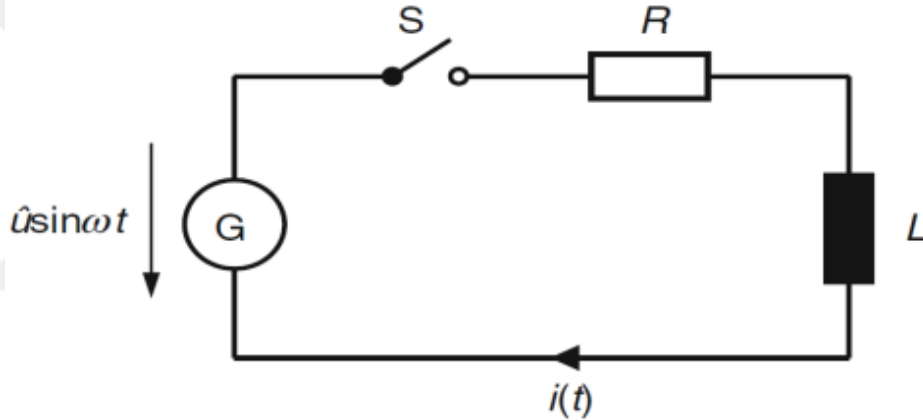
L ve C parametreleri, istenen T_d süresine uygun olarak Denklem (3.12), (3.13) ve (3.14)'e göre elde edilmektedir. Tam bir dikdörtgen darbe akımı şekli için en uygun kat sayısının (n) 8 olduğu sayısal analizler ile belirlenmiştir. Kat sayısı 8 seçildiğinde, darbe akımının başlangıcı ve sonunda salınımların daha az olduğu görülmüştür. Endüktans değeri L_1 ile L_n farklı değerde olabilirken C değeri sabit değerli olarak kalmaktadır [10].

Bu çalışma kapsamında dikdörtgen darbe akımı üretici olarak 2 katlı LC devresi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında Pspice simülasyon programı ile önce devre kurularak istenen T_d süresi belirlenmiştir. T_d süresinin ulaşıldığı L ve C değerleri kaydedilerek devrenin gerçekleştirilmesi esnasında bu değerlerin kullanılması hedeflenmiştir. Simülasyon çalışması ile elde edilen L ve C değerleri, Denklem (3.12), Denklem (3.13), Denklem (3.14) ile hesaplanmış simülasyon sonucunun sağlaması yapılmıştır.

3.3. Kısa Süreli Alternatif Darbe Akımlarının Üretilmesi

Bu başlık altında bahsedilen karakteristikteki, uzun süreli olduklarından darbe akımı olarak nitelendirilemez. Ancak bazı kaynaklarda bunların, darbe akımları olarak tanımlandıkları görülmektedir [10]. Birkaç periyot süren kısa devre akımlarının süresi genel olarak darbe akımı sürelerinin çok üzerindedir.

Güç sistemlerindeki aygıtları test etmek için kısa süreli alternatif akımlar, 100 kA yüksek akım değerine kadar akım üreten yüksek güce sahip üreteçler ile güç deney laboratuvarlarında üretilir. Devre kesicileri sınamak için gereken kısa devre akımı birkaç periyot ile sınırlıdır [10]. Şekil 3.10.'daki basit eşdeğer devre yardımıyla parametreler gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Kısa Süreli alternatif darbe akım üreteci

Deney numunesi ve kısa devre akımının izlediği yolun direnci (R), deney numunesinin ve bağlantı elemanlarının endüktansı (L) ile gösterilmiştir. S anahtarı, $t = t_0$ 'da kapatıldığında, jeneratörün $u(t_0) = \hat{u} \sin \omega t_0$ anlık gerilimi deney numunesine uygulanmaktadır. Önceden belirlenmiş bir süre için $\hat{u} \sin(\omega t + \psi)$ gerilimi, $i(t)$ kısa süreli akımını deney numunesinden geçirmektedir. Şekil 3.10' daki eşdeğer devre şemasına göre, S anahtarı kapatıldıktan sonraki durum için aşağıdaki denklem yazılabilir [10]:

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (3.15)$$

Burada ψ , S'in kapanma sırasındaki anahtarlama açısıdır. Diferansiyel denklemin çözümü kısa süreli AC akımını vermektedir [10]:

$$i(t)=\hat{i}[\sin(\omega t+\psi-\varphi)-\sin(\psi-\varphi)e^{-t/\tau}] \quad (3.16)$$

Genlik değeri \hat{i} , faz açısı φ ve zaman sabiti τ aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [10].

$$\hat{i}=\frac{\hat{u}}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}} \quad (3.17)$$

$$\varphi=\arctan \frac{\omega L}{R} \quad (3.18)$$

$$\tau=\frac{L}{R} \quad (3.19)$$

Denklem (3.16) iki bileşenden oluşmaktadır. Birinci kısım, kısa süreli akımın kararlı durum AC bileşenini göstermektedir ve ikinci kısım, akımın DC bileşeninin üssel azalmasını tarif eder (Şekil 2.4 a). AC bileşeni, Denklem (3.18)'e karşılık gelen faz açısına sahiptir. İkinci kısım, zaman sabiti τ ile üstel olarak azalan bir akımı temsil eder.

Kısa süreli AC akımın şekli, anlık t_s 'ye veya AC geriliminin RL devresine uygulandığı anahtarlama açısı ψ 'ye bağlıdır. Kararlı durumda geçici akımlar, düşük R değerinde elde edilen kısa süreli AC akımının ilk tepe değeri, kararlı durum akımının genliğinin neredeyse iki katına ulaşacak şekilde olabilmektedir (bkz. Şekil 2.4 a). Bu, deney numunesi üzerinde önemli bir yük olduğu anlamına gelir. Anahtarlama, AC gerilimin sıfır eksenini geçişindeyse ve R direnci değeri çok küçükse, kısa süreli AC akımı neredeyse sinüzoidal hal alır (bkz. Şekil 2.4 b).

4. DARBE AKIMLARININ ÖLÇÜLMESİ

Tepe değeri 100 kA seviyesinde olan darbe akımları, yaygın olarak düşük ohmik dirençlerle, manyetik ya da hava nüveli bobinler ile ölçülmektedir. Ölçüm aygıtları genelde akım sensörleri olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak ölçüm direnci uçlarında akım ile orantılı gerilim ölçülürken, ölçüm bobini uçlarında ise akımın zamana göre türeviyle orantılı bir gerilim ölçülmektedir. Akım sensörlerinin çıkış uçlarına bağlanan ölçüm aygıtları, yüksek darbe gerilimlerinin ölçümlerinde kullanılan aygıtlara benzerlik göstermektedir. Ölçümler için manyetik özelliğe sahip nüveli bobinler kullanıldığında, çıkış geriliminin entegrasyonu farklı yollarla sağlanabilmektedir [10].

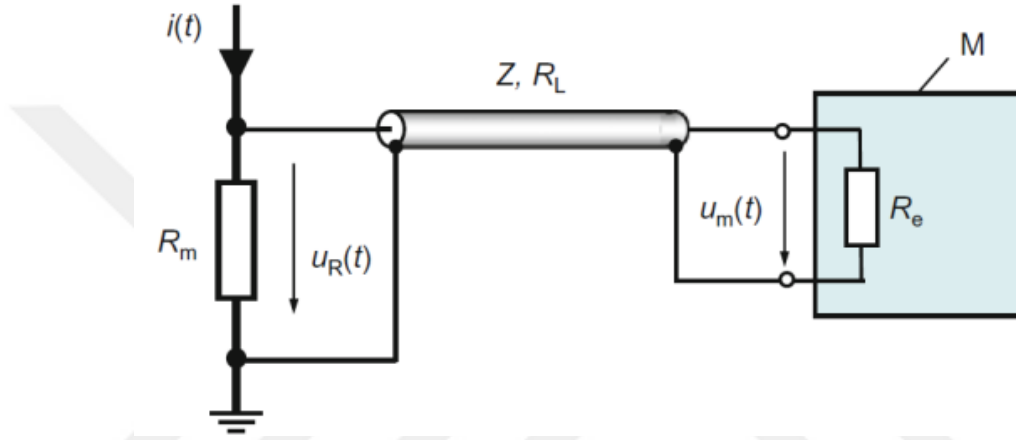
Bir akım sensörünün seçimi belirli ölçütlere göre yapılmaktadır. Elektriksel olarak topraktan yalıtılmış olması, ölçümü yapılacak olan akım karakteristiğine göre davranışı bu ölçütlere örnek olarak verilebilmektedir. Akım ölçüm sistemi, ölçüm sırasında güçlü elektriksel ve manyetik alana maruz kalmaktadır. Bu durum girişim etkisi sonucu oluşan parazit nedeniyle hatalı ölçümlere yol açabilmektedir. Ölçüm sensörü tipine ve devresine bağlı olarak, girişimin etkisini azaltmaya yönelik önlemlerin alınması gerekmektedir [10].

Darbe akımlarının genliklerinin yüksek olması ve tepe değer noktasına kadar hızlı bir şekilde üstel olarak yükselen ve ardından yavaşça sifira düşen karakteristiğinden dolayı darbe akımlarının ölçülmesi oldukça güçleşmektedir. Ölçüm işlemi için günümüzde şönt direnç, özel akım transformatorü, rogowski bobini, hall sensör gibi aygıtlar kullanılmaktadır [12].

Akım ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan manyetik nüveli akım transformatorleri, yüksek genlikli darbe akımlarının ölçülmesi söz konusu olduğunda manyetik nüvelerinin doymaya ulaşması nedeniyle genel olarak doğru ve hassas ölçüm gerçekleştiremezler. Yüksek darbe akımlarının ölçülmesinde, manyetik nüve içermeyen, doğrusal akım-gerilim karakteristiğine sahip, montajı kolay, tasarım maliyeti düşük rogowski bobini biçimindeki akım sensörleri kullanılabilir [12].

4.1. Şönt Direnç

Yüksek darbe akımlarını ölçmek için, yaygın olarak düşük değerli ölçüm dirençleri kullanılmaktadır. Ölçüm direnci (R_m), ölçülecek akım $i(t)$ 'nin akım yoluna uygun bir yere yerleştirilir (Şekil 4.1). Ölçümü yapılacak olan yere yerleştirilen direnç bir ucundan topraklanır. Darbe akımları için ölçüm dirençleri genellikle dört kutuplu (quadropole) olarak yapılır. Endüktif etkisinin ihmal edildiği koşullar altında, R_m ölçüm direncindeki $U_R(t)$ gerilimi $i(t)$ akımıyla orantılıdır (Denklem (4.1)).



Şekil 4.1. Düşük değerli (R_m) direnç ile darbe akım ölçüm devresi

$$U_R(t) = R_m i(t) \quad (4.1)$$

R_m 'nin ölçüm yapılan frekans aralığında tamamen ohmik davranması önemlidir. R_m 'nin direnci genellikle $50 \mu\Omega$ ila $50 m\Omega$ arasında bir değerdedir. Düşük değerli R_m direnci bazı avantajları beraberinde getirmektedir. Düşük değerli R_m direnci, devrenin eşdeğer direncini önemli ölçüde etkilememektedir. Ölçüm direncindeki güç tüketimi düşüktür. Aşırı ısınma ya da gerilim zorlaması dirençte hasara ve direnç değerinde değişime neden olmaz. Ayrıca, akım üretici tarafından üretilen darbenin şekli, düşük değerli dirençten etkilenmemektedir. Son olarak, çok yüksek akımlarda bile, R_m üzerinde oluşan gerilim $2000 V$ 'un altındaki değerlerle sınırlıdır ve uçlarındaki gerilim yüksek gerilim darbesi için özel olarak tasarlanmış ölçüm cihazları ile kaydedilebilmektedir [10].

Diğer yandan dezavantaj olarak birkaç durum sayılabilir. Düşük değerli bir ölçüm direnci için düşük akım genliklerinin ölçümü söz konusu olduğunda U_R çıkış gerilimi

küçük değerlerde olmaktadır. Ölçüm cihazı yüksek bir hassasiyete sahip olmalıdır. İstenmeyen gerilim salınımları ölçüm sonuçları üzerinde bir etkiye sahip olabilmektedir. Düşük değerli direnç ile ölçümlerde frekans tepkisinde gecikme oluşabilmektedir. Düşük akım genlikleri için tasarlanan üreteç devrelerinde ölçüm cihazı yüksek hassasiyete sahip olmalıdır. Şekil 4.2.'de AC ve darbe akım ölçümlerinde kullanılan şönt direnç örnekleri verilmiştir. Sol taraftaki AC akım şöntüne ek olarak, 100 kA'ya kadar olan ve 100 MHz'den daha fazla bant genişliğindeki darbe akımları için Şekil 4.2'da gösterildiği gibi, düşük endüktansa sahip olacak şekilde üretilmiş koaksiyel tip şöntler gösterilmiştir

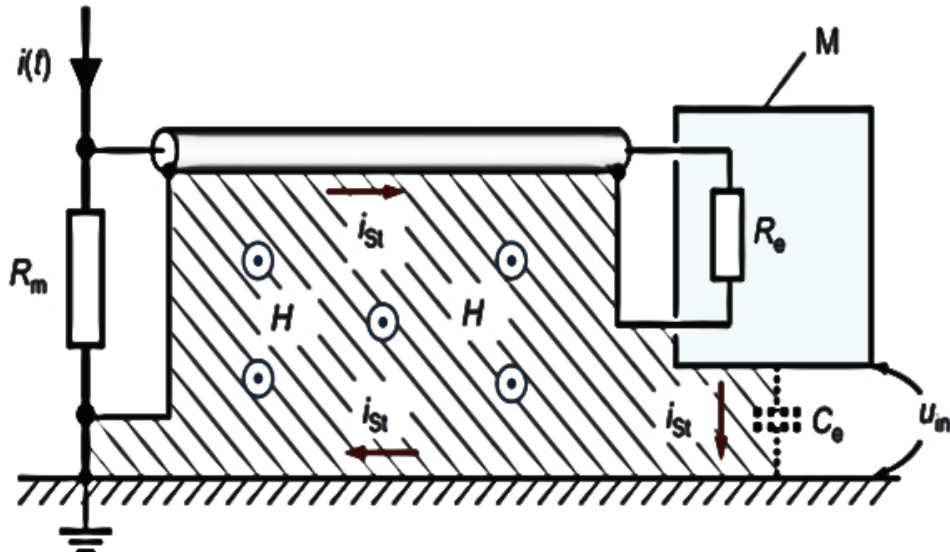


Şekil 4.2. Yüksek akım ölçümleri için farklı ölçüm direnç örnekleri, AC akım ölçümü şöntü (solda), darbe akım şöntleri (sağda 3 örnek) (HILO TEST WSM ve ISM model şönt dirençleri)

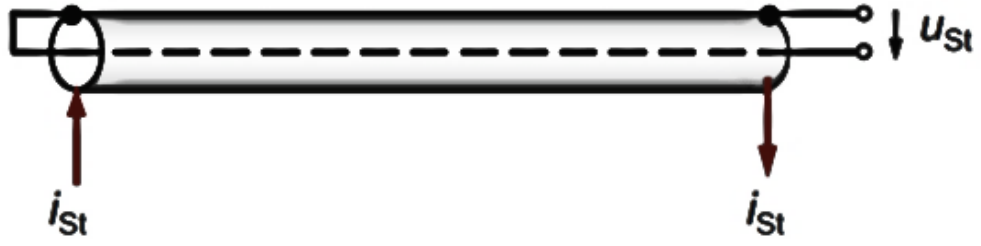
Ölçüm direncindeki $U_R(t)$ darbe gerilimi, koaksiyel bir kablo üzerinden, R_e giriş direnci uçlarından ölçüm cihazından (M'den) ölçülmektedir. Ölçüm devresindeki topraklama döngüsünü önlemek için, ölçüm cihazı (M) koaksiyel kablonun zırhı üzerinden toprağa bağlanmıştır. Ölçüm cihazının doğrudan topraklanması olmasa bile, mahfaza ve izolasyon transformatörünün ortaya çıkan kaçak kapasitansı C_e , yüksek frekanslı sinyaller için kapalı bir devre oluşturmaktadır (Şekil 4.3). Darbe

akımı $i(t)$ tarafından üretilen manyetik alan H , Şekil 4.3'te taranmış gösterilen alana nüfuz eder ve topraklama döngüsünde, girişim akımından (I_{st}) kaynaklanan U_{in} gerilimini endüklemektedir [10].

Girişim akımı I_{st} , kablo zırhında akar ve kuplaj empedansı (Z_k) aracılığıyla zırhın iç yüzeyindeki gerilimi oluşturur (Şekil 4.4). Bir koaksiyel kablonun bağlantı empedansı, $Z_k = U_{st} / I_{st}$ olarak tanımlanmakta, iç ekran iletken ve kablo zırhı bir uçta kısa devre yapılmaktadır. Koaksiyel kablonun elektromanyetik girişimden koruma etkisi, düşük bir bağlantı empedansı (Z_k) ile karakterize edilir [10]. Metalik örgülü bir koaksiyel kablonun bağlantı empedansı başlangıç durumunda; artan frekansla azalır, metalik örgüsünün endüktansı nedeniyle tekrar artar. Elektromanyetik girişim sonucu oluşan gerilim (U_{st}), R_e 'de ölçülen gerilime eklenir. Elektromanyetik girişim sonucu devre toprak devresi içinden geçen akımın büyüklüğü başta R_e olmak üzere devredeki empedanslara bağlıdır. Ölçüm cihazının girişi yüksek-ohmik değerli olması durumunda bu akım ihmal edilebilmektedir [10].



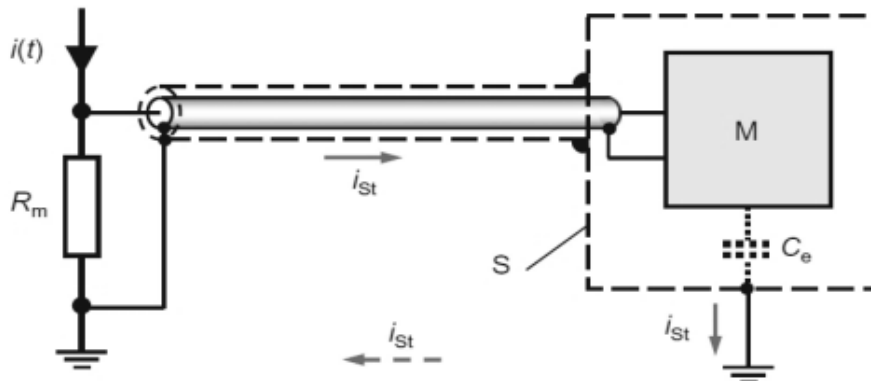
Şekil 4.3. Düşük değerli direnç üzerinden darbe akım ölçüm sisteminde elektromanyetik girişim örneği



Şekil 4.4. Bir koaksiyel kablonun empedansı $Z_K = U_{st}/I_{st}$. I_{st} : Girişim akımı, U_{st} : Üretilen girişim gerilimi

Elektromanyetik girişimlerden kaynaklanan mahfaza akımlarını önlemede koaksiyel kabloyu korumak ve ölçüm cihazını korumalı bir kabine yerleştirmek etkili bir yöntemdir (Şekil 4.5). Kablo dışına geçirilen metalik zırh ve ölçüm aygıtı dışına yerleştirilen metalik mahfazanın (S) her iki ucu da topraklanmalıdır. Dış manyetik alan tarafından oluşturulan girişim akımı, kablo dış zırhı ve ekranlı kabin üzerinden toprağa akmaktadır. Oluşturulan karşıt manyetik alan ile koruma zırhının içi manyetik alansız hale gelmektedir [10].

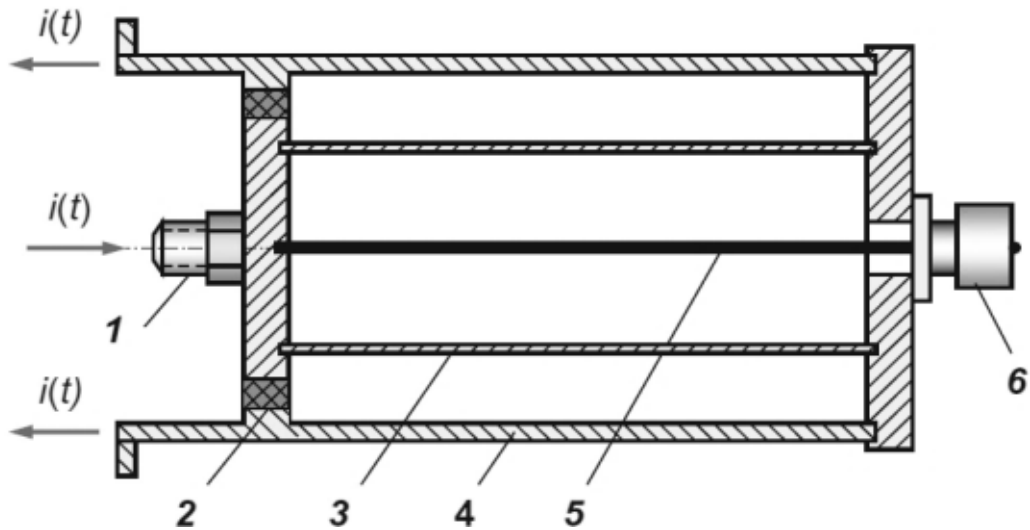
Koaksiyel kabloların ekranlanması farklı yöntemler ile sağlanabilmektedir. Çift ekranlı bir koaksiyel kablo, iki ekran örgüsü kullanılarak oluşturulabilmektedir. Çift örgülü ekranlamanın koruma etkisi yüksek frekanslarda azalmaktadır. Ekran örgüsünün altına ince metal folyo yerleştirerek kullanmak girişim etkisine karşı yüksek frekanslarda daha iyi koruma sağlamaktadır. Ekranlı koaksiyel kablonun elektromanyetik girişime karşı daha iyi koruma sağlaması için kablo; esnek, oluklu, topraklanmış bir boru içinden ya da zeminin altında bulunan topraklı bir kablo kanalı içinden taşınmalıdır [10].



Şekil 4.5. Ölçüm üzerindeki girişim etkisini önlemek için koaksiyel kablonun ve ölçüm cihazının çift ekranla koruması.

Koaksiyel tasarımlı bir ölçüm direnci ile ölçümler manyetik alanın sönümlendiği bir ortamda gerçekleşmektedir. Temel olarak, düşük-değerli ölçüm direnci, metal silindir mahfaza içinde bulunan yüksek frekansta çalışma özelliğine sahip özdeş dirençlerin paralel bağlanması ile oluşmaktadır. Şekil 4.6'da koaksiyel şöntün iç yapısı verilmiştir. Darbe akımı $i(t)$, 1 numara ile gösterilen bağlantı civatasından geçer ve 3 numara ile gösterilen dirençlere eşit şekilde dağıtılır. Dış metal boru (4) geri dönüş iletkeni olarak işlev görmekte, böylece silindir içinde manyetik alan sönümlenmektedir [10]. Dirençler üzerindeki gerilim bağlantısı ve 6 numaralı ölçüm aygıtı ucuna giden 5 numaralı kablo çevresinde manyetik alan sönümlenmiş durumdadır, böylece burada elektromanyetik girişim gerilimi endüklenmemektedir (Şekil 4.6). Akım ile orantılı gerilim, 6 numaralı çıkış ucundan alınır ve bir koaksiyel kablo üzerinden ölçüm aygıtına aktarılır

Dirençlerin paralel bağlı olması toplam endüktansı azaltmakta ve frekans davranışını iyileştirmektedir. Yüksek frekanslı ölçümler yapılmayacak ise sargılı tel dirençler yeterli olmaktadır. Sargılı tel dirençlerin içinden yüksek akım geçse bile sıcaklığı neredeyse sabit kalmaktadır. Film dirençler ve seramik taşıyıcılı smd dirençleri genel olarak daha iyi bir frekans davranışı göstermektedirler. [10].



Şekil 4.6. Darbe akımı ölçümleri için geniş bantlı bir koaksiyel şöntün temel yapısı. 1; Akım giriş ucu, 2; yalıtım halkası, 3; direnç, 4; akım dönüş iletkeni, 5; çıkış terminaline giden ölçüm bağlantısı, 6; koaksiyel çıkış terminali.

4.2. Bobinli Akım Ölçüm Sistemleri

Bobinli akım ölçüm sistemleri, yüksek AC ve darbe akımlarının potansiyel farka gerek duyulmadan ölçümü için uygundur. Manyetik çekirdekli veya hava çekirdekli olmak üzere farklı özelliklere sahip olan ölçüm bobin çeşitleri bulunmaktadır. Bobin, zamana göre akımın türevini alarak çıkış ucunda gerilim oluşturmaktadır. Ölçüm bobini uçlarına bağlanan integral alan devre sonrası çıkış gerilimleri, ölçülen akımla orantılıdır. Bu nedenle manyetik çekirdekli ölçüm bobinleri genellikle bir dahili integral alan devre donanımı ile kullanılır. Ölçüm cihazı, yazılım tabanlı veri değerlendirmesine sahip dijital bir kayıt cihazı olmaktadır [10].

Bir iletkendeki akım (I) ve uzaydaki manyetik akı (Φ), manyetik alanı oluşturur. Ampere yasasına göre, H manyetik alan kuvvetinin çizgisel integrali, I ve Φ ile orantılı olmaktadır [10]:

$$\oint H ds = I \quad (4.2)$$

Düz, sonsuz uzun bir iletken örneği için, etrafındaki alan çizgileri simetri nedeniyle, yarıçapı r olan kapalı alanlar oluşturmaktadır. Manyetik alan şiddeti (H) ifadesi Denklem (4.3)'te verilmiştir [10]:

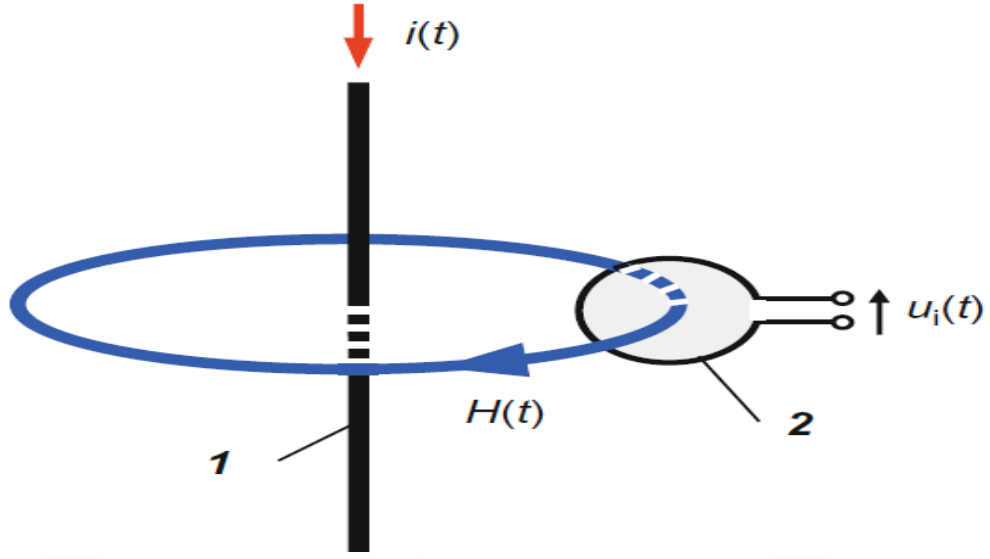
$$H(r) = \frac{I}{2\pi r} \quad (4.3)$$

A alanına sahip bir ölçüm halkası homojen bir manyetik alana dik olarak yerleştirilirse, manyetik akı (Φ) Denklem (4.4)'te verildiği gibi olmaktadır [10]:

$$\Phi = \int B dA = AB = \mu AH \quad (4.4)$$

Burada geçirgenlik ($\mu = \mu_r \mu_0$), boşluğun manyetik geçirgenliği ($\mu_0 = 0,4\pi \times 10^{-6}$ H/m $\approx 1.256 \mu\text{H/m}$) ve geçirgen malzemenin bağıl geçirgenlik (μ_r) katsayısının çarpımı ile hesaplanmaktadır. Çekirdeği hava olan malzemeler için, μ_r değeri yaklaşık olarak 1'dir. Şekil 4.7. göre, 1 numaralı iletken içinde zamanla değişen akım ($i(t)$), iletken çevresinde manyetik alan ($H(t)$) oluşturmaktadır. Manyetik alan sarım uçlarında bir gerilim endüklemektedir [10]:

$$U_i(t) = - \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (4.5)$$



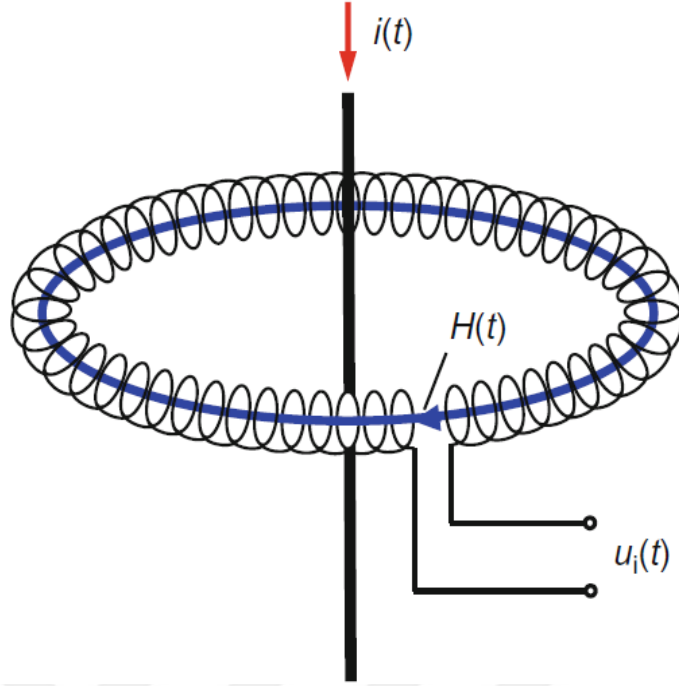
Şekil 4.7. Amper yasasını ve Faraday yasasını açıklayan şematik diyagram. 1; Akım taşıyan iletken, 2; ölçüm sargısı, $H(t)$; $i(t)$ tarafından üretilen manyetik alan, $U_i(t)$; ölçüm sargısı uçlarında endüklenen gerilim

Denklem (4.5)'deki negatiflik, endüklenen gerilimin (U_i) manyetik alanı, orijinal manyetik alanına zıt olan bir akım oluşturduğu anlamına gelmektedir. Akım taşıyan iletkenin etrafına, manyetik alanı dik kesecek şekilde tek bir sarımlı bobin parçası yerleştirilir ise sarım uçlarında Faraday yasasına göre gerilim endüklenmektedir. Bu tek döngüden meydana gelen sargı N katına çıkartılırsa, endüklenen gerilim de N katına çıkmaktadır (Şekil 4.8). Denklem (4.5) ve Denklem (4.6) ile endüklenen gerilim [10]:

$$U_i(t) = N \frac{d\Phi}{dt} = M \frac{di}{dt} \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'da M , ölçüm bobini ve iletken arasındaki ortak (karşılıklı) endüktanstır. Negatif işaret göstergesi dikkate alınmamıştır. Ölçüm bobinleri, pozitif bir çıkış gerilimi elde etmek için iletkendeki akım akış yönünü gösteren bir sembol ile gösterilmiştir. Kesit alanı A ve kapalı alan hattının uzunluğuna eşit ortalama bir bobin çevre uzunluğu l_m olan ideal toroidal bobin Denklem (4.7)'de verilen karşılıklı endüktansa sahiptir [10].

$$M = \frac{\mu N A}{l_m} \quad (4.7)$$



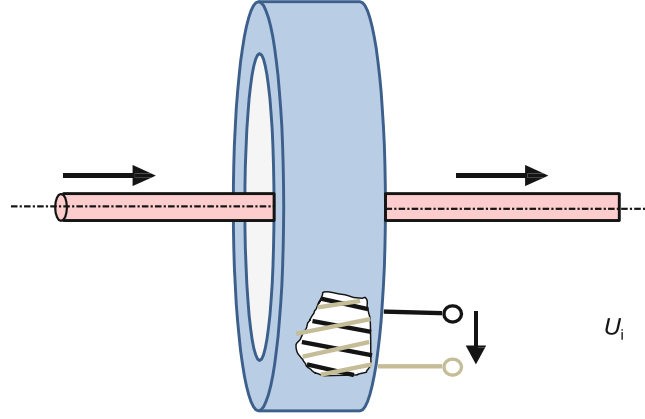
Şekil 4.8. İletken içinden $i(t)$ akımı tarafından üretilen manyetik alan $H(t)$ nedeniyle toroidal bir bobinin çıkışında indüklenen gerilim $U_i(t)$

Denklem (4.6)'ya göre, ölçüm bobininin çıkışında indüklenen gerilim $U_i(t)$, ölçülecek akımın zamanla değişimi ile orantılıdır. Bu nedenle çıkış gerilimi, istenen akımı ($\dot{I}(t)$) elde etmek için zamana göre integrali alınır [10].

$$i(t) = \frac{1}{M} \int_0^{\infty} u_i(t) dt \quad (4.8)$$

Endüksiyon etkisi sadece zaman ile değişen akımların ölçümleri için mevcut olduğundan, DC akımlar ölçüm bobinleriyle ölçülemez. Manyetik çekirdekli özel tip bobinler, ek yardımcı sargılar ve bir elektronik devre kullanılarak, yavaş değişen AC akımların ve DC akımların ölçülmesinde kullanılabilir.

Bir bobin sargısının gerçek yapısında, telin ucu, dış manyetik alanlardan gelen paraziti (elektromanyetik girişimi) azaltmak için bobin boyunca sargının diğer ucuna ters yönde döndürülmektedir. Teli geri döndürmek yerine, ters yönde ikinci bir sargı da sarılarak aynı etki sağlanabilmektedir. Ölçüm bobinini elektrik alanına karşı koruma için ölçüm bobininin etrafı çevresel olarak boydan boya yarıklı bir iletken mahfaza ile kaplanmaktadır. Bu durumda, çevresi boyunca olan yarıklı, ölçülen akımın ürettiği manyetik alanın bobin içine girmesini sağlamaktadır.

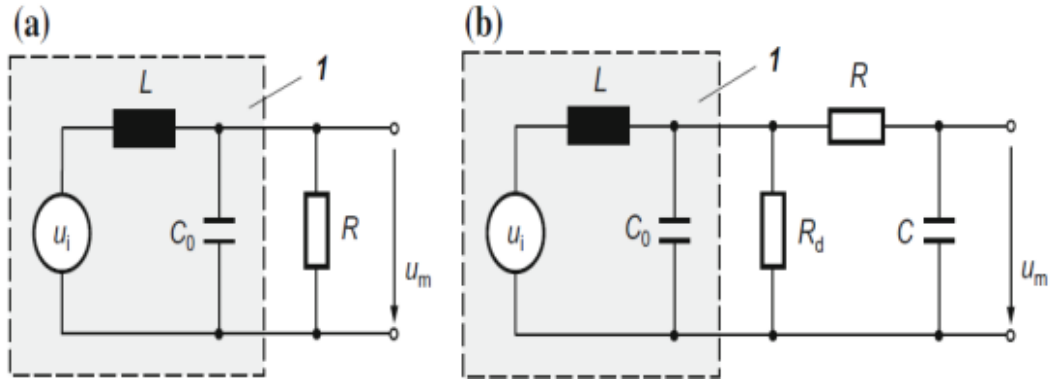


Şekil 4.9. Bobinli ölçüm sistemlerinin iletken etrafına konumlandırılması

Denklem (4.6)'ya göre endüklenen gerilim U_i 'nin integrali genellikle pasif veya aktif integral alan devrelerle, nadiren sayısal entegrasyonla sağlanmaktadır. R ve L elemanından oluşan integral alan devrede pasif entegrasyonun uygulanması kolaydır, çünkü ölçüm bobininin öz endüktansı (L) entegrasyon için kullanılır. Eşdeğer devre şemasında, direnç (R), çıkış geriliminin ölçüldüğü çıkış terminaleri arasına bağlanır (Şekil 4.10 a). RL ile yapılan entegrasyon sonrasında U_m gerilimi akım ile doğru orantılı olur. R, ölçüm bobininde yer almaktadır ve koaksiyel kablunun karakteristik empedansına olmalıdır [10].

Şekil 4.10a'ya göre pasif RL integral alan devre, özellikle manyetik çekirdekli ölçüm bobinlerinde kullanılır. Yüksek bağıl geçirgenlik kat sayısı μ_r , ölçüm bobininde endüklenen U_i geriliminin, düşük frekans aralığında bile yeterince büyük olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, düşük frekanslı sinyalleri ölçmek için uygundur. Bir başka pasif entegrasyon devresinde, bir RC elemanı ölçüm bobininin çıkışına bağlanmakta ve ölçüm akımıyla orantılı gerilim (U_m) kondansatör üzerinden ölçülmektedir (Şekil 4.10b). Direnç R_d , ölçüm bobininin yüksek frekanslı salınımlarını bastırmaktadır.

Manyetik çekirdekli ölçüm bobinleri, esas olarak darbe akımı ölçümleri için aktif entegratör ile çalıştırılmaktadır. Bunun nedeni pasif integral alan devrelerin sadece aşırı yüksek frekanslı akımların ölçümü için tasarlanan özel bobin tipleri için uygun olmasıdır. Aktif entegratörler, genliğe bağlı olarak, 1 Hz frekansın altındaki düşük frekanslı akımların ölçümünü sağlayan kapasitif geri beslemeli kuvvetlendirici yükselteçlerden oluşur.



Şekil 4.10 Pasif entegrasyon devresi ile ölçüm bobininin eşdeğer devrenin şematik gösterimi a) öz endüktans ve R direnci ile entegrasyon, b) harici kapasitans (C) ve direnç (R) ile entegrasyon.

Sayısal entegrasyon yöntemleri nadiren kullanılır; ancak diğer yöntemlere göre avantajlı olduğu durumlar vardır. Denklem (4.6)'ya göre ölçüm bobininin endüklenen çıkış gerilimi $U_i(t)$ bir dijital kayıt cihazı ile ölçülür ve bilgisayar belleğinde saklanır. Analog elektronik entegratör zorunlu olmadığı durumlarda, sayısal entegrasyon daha doğru sonuçlar verebilen düşük maliyetli bir alternatif olarak kullanılabilir. Sayısal entegrasyon için dijital kaydedici ve bilgisayar ayrı ayrı gerekli değildir.

Bu çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştiren akım sensörü bobini için sayısal entegrasyon yerine RC pasif integral alan devre kullanılmıştır. Ölçüm ve kayıt cihazı olarak ise osiloskop kullanılmış olup verilerin depolaması için bir USB bellek kullanılmıştır.

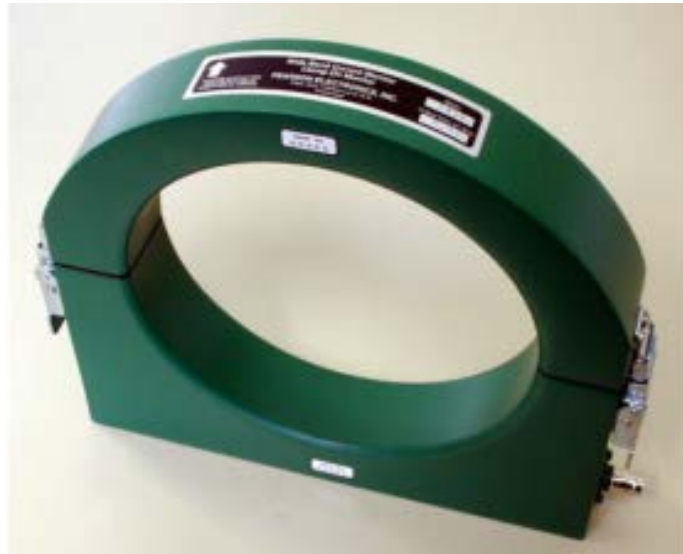
4.2.1. Manyetik nüveli akım transformatörleri

Manyetik malzemenin geçirgenliği, iyi düzeydeki frekans davranışı ve düşük girdap akım kayıplarına sahip manyetik malzemelerin geliştirilmesindeki ilerleme, son yıllarda demir veya ferrit çekirdekli çok geniş bantlı akım ölçüm bobinlerinin üretilmesini mümkün hale getirmiştir. Yüksek geçirgenlikli manyetik çekirdek (nüve) nedeniyle, Denklem (4.6)'ya göre karşılıklı endüktans M ve dolayısıyla endüklenen gerilim $U_i(t)$, hava nüveli Rogowski bobinininkinden çok daha yüksektir. $U_i(t)$ 'nin entegrasyonu için Şekil 4.10 a'ya göre, bağlantı kablosunun karakteristik empedansına karşılık gelen öz endüktans L ve R direnci ve dahili bir LR elemanı ile integral alan devre yapısı sağlanmış olmaktadır. Entegratör doğrudan bobin üzerinde

bulunduğu için, bobin harici bir integral alan devre olmadan çalışıyor gibi görünebilmektedir. Örnek olarak, Şekil 4.11, akım taşıyan bir iletken etrafına kolayca takılabilen sarım ve manyetik çekirdeğe sahip bir ölçüm bobinini göstermektedir (Pearson akım ölçer). Takılan ölçüm aygıtı, devreyi açmak zorunda kalmadan uygun akım ölçümlerinin yapılmasını sağlamaktadır. Dahili RL integral alan devre birimi sayesinde, bobininin çıkış uçlarında ölçülen gerilim iletken içinden geçen akımla orantılıdır.

Yapılış şekline bağlı olarak, manyetik çekirdekli ölçüm bobinleri, darbe akımları için 500 kA'e kadar ölçüm yapabilmektedir. Tepe değerine ek olarak, dikdörtgen akımın süresi için ürüne bir sınır değer belirlenebilmektedir. Tepe değerinin sınır değeri, darbe süresinin artmasına bağlı olarak düşürülmektedir. Güç frekanslı AC akımlarından kaynaklanan maksimum sürekli yük, darbe akımı yükünün yalnızca yüzde biri kadar olmaktadır.

Manyetik çekirdeğin yüksek geçirgenliği sayesinde, 1 Hz'den daha düşük alt sınır frekansları ve 100 MHz'den daha yüksek üst sınır frekansları elde edilebilir. Manyetik çekirdekten kaynaklanan doğrusal olmama, kutbiyet etkisi, artık mıknatıslıktan dolayı remanans gerilim ve DC akımlara bağlı çekirdek doyması gibi bilinen dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar ve ölçüm belirsizliği değeri, kalibrasyon ve eşitleme yoluyla ihmal edilebilmekte veya azaltılabilmektedir.



Şekil 4.11. Manyetik çekirdek ve dahili integral alma devresine sahip kelepçe tipli akım ölçüm bobini (PEARSON ELEKTRONİK INC.)

Ferrit çekirdeğe sahip, uygun şekilde tasarlanmış ölçüm bobinleri ile 1 GHz'in üzerinde frekans bileşenlerini veya 1 ns'den daha düşük değerli yükselme sürelerine sahip darbe akımları ölçülebilmektedir. Manyetik nüveli ölçüm bobinleri, Rogowski bobinleri gibi dış elektrik alanlarına karşı korumalıdır. Manyetik alan ise bobin sargısına, mahfazanın uzunlamasına bir oluktan etki etmektedir. Bobinin sarımları ile dış ekran arasına bağlanan sönümlenme dirençleri, yüksek frekanslı salınımların sönümlenmesini sağlamaktadır.

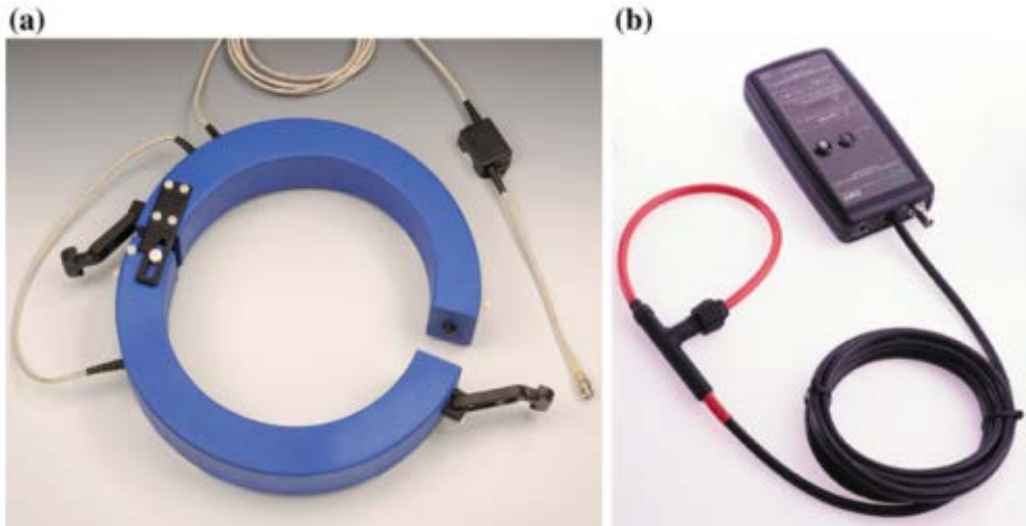
4.2.2. Rogowski akım sensörü

Akım ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan manyetik nüveli akım transformatörleri, yüksek genlikli darbe akımlarının ölçülmesinde manyetik nüvelerinin doyması nedeniyle doğru ve hassas ölçüm gerçekleştiremezler. Yüksek darbe akımlarının ölçülmesinde, manyetik nüve içermeyen, doğrusal akım-gerilim karakteristiğine sahip, montajı kolay, tasarım maliyeti düşük rogowski bobini biçimindeki akım sensörleri kullanılabilir [12].

Rogowski bobini, AC ve darbe akımlarının potansiyel fark oluşturmaksızın ölçümü için kullanılan manyetik çekirdeksiz halkasal bir bobindir. Rogowski bobininin orijinal şeklinde, sarımlar ölçüm için iletken etrafına yerleştirilmiş esnek bir malzeme etrafına sarılmaktadır. Rogowski bobinlerinin sürekli gelişimi, Güç Sistemleri Mühendisliği ve Fizikteki birçok ölçüm uygulamaları için yarar sağlamaktadır. Yapılış şekline bağlı olarak, nanosaniye mertebesinde yükselme süreleri olan darbe akımları veya güç frekanslı yüksek değerli kısa devre akımları ölçülebilmektedir [10]. Tasarım şekillerine göre birbirinden farklı Rogowski bobinleri bulunmaktadır. Esnek olmayan halka şeklindeki Rogowski akım sensörü birbirinden ayrı sargılara sahip açılabilen iki yarıdan oluşan bir tasarıma sahiptir (Şekil 4.12a). Açılır kapanır formda olan Rogowski bobinleri, deney düzeneği kurulumunu değiştirmeden kolayca açılabilir, iletken etrafına yerleştirilebilir ve tekrar kapatılabilirler. Uygulamada çoğunlukla, iletkenin etrafına kelepçeli prob olarak kolayca takılabilen ve uygun şekilde konumlandırılabilen esnek Rogowski bobinleri kullanılmaktadır. Esnek olan bobinin ölçümlerinde tekrarlanabilirlikten gelen belirsizlik yaklaşık % 1'dir. Şekil 4.12b'deki esnek Rogowski bobini, vidalı bir

kelepçe kilitleme mekanizmasına sahiptir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi, daha fazla veri işleme için dijital bir kayıt cihazı ile kaydedilebilmektedir [5-10].

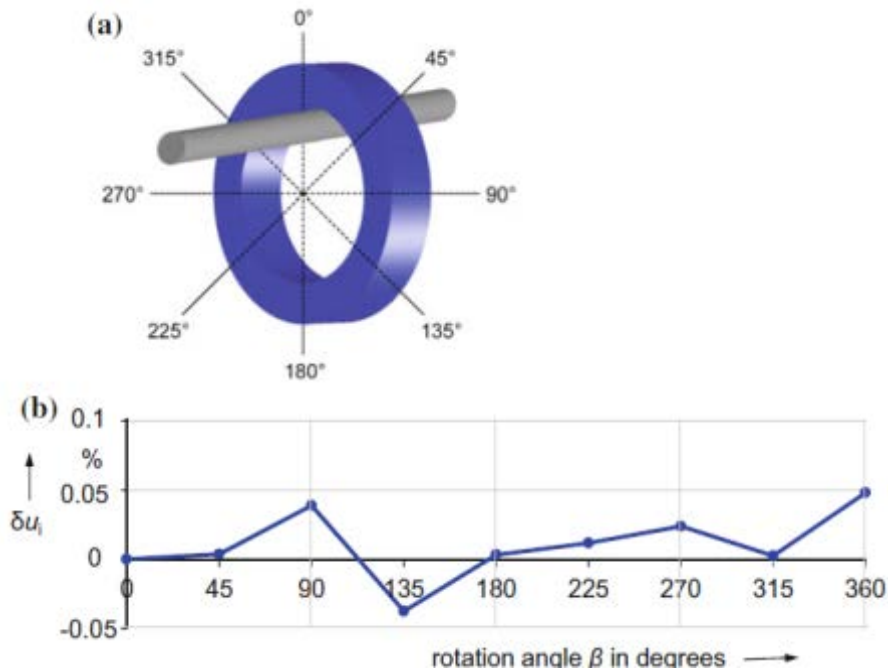
Rogowski bobinleri doğrusallıkları yüksek bir karakteristiğe sahiptir. Ölçülecek akımın manyetik etkileri nedeniyle geçici akım değişikliği di/dt 'nin, üreticisi tarafından beyan edilen üst akım sınırını aşmaması gerekmektedir. Deformasyona uğramaması için ölçülecek akımın seviyesine dikkat edilmelidir. Rogowski bobininin ölçüm hassasiyeti için, sargının düzenliliği ve rijit yapıda olması gerekmektedir. Esnek halkasal bir yalıtkan (manyetik olmayan) üzerine sarılmış olan yüksek hassasiyetli bir Rogowski bobininin, ölçümü yapılacak olan iletkenin konumu veya geri dönüş sargısı konumuna göre bağımlılığı düşüktür. Aynı durum, iki parçalı rijit çekirdek üzerinde sarılan Rogowski bobin için de geçerlidir (Şekil 4.12.a). İletkenin merkezli ve dış merkezli konumlandırması ile endüklenen çıkış geriliminin ölçülen sapmaları $\delta U_i, \pm \%0,1$ sapma içindedir (Şekil 4.13). İki parçalı bobinin (Şekil 4.12.a) darbe akımı ölçümlerinin tekrarlanabilirliği $\%0,1$ 'den daha düşük hesaplanmaktadır. Bunun aksine, esnek Rogowski bobinleri, iletkenin pozisyonuna göre $\%1-2$ arasında daha yüksek bir bağımlılığa sahiptir. Bu nedenle, esnek Rogowski bobinleri ile akım ölçümlerinde akım taşıyan iletkenin merkez konumda olması ölçümün doğruluğu açısından önemlidir.



Şekil 4.12. Ticari olarak kullanılan Rogowski akım sensörü örnek tipleri a) İki parçalı Rogowski bobini (Fotoğraf: PTB), b) Esnek Rogowski akım sensörü ve entegratörü (PEM)

Denklem (4.8)'e göre akım değerini elde etmek için Rogowski bobininin endüklenen çıkış geriliminin integrali alınmaktadır. 1 kHz'den daha yüksek frekanslı akım darbelerini ölçebilmek için Şekil 4.10'da yer alan pasif integral alan devreler kullanılabilir. 1 kHz ve altındaki frekans bileşenlerine sahip yavaşça değişen akım darbelerini ölçebilmek için, Rogowski bobini yükselteç devreli yükselteç bir elektronik integral alan devre ile kullanılmaktadır. Pasif veya aktif integral alan devreleri, akım ölçüm sisteminin bileşenleridir ve Rogowski bobinine ek olarak ölçüm belirsizliğine katkıda bulunmaktadırlar [5-10].

Sayısal entegrasyon yöntemleri, Rogowski bobinleri ile darbe akımı ölçümü için nadiren kullanılmaktadır. Rogowski bobininin çıkış geriliminin ($U_i(t)$) sayısal entegrasyonu genellikle ticari yazılımlarda yaygın olarak uygulanan trapezoidal yaklaşım kullanılarak elde edilmektedir. Yeterli sayıda örnekle, bu hesaplama algoritması, tüm ölçüm sistemi için % 0,1-1 arasında istenen ölçüm belirsizliği kapsamında neredeyse sapmasız olarak kabul edilebilmektedir [10]. Örnek olarak, Şekil 4.14. bir Rogowski bobininin kaydedilmiş çıkış gerilimini ($U_i(t)$) ve sayısal entegrasyon sonucu elde edilen 8/20 μ s darbe akımını ($i(t)$) göstermektedir.



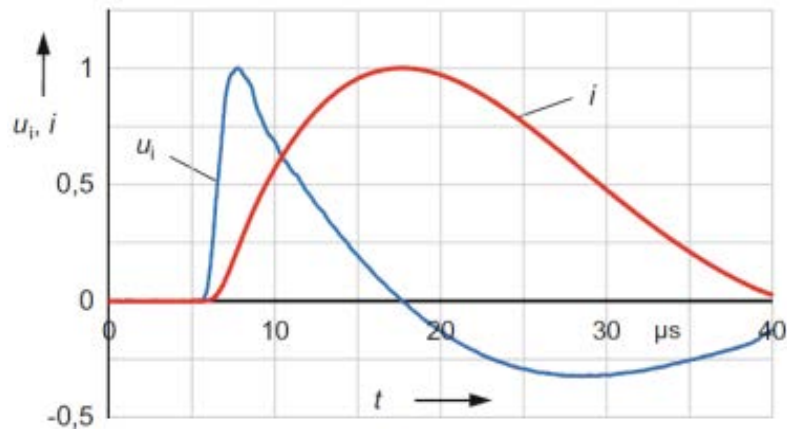
Şekil 4.13. Bir Rogowski bobini ile ölçümde iletkenin konumunun etkisi. a) Ölçüm yapılacak olan iletkenin konum bilgisi veren görsel b) Dönüş açısının bir sonucu olarak endüklenen çıkış gerilimi merkez konuma göre sapması

Sayısal entegrasyon uygulanırken, Rogowski bobininden endüklenen çıkış geriliminin darbe akımının türevi bir sinyali temsil ettiğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu da çıkış geriliminin frekansının darbe akımı frekansından daha yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Dijital kayıt aygıtının örnekleme hızı ve bant genişliği özelliklerinin, endüklenen gerilim frekansına göre seçilmesi daha doğru olacaktır (Şekil 4.15).

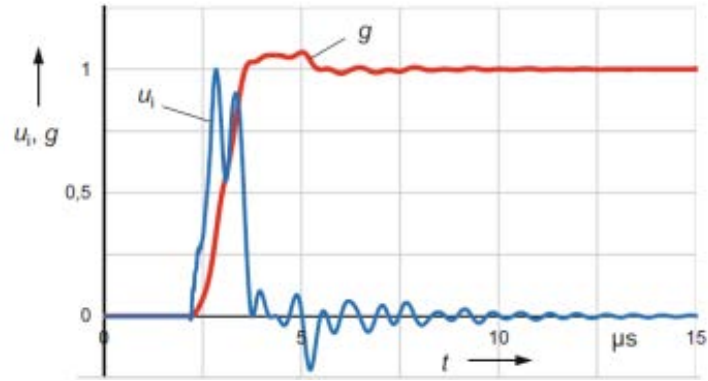
Tasarım aşamasında, bobin çaplarının adım tepkisine etki ettiği görülmüştür. Çapı büyük olan bobinler, küçük çaplı bobinlere göre adım tepkisinde gecikme sağladığı görülmüştür. Daha küçük çapta tasarlanan Rogowski bobinleri nanosaniye aralığında çok daha kısa yükselme süreleri olduğu görülmüştür [10]. Bu çalışmada yer verilen yüksek genliğe sahip darbe ve alternatif akımlarını ölçmek için özel olarak tasarlanan Rogowski bobini, çapı yaklaşık olarak 25 cm olarak ölçülmüştür.

Bir Rogowski bobini ile ölçülebilen maksimum izin verilen akım, izin verilen gerilimin izin verilen U_i limitine göre tarafından belirlenir. Sarımların ve kabloların yalıtımının aşırı zorlanmasını önlemek için, U_i , en fazla 500 V ile sınırlanması gerekmektedir [10].

Darbe akımları için önemli ölçüde daha düşük uç gerilim sınırlar uygulanır. Darbe akımları, cephe süresindeki büyük di/dt değerleri nedeniyle düşük akım genliklerinde yüksek gerilimler endüklemektedirler. di/dt 'nin yaklaşık tepe değeri \hat{i} ve cephe



Şekil 4.14. 8/20 μ s darbe akımı için sayısal entegrasyon uygulama örneği. U_i : Rogowski bobininin endüklenmiş çıkış gerilimi, i : U_i 'nin sayısal entegrasyonu ile elde edilen darbe akımı



Şekil 4.15. Adım yanıtı için sayısal entegrasyon temsili uygulama örneği. U_i : Rogowski bobini uçlarında indüklenmiş çıkış gerilimi, g : U_i 'nin sayısal entegrasyonu ile elde edilen adım yanıtı

süresi T_1 değeri olarak ifade edilirse, izin verilen maksimum tepe değeri \hat{i}_{max} Denklem (4.9)'da tanımlanmıştır.

$$\hat{i}_{max} \approx \frac{T_1}{M} \hat{u}_{imax} \quad (4.9)$$

Burada U_{imax} indüklenen gerilimin belirtilen sınırlandır. Buna göre, $M=1\mu H$ ve $U_{imax}=300\sqrt{2}$ V olan bir Rogowski bobini için, 8/20 darbe akımının tepe değeri $\hat{i}_{max}=3,4$ kA'dan daha yüksek olmamalıdır. Bu nedenle, daha büyük darbe akımlarını ölçmek için Rogowski bobinleri, 1 μH 'den çok daha küçük ortak (karşılıklı) endüktanslarla üretilmektedir [10].

Özel olarak tasarlanan Rogowski bobinleri ile çok kısa süreli geçici akımlar ölçülebilmektedir. Harici elektrik alanlarından, istenmeyen girişimi (paraziti) önlemek için, bobin, manyetik alanın girebileceği bir yarı ile halkasal bir metal kalkanla çevrilir. Ekranlama, Rogowski bobininin bant genişliğini belli ölçüde azaltmaktadır. Nanosaniye mertebesindeki yükselme süreleri için, bobindeki dalga şeklinin gecikme süresi bu yükselme süresine oranla daha fazla olmaktadır. Hızla değişen manyetik alan nedeniyle, her bir bobin sarımında kısmi gerilimler endüklenmektedir, bu da genellikle yaklaşık olarak darbe akımı ile aynı anda meydana gelir [5-9]. Dağıtılmış gerilim veya akım kaynakları eşdeğer devre şemasında gösterilebilmektedirler. Bobin sarımları ve etrafındaki kalkan arasındaki kapasitif kuplaj, enine kapasiteler olarak eş değer devreye dahil edilebilmektedir [10].

Bu çalışma kapsamında, yapılacak olan Rogowski bobini tasarımı daha sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu bölümde de anlatıldığı üzere doyum probleminin olmaması, geniş bir frekans aralığında doğrusal olarak çalışması, referans cihaza göre eşitleme yapılarak kullanılması kolay olmaktadır. Bunlara ek olarak boyutlarının küçük, kullanımının kolay olması nedeniyle yüksek genlikli darbe akımlarının ölçümü için Rogowski akım sensörü tasarımı ve üretimi gerçekleştirilecektir (Bölüm 5-6) [12].

Üretilen Rogowski akım sensörü nüvesi, açılır-kapanır özellikte, esnek PVC (Poli Vinil Clorür) boru olarak seçilmiştir. Sarımlar nüve etrafına tek katmanlı olarak geri dönüş iletkeni de kullanılarak sarılmıştır. Tek katmanlı sarılmasının nedeni yüksek frekanslarda daha iyi performans sağlamasıdır. Hafif ve farklı ölçüm alanlarında kolay kullanım sağlamak için açılır-kapanır yapıda olacak şekilde tasarlanmıştır (Bölüm 5-6) [12].

5. DARBE AKIM ÜRETECİ SETİ TASARIMI VE ÜRETİMİ

Darbe akım üretici seti tasarımı ve üretimi “7180089” numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasına konu olan deney setlerinin ve ölçüm aygıtlarının tasarım, üretim çalışmaları ülke genelinde ilk olarak bu proje kapsamında yapılmıştır. Üretilecek olan deney setlerinin yurt içinde benzeri bulunmamaktadır. Ancak söz konusu deney setlerinin benzerleri İspanya, Çek Cumhuriyeti, Hollanda, Almanya gibi Avrupa ülkelerindeki laboratuvarlarda bulunmaktadır. Tasarım ve üretim çalışmalarının tamamı TÜRKAK tarafınan TSE EN 17025 standardı kapsamında akredite edilmiş ELOPAR A.Ş Yüksek Gerilim Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir.

Bahsedilen darbe akım tipleri (4/10 μ s, 8/20 μ s, 30/80 μ s) için uygun set tasarımlarına ve üretim aşamalarına yer verilmiştir. Öncelikle 4/10 μ s, 8/20 μ s darbe akım tipleri için Şekil 3.1.’deki yapıda bir simülasyon devresi oluşturulmuştur. Darbe süresinin daha uzun olması sebebiyle 30/80 μ s darbe akımı tipi için Şekil 3.9.’daki yapıya uygun simülasyon devresi oluşturulmuştur. 4/10 μ s, 8/20 μ s darbe akım tipleri için ayrı ayrı set üretimi yerine kondansatör set grubunu paralel bağlayarak daha yüksek akım değerlerine ulaşılması hedeflenmiştir.

Her bir deney devresi üretim aşamasından önce simülasyon programında ayrı ayrı kurulmuş, uygun dalga şekli için endüktans değerleri belirlenmiştir. Simülasyon programı olarak Orcad-Pspice programı kullanılmıştır. Simülasyon programında, hesaplamalar ile elde edilen devre eleman değerleri kullanılarak darbe şekli elde edilmeye çalışılmıştır. Sonraki adımda simülasyon çalışması sonucunda elde edilen endüktans değerleri için uygun bobin tasarımları gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak hesaplanan ve simülasyon çalışması ile kesinleşen endüktans değerlerine göre bobinler sarılmış, tüm setler için kaide ara bağlantılar ve ölçüm setleri üretilmeye başlanmıştır

Set üretimi çalışmalarına paralel olarak darbe akım ölçümleri için Rogowski akım sensörü tasarımları yapılmıştır. Proje öncesinde mevcut olarak bulunan darbe akım seti şönt direnci ile karşılaştırmalı ölçümler alınarak Rogowski akım sensörü araştırma ve geliştirme çalışmalarına başlanılmıştır.

Proje öncesinde laboratuvarında mevcut set ile 8/20 μ s yıldırım akım darbesi artık gerilim deneyi yapılabilmekte akım ve gerilimleri ölçülebilmekteydi [3]. Deney, parafudr standardının artık gerilim ölçümleri maddesine uygun olarak yapılmaktaydı.



Şekil 5.1. Yıldırım darbe akımı artık gerilim ölçüm seti (8/20 μ s). 1: Yüksek gerilim besleme trafosu, 2: Doğrultma katı, 3: Kondansatör grubu, 4: Gerilim bölücü, 5: Ara bağlantı, 6: Topraklama şeridi

Deney seti, bir yüksek gerilim transformatörü ile beslenmektedir. Üretilen AC yüksek gerilim, doğrultucu katı ile kondansatör grubunu şarj etmektedir. İstenilen seviyede şarj olan kondansatör seti boşalmasını sağlamak için, pnömomatik bir piston yardımıyla atlama küreleri birbirine yaklaştırılmaktadır. Atlama için uygun delinme

gerilimi seviyesine gelindiği durumda atlama olayı gerçekleştirilmektedir. 8/20 μ s darbe şeklini veren bobin üzerinden deney numunesi parafudra darbe akımı uygulanmaktadır. Parafudr üzerinde kalan artık gerilim gerilim bölücü üzerinden ölçülmektedir. Kontrol odasında osiloskop ile değerler ölçülmektedir (Şekil 5.2.).



Şekil 5.2. Deneylerin kumanda edildiği kontrol odası

Akım darbelerinin ölçümü için laboratuvarında mevcut durumda 10 m Ω değerinde kalibrasyonlu akım şöntü bulunmakta, akım ölçümleri Denklem (4.1)'e uygun olarak yapılabilmektedir (Şekil 5.3.). Akım ölçümleri, şönt direç üzerinden bakır örgülü ekranlı koaksiyel kablo ile osiloskoba ulaştırılmaktadır (Şekil 5.2.). Kalibrasyonlu osiloskop üzerinden gerilim ve zaman ayar göstergeleri aracılığı ile uygulanan akımın tepe değeri, T₁ ve T₂ parametreleri ölçülmektedir. Rogowski akım sensörü tasarımı için Şekil 5.2.'deki set kullanılarak tasarım ve prototip çalışmaları yapılmıştır.

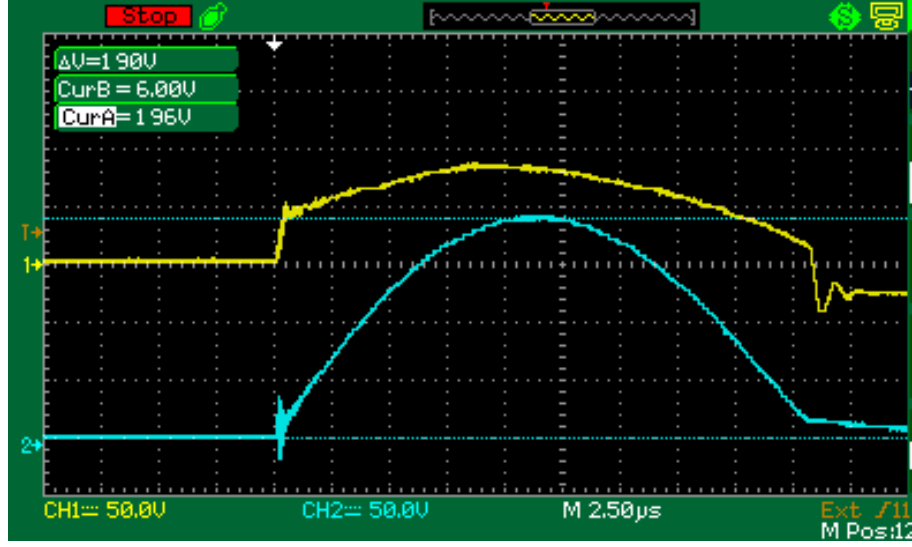
Darbe akımı (8/20 μ s) uygulandığı durumda deney numunesi parafudr uçlarındaki artık gerilim değeri gerilim bölücü üzerinden koaksiyel kablo ile osiloskoba ulaştırılmaktadır. Ölçülen sinyalin çevreden girişim almaması için ekranlı koaksiyel kablo bakır örgülü zırh ile kaplanmıştır. Uygulanan gerilim yaklaşık 1000:1 çevirme

oranına sahip kapasitif gerilim bölücü üzerinden osiloskoptan ölçülmektedir. Çevirme oranı tam 1000:1 olmadığı durumda osiloskop üzerinden ölçülen gerilim, dönüştürme oranıyla çarpılarak uygulanan gerilim hesaplanabilmektedir. Kapasitif gerilim bölücü Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Deney numunesi (Parafudr) ve kalibrasyonlu akım ölçüm şöntü (ELOPAR 36/10 kV/kA, HILOTEST $I_{pmax}=20$ kA)

Deney numunesi olarak firma bünyesinde üretilen “Polimer Mahfazalı Atlama Aralıksız Metal Oksit Parafudr” kullanılmıştır. Parafudr hakkında genel bilgi bölüm 1’de verilmişti. Rogowski akım sensörleri ve üretilecek olan setlerin deneylerinin tamamı parafudr üzerine darbe akımı uygulanarak yapılmıştır. Ölçüm şekilleri bu bölümde incelenmiştir. Örnek bir yıldırım darbe akımı ve artık gerilim osilogramı Şekil 5.4.’te verilmiştir.



Şekil5.4. Örnek osiloskop görüntüsü, Mavi prob: 8/20 μ s biçimli Darbe akımı, Sarı Prob: Artık gerilim ölçümü



Şekil 5.5. Ölçümlerin yapıldığı osiloskoplar (Sol: Atten marka 2 kanallı 200 MHz kalibrasyonlu osiloskop, Sağ: Siglent marka 4 kanallı 300 MHz osiloskop)

Setlerin tasarımı ve üretimi yanında; atlama küresi, bobin ve atlama küresinin kontrolünü sağlayan uzaktan kumandalı step motoru barındıran ölçme sistemi kaidesinin tasarımı ve üretilmesine de bu bölüm içinde yer verilecektir. Eski sette, pnömatik sistem ile çalışan atlama küreleri, yerini yeni sette küre açıklığını

ayarlamak için, akümülatör üzerinden beslenen IR (infra-red) kontrollü adım motoru düzeni kullanılmıştır. Proje kapsamında tasarımı hedeflenen tüm çalışmalar Şekil 5.6.'da verilmiştir.

Proje Hedefleri	
Projenin hedeflenen çıktılarını tanımlayan, en önemli (en fazla 5 adet) somut ve ölçülebilir başarı ölçütlerini (kapasite, fiziksel boyut, çalışma koşulları, hız, çeşitli performans değerleri, vb.) aşağıdaki tabloda belirtiniz.	
Başarı Ölçütü	Hedeflenen Değer
Akım ölçme sensörü tasarım ve üretimi	10 - 100 kA ölçme
Darbe akım üretici tasarım ve üretimi	100 kA
Uzun dalga darbe akımı üretici tasarım ve üretimi	500 A
Ölçme sistemi kaide tasarım ve yapımı	Ölçme sistemi kaidesi
Kapasitif gerilim bölücüler	100 kV alternatif ve 200 kV darbe gerilimi ölçme

Şekil 5.6. TÜBİTAK projesi ile hedeflenen çalışmalar (Görsel 7180089 numaralı TÜBİTAK Projesinden alınmıştır)

5.1. Devre Simülasyonları ve Tasarım Çalışmaları

Tasarım için gerekli devre eleman değerlerinin tesbiti için hesaplamalar yapılmıştır. Öncelikli olarak üreteç devrelerinin en önemli elemanı olan kondansatör değerleri belirlenerek başlanmıştır. Yapılan hesaplama sonucuna göre piyasa araştırması yapılarak maliyet performans açısından en uygun kondansatör tipi belirlenmiş ve sipariş edilmiştir. Kondansatörün kapasite değeri aşağıdaki hesaplama uygun olarak yapılmıştır. Elde edilen kapasite değerine göre kondansatör temin edilmiştir. Hesaplama kondansatörleri en çok zorlayacak deney devresine göre yapılmıştır. Bu değer 100 kA, 4/10 µs darbe tipi olan Yüksek Akım Darbesi'ne göre yapılarak kapasite değeri hesaplanmıştır. Şekil 2.1.'e göre toplam devam etme süresi yaklaşık 10 µs olarak alındığı durumda yarı değeri kare dalgaya yaklaştırılmıştır. Buna göre dalga şekli Şekil 2.1.'den, yaklaşık olarak 100 kA genliğe sahip 5 µs süreli DC akım gibi düşünülerek yük hesabı yapılmıştır (Denklem 5.2). Kondansatör gerilimi 125 kV'a göre hesaplanmıştır.

$$Q = \int_0^{10} i(t) dt \quad (5.1)$$

$$Q \cong I_{max} \times \Delta t = 100 \times 10^3 \times 5 \times 10^{-6} = 0,5 \text{ C} \quad (5.2)$$

$$Q = U \times C \quad C = Q/U \quad (5.3)$$

$$C = 0,5 / (125 \times 10^3) = 0,004 \times 10^{-3} = 4 \mu F \quad (5.4)$$

Toplam eşdeğer kapasite değeri 4 µF olarak hesaplanmıştır. Elde edilen kapasite değerini sağlamak için seri bağlı 1 µF kondansatörler ile 0,5 µF eşdeğer kapasite değeri sağlanmıştır. 8 paralel yapı ile 4 µF eşdeğer sığa değeri elde edilmiştir. Setin, kurulacağı laboratuvar ortamı ve farklı amaçlarla kullanılması gerektiği dikkate alınarak; kaide, iki bölüm halinde ve hareket ettirilebilecek biçimde, malzemeleri temin edilerek firma içinde üretilmiştir.

Kondansatör değerlerini belirleme işlemi tamamlandıktan sonra sırayla her bir set için darbe şeklini belirleyecek olan endüktans değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan değer, simülasyon programında dalga parametrelerini sağladığı doğrulanmıştır. Doğrulama sonucunda istenen endüktans değerlerini sağlayacak olan bobin tasarımlarına başlanmıştır.

5.1.1. 4/10 µs Darbe akımı için bobin tasarımı

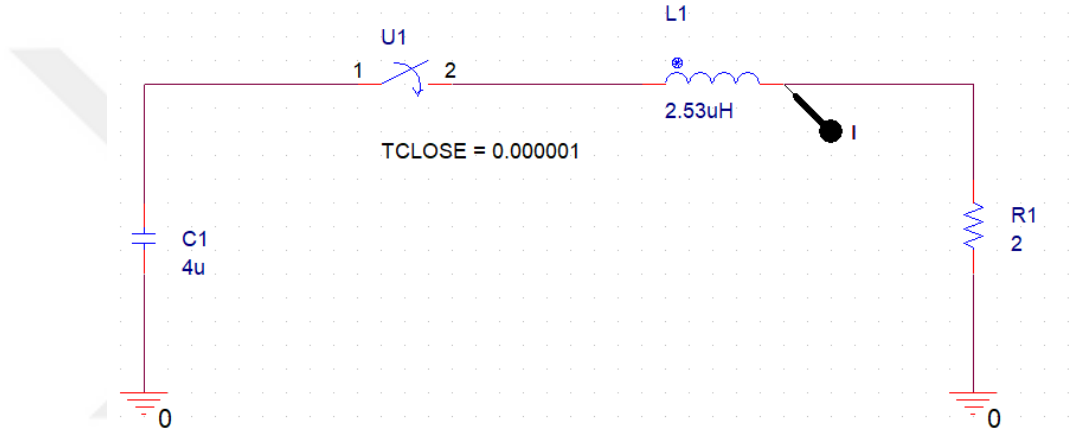
Yüksek akım darbesi (100 kA 4/10 µs) üreticinde kullanılacak olan bobinin tasarımına bu başlık altında yer verilmiştir. Öncelikle değeri denklem (5.4) ile hesaplanmış olan kondansatör değeri için 4/10 µs darbe şeklini oluşturabilmesi için gerekli endüktans değeri hesaplanmıştır. Yüksek akım darbesinin oluşturulması için Şekil (3.3.)’daki iki kondansatör setininin paralel bağlı olarak çalışması (2 ünitenin paralel bağlanması) gerekmektedir. Bu durumda Denklem (5.4) ile hesaplanan 4 µF değeri sağlanmış olur. Endüktans değerinin oluşturulan LC devresinin rezonans frekansı göz önüne alınarak, hesaplama ve simülasyonları yapılmıştır.

Darbe akım periyodu 20 µs olarak alındığında rezonans frekans 50 kHz olmaktadır. Buna göre $C=4\ \mu\text{F}$ ve $f_r=50\ \text{kHz}$ için endüktans (L) değeri rezonans frekans denkleminde hesaplanabilmektedir.

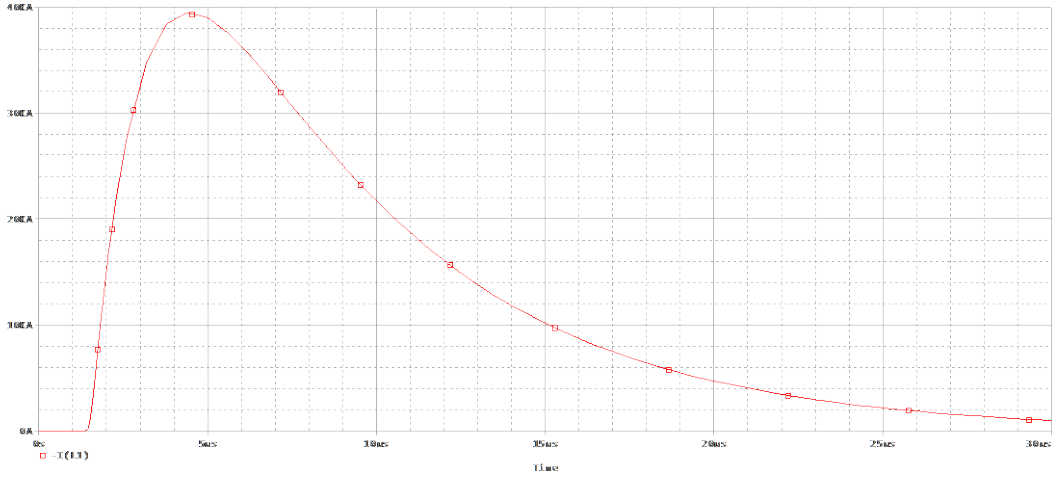
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.5)$$

Denklem (5.5)’e göre L değeri 2,53 µH olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değer, simülasyon programı kullanılarak darbe şeklini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmiştir. Doğrulama işlemi için PSPICE programı kullanılmıştır. İstenen darbe şeklinin sağlanması için L değeri program üzerinden değiştirilerek en uygun 4/10 µs darbe şekli elde edilmiştir.

Simülasyon devresi, Şekil (3.1.) göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Simülasyonda kondansatörün şarjı için AC gerilim ve doğrultucu kullanmak yerine kondansatör başlangıç değeri girilerek devre daha pratik hale getirilmiştir. Kondansatörün başlangıç değeri ($U_{c_{initial}}$) değeri olarak 100 kV girilmiştir. Programda atlama küresi yerine başlangıçtan itibaren 1 μ s gecikmeli çalışan anahtar eklenmiştir. Hesaplanan endüktans değeri eklenmiştir. Programda parafudru modeli olmadığından, parafudru temsil etmek üzere yaklaşık bir R değeri seçilmiştir. Parafudrun değişken dirençli karakteristiği nedeniyle kesin bir direnç değeri belirlemek güçleşmektedir.



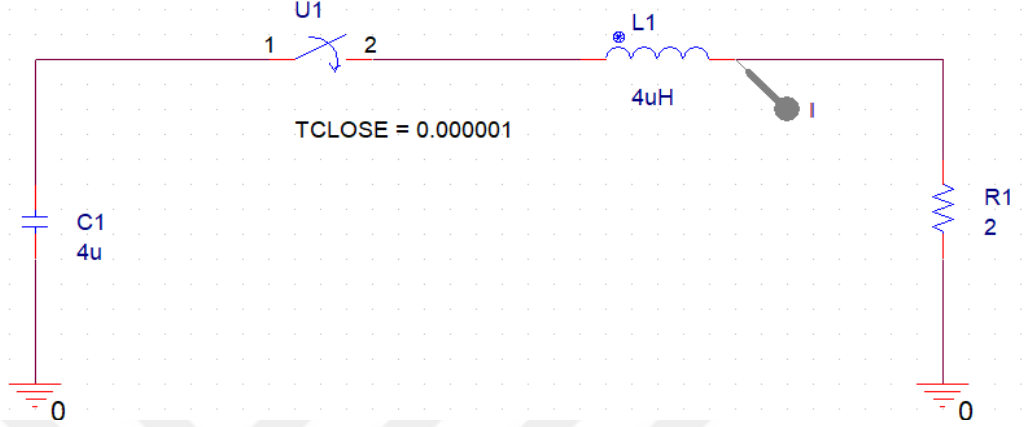
Şekil 5.7. Darbe akım üretici (4/10 μ s) simülasyon devresi ($L=2,53 \mu$ H)



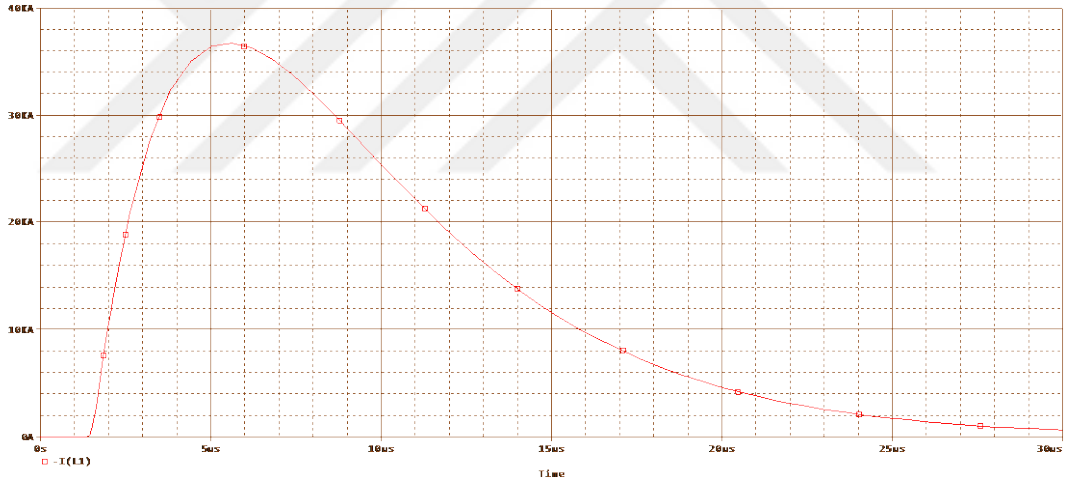
Şekil 5.8. $U_c=100$ kV, $C=4 \mu$ F, $L=2,53 \mu$ H için simülasyon sonucu ($I_p=40$ kA, $T_1/T_2=2,5/9 \mu$ s)

Denklem (5.5) ile hesaplanan değerler için Şekil 5.7.'deki devre simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucu dalga şekli Şekil 5.8.'da verilmiştir.

Elde edilen değerlerin $4/10 \mu\text{s}$ dalga şeklini tam olarak karşılamadığı görülmüştür. Bunun üzerine endüktans (L) parametresi değiştirilerek istenen darbe akım şekli elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun üzerine endüktans değeri $4 \mu\text{H}$ olarak seçilerek tekrar simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.



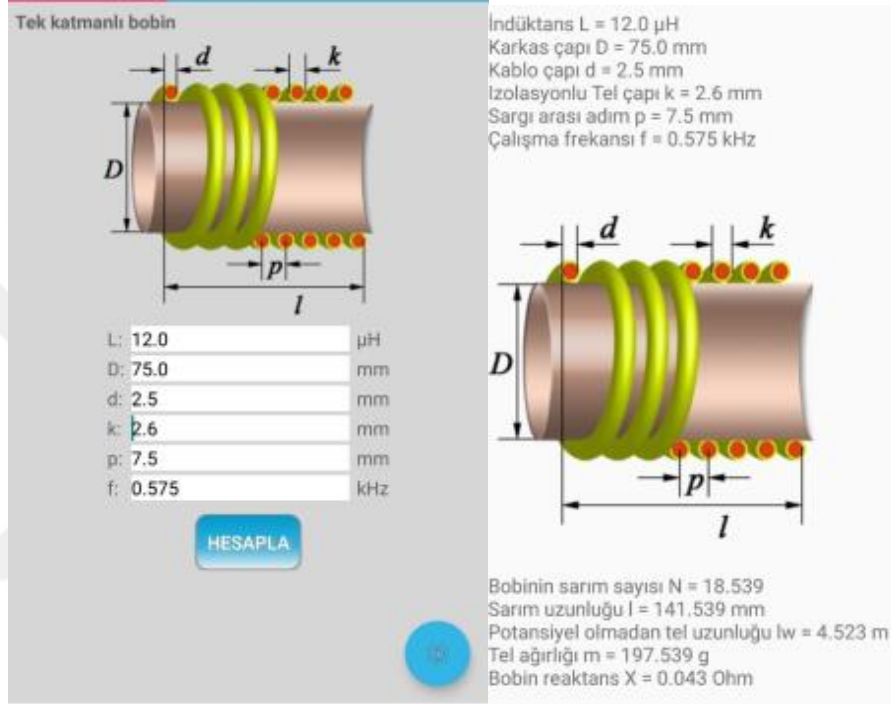
Şekil 5.9. Darbe akım üretici ($4/10 \mu\text{s}$) simülasyon devresi ($L=4 \mu\text{H}$)



Şekil 5.10. $U_c=100 \text{ kV}$, $C=4 \mu\text{F}$, $L=4 \mu\text{H}$ için simülasyon sonucu ($I_p= 37 \text{ kA}$
 $T_1/T_2=3.2/10.5 \mu\text{s}$)

Şekil 5.9.'daki eleman değerlerine göre gerçekleştirilen simülasyonun dalga şekli Şekil 5.10.'da gösterilmiştir. Elde edilen $T_1/T_2=3.2/10.5 \mu\text{s}$ değeri en uygun değer olarak bulunmuştur. Teorik olarak bulunan değerlerin gerçek devre kurulumunda sapmaların olabileceği göz önüne alınarak $L=4 \mu\text{H}$ alınmıştır. Bir sonraki adım, gerçekleşmesine karar verilen endüktans değerine uygun bobin tasarımı ve üretiminin yapılmasıdır. Bobin tasarımı ve üretimi yine firma içindeki mekanik atölyede gerçekleştirilmiştir.

Yüksek akım (100 kA) darbe setinde kullanılacak bobinin endüktans değerinin 4 μH olması gerektiği hesaplanmış ve bu değere göre simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Ancak, deney akımının büyüklüğü dikkate alınarak, söz konusu bobinin, birbirine paralel bağlanacak üç bobin şeklinde üretilmesine karar verilmiştir. Buna göre, her biri 12 μH 'lik endüktans değerine sahip 3 adet bobin oluşturulmuştur. Endüktans değerini elde etmek için gerekli bobin tasarımı program kullanılmıştır.



Şekil 5.11. $L = 12 \mu\text{H}$ bobin tasarımı için kullanılan program çıktısı

Programda elde edilmek istenen endüktans değeri için Şekil 5.11.'de gösterilen, bobinin parametreleri girilmiştir. Program, girilen değerlere göre sarım sayısı, sarım teli uzunluğu, bobinin sarmal yapıdaki uzunluğu gibi bilgileri vermektedir. 5 - 7,5 - 10 - 12,5 mm sarım adımlarında bobinlerin tasarımları yapılmış ve 7,5 mm sarım adımı seçilerek bobinler, $\Phi 75$ mm PVC borular üzerine, $\Phi 2,5$ mm bobin teli kullanılarak sarılmıştır (Tablo 5.1.). Bobin tasarımı ve üretiminin tamamı firma bünyesinde bulunan mekanik atölyede makine ve el ile sarılarak gerçekleştirilmiştir. Sarım değerlerinin değişmemesi için sargı aralarındaki mesafeleri muhafaza etmek amacıyla bobin dışına makaron geçirilmiştir. Deney setine tutturabilmek için yine atölye çalışması ile sıvama alüminyum kapak ve cıvata montajı yapılmıştır. Elde edilen bobin Şekil 5.12.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.1. 4/10 μ s Darbe şekli için endüktans tasarım parametreleri

4/10 Akım Darbesi				
3 paralel bobin (Leş=4 uH)				
Endüktans L (uH)	12			
Bobin çapı D (mm)	75			
İletken çapı d (mm)	2,5			
Kılıflı iletken çapı k (mm)	2,6			
İki iletken merkezi arası (sarım adımı) p (mm)	5	7,5	10	12,5
Sarım sayısı N	15	18	21	23
Bobin toplam uzunluk l (mm)	78	140	213	284

Tablo 5.1.'de farklı adım sayılarında hesaplama yapılmasının nedeni sarım adımı değıştikçe bobin boyutunun değışmesidir. Bobin boyu ölçüm kaidesi boyutlarına uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. Sarım adımının 7,5 mm ve toplam bobin uzunluğunun 14 cm olmasına karar verilmiştir.



Şekil 5.12. 4/10 μ s'lik darbe akımı için üretilen bobinler (her biri $\sim 12 \mu$ H).

Bobinlerin üretimleri gerçekleştirildikten endüktansları LCR metre ile ölçülmüş, her birinin 12 μ H olduğunun doğrulaması yapılmıştır. Bunun üzerine diğer akım dalga biçimleri için bobin tasarımına geçilmiştir.

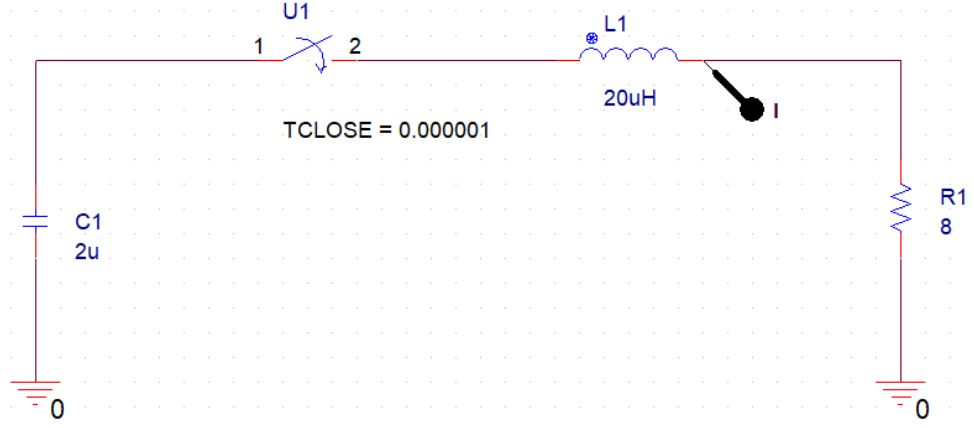
5.1.2. 8/20 µs Darbe akımı için bobin tasarımı

Yıldırım Akım Darbesi (8/20 µs) üreticinde kullanılmak üzere gerekli bobin tasarımına yer verilmiştir. Öncelikle değeri denklem (5.4) ile hesaplanmış olan kondansatör değeri için 8/20 µs darbe şeklini oluşturabilmesi için gerekli endüktans değeri hesaplanmıştır. Yıldırım akım darbesinin oluşturulması için Şekil (3.3.)'daki iki kondansatör setininin sadece birinin çalışması (tek ünite) gerekmektedir. Bu durumda Denklem (5.4) ile hesaplanan değer 2 µF elde edilmiş olacaktır. Endüktans değeri, oluşturulan LC devresinin rezonans frekansı göz önüne alınarak, hesaplama ve simülasyonları yapılmıştır.

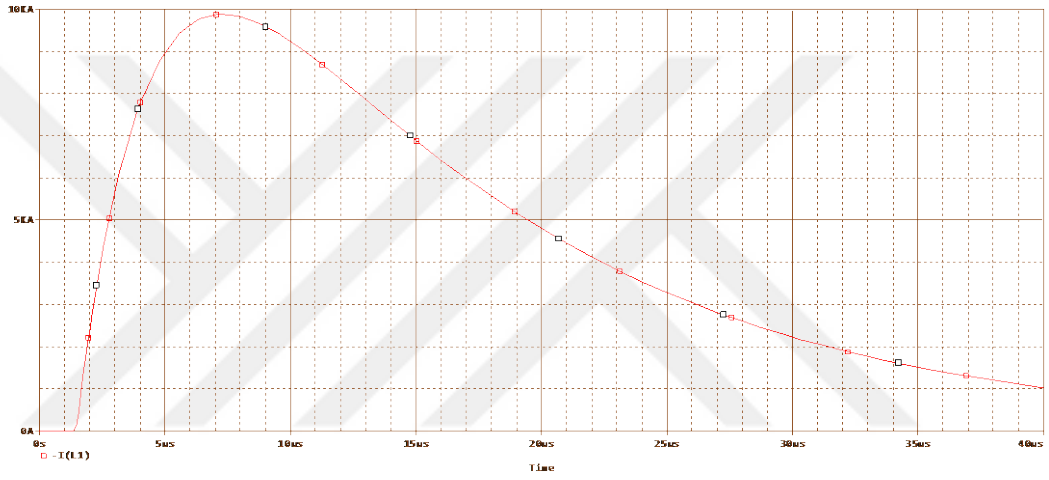
Darbe akım periyodu 40 µs olarak alındığında rezonans frekans 25 kHz olmaktadır. Buna göre $C= 2 \mu\text{F}$ ve $f_r=25 \text{ kHz}$ için endüktans (L) değeri rezonans frekansı denkleminde hesaplanabilmektedir. Bu durumda Denklem (5.5)'e göre endüktans (L) değeri 20,3 µH olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değer simülasyon programı kullanılarak darbe şeklini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmiştir. Doğrulama işlemi için Pspice programı kullanılmıştır. İstenen darbe şeklinin karşılanmaması durumunda L değeri program üzerinden değiştirilerek en uygun 8/20 µs darbe şekli elde edilmiştir.

Simülasyon devresi, Şekil (3.1.) göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Simülasyonda kondansatörün şarjı için AC gerilim ve doğrultucu kullanmak yerine kondansatör başlangıç değeri girilerek devre daha pratik hale getirilmiştir. Kondansatörün başlangıç değeri ($U_{c\text{initial}}$) değeri olarak 100 kV girilmiştir. Programda atlama küresi yerine başlangıçtan 1 µs gecikmeli anahtar eklenmiştir. Hesaplanan endüktans değeri hesaplanan hali ile eklenmiştir. Programda parafudr modeli olmadığından dolayı R değeri yaklaşık bir değer girilmiştir. Parafudrun değişken dirençli karakteristiği nedeniyle kesin bir direnç değeri belirlemek güçleşmektedir.

Parafudrun anma boşalma akımındaki (10 kA) artık gerilim değeri yaklaşık olarak 80 kV seviyelerinde ölçülmektedir. Dolayısıyla anma boşalma akımındaki direnç değeri 8Ω olarak kabaca belirlenmiştir. Simülasyon programında da bu değer 8Ω olarak girilmiştir.



Şekil 5.13. Darbe akım üretici (8/20 µs) simülasyon devresi (L=20 µH)

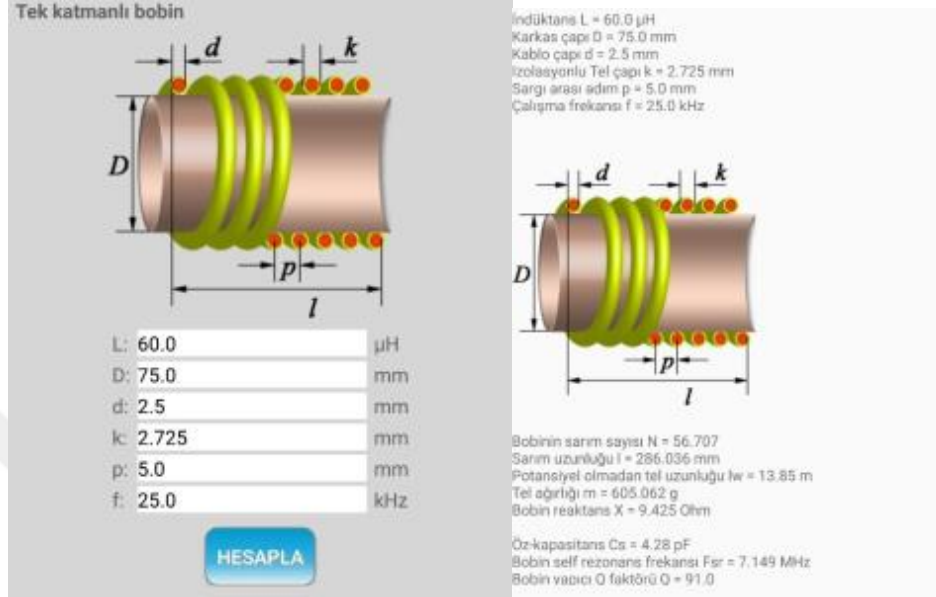


Şekil 5.14. $U_c=100$ kV, $C=2$ µF, $L=20$ µH, için simülasyon sonucu ($I_p= 10$ kA, $T_1/T_2=7,2/19$ µs)

Şekil 5.13.'daki eleman değerlerine göre gerçekleştirilen simülasyonun dalga şekli Şekil 5.14.'deki gibidir. Elde edilen $T_1/T_2= 7,2/19$ µs değeri en uygun değer olarak bulunmuştur. Teorik olarak bulunan değerlerin gerçek devre kurulumunda sapmaların olabileceği göz önüne alınarak $L=20$ µH olarak seçilmiştir. Bir sonraki adım, gerçekleşmesine karar verilen endüktans değerine uygun bobin tasarımı ve üretimi yapılmasıdır. Bobin tasarımı ve üretimi yine firma içinde ki mekanik atölyede gerçekleştirilecektir.

Yıldırım akım (8/20 µs) darbe setinde kullanılacak bobinin endüktans değerinin 20 µH olması gerektiği hesaplanmış ve bu değere göre simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Ancak, deney akımının büyüklüğü dikkate alınarak, söz konusu bobinin, birbirine paralel bağlanacak üç bobin şeklinde üretilmesine karar verilmiştir.

Buna göre, her biri 60 μH 'lik endüktans değerine sahip 3 adet bobin oluşturulmuştur (Şekil 5.16.). Endüktans değerini elde etmek için gerekli bobin tasarımı program kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.15. L= 60 μH bobin tasarımı için kullanılan program çıktısı

Bobin tasarımı için 60 μH endüktans değeri için 5 - 6 - 7,5 mm sarım adımına göre hesaplanmıştır. $\Phi 75$ mm PVC borular üzerine, $\Phi 2,5$ mm bobin teli kullanılarak 5mm sarım adımı dikkate alınarak sarılmıştır (Tablo 5.2.). Bobinler LCR metre ile ölçüldü ve 65 μH yakın değerde olduğu görülmüştür (Şekil 5.16.).

Tablo 5.2. 8/20 μs Darbe şekli için endüktans tasarım parametreleri

	8/20 Akım Darbesi					
	3'lü bobin			2'lü bobin		
Endüktans L (uH)	60			40		
Bobin çapı D (mm)	75			75		
İletken çapı d (mm)	2,5			2,5		
Kıvrıklı iletken çapı k (mm)	2,6			2,6		
İki iletken merkezi arası (sarım adımı) p (mm)	5	6	7,5	5	6	7,5
Sarım sayısı N	58	66	78	40	45	53
Bobin toplam uzunluk l (mm)	290	401	587	202	275	400



Şekil 5.16. 8/20 μ s'lik darbe akımı için üretilen bobinler (her biri $\sim 60 \mu$ H)

Sarım değerlerinin değişmemesi için sargı aralarındaki mesafeleri muhafaza etmek amacıyla bobin dışına makaron geçirilmiştir. Deney setine tutturabilmek için yine atölye çalışması ile sıvama alüminyum kapak ve cıvata montajı yapılmıştır. Elde edilen bobinler Şekil 5.16.'de gösterilmiştir.

5.1.3. 30/80 μ s Darbe akımı için bobin tasarımı

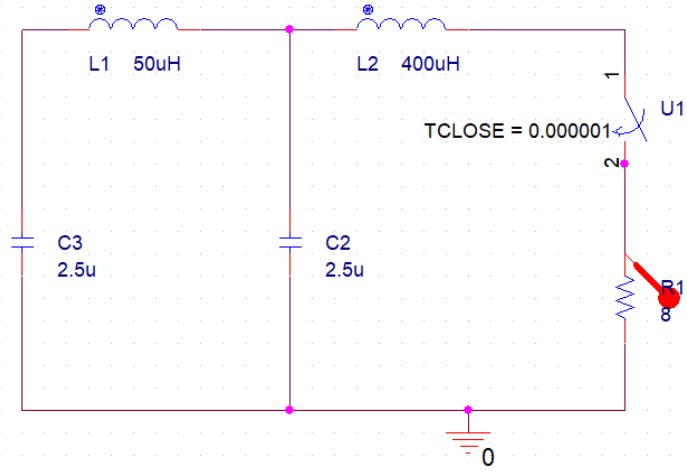
Uzun dalga ($\sim 30/80 \mu$ s - 500 A) akım darbe seti için firmamızda mevcut olan yüksek gerilim kondansatörleri kullanılarak, gerekli olan endüktans değerlerinin belirlenmesine yönelik simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla 2'den 12'ye kadar farklı ünite sayılarına sahip devrelerin simülasyonları, farklı eleman değerleri için yinelenmiştir. Bu amaçla çok sayıda, farklı endüktans değerlerine sahip bobinler ve farklı yükler altında elde edilen darbe akımlarına ilişkin parametreler incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, elde edilebilecek darbe akımı süresinin, kullanılacak ünite sayısına bağlı olarak uzadığını göstermiştir. Buna göre, amaçlanan darbe şeklini elde edebilmek için iki katlı LC devresinin kullanılmasının yeterli olacağı kanaatine varılmıştır (Şekil 5.17).

Darbe akım periyodu 200 μ s olarak alındığında rezonans frekans 5 kHz olmaktadır. Buna göre $C=2\ \mu$ F ve $f_r=5$ kHz bilindiği durumda endüktans (L) değeri rezonans frekans denkleminde hesaplanabilmektedir. Bu durumda Denklem (5.5)'e göre endüktans (L) değeri 400 μ H olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değer simülasyon programı kullanılarak darbe şeklini karşılayıp karşılamadığı kontrol edilmiştir. Doğrulama işlemi için Pspice programı kullanılmıştır. İstenen darbe şeklinin karşılanmaması durumunda L değeri program üzerinden değiştirilerek en uygun 30/80 μ s darbe şekli elde edilmiştir.

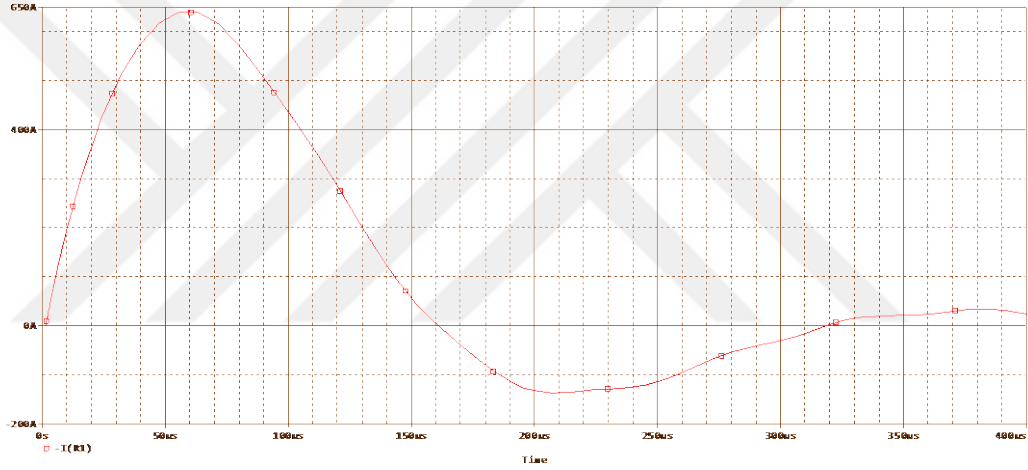
Bu devrede kullanılacak bobin endüktans değerlerinin, $L_1=50\ \mu$ H ve $L_2=400\ \mu$ H seçilmesinin uygun olduğu görülmüştür (Tablo 5.3.). Söz konusu iki katlı LC devresine ilişkin simülasyon sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.18.'de gösterilmiştir.

Tablo 5.3. Yaklaşık olarak 30/80 μ s darbe şeklini elde etmek için yapılan simülasyon çalışmaları

Uc başlangıç (Initial) değeri 1000 V $C1=C2=2,5\ \mu$ F $R=80\ \Omega$	Cephe Süresi $T_{AB}(\mu$ s) %30 - %90	Cephe Süresi $T_{AB}/0,8$ μ s	Yarı değer süresi (T_2)(μ s)	Sıfıra düşme süresi (T_0)(μ s)	Akım (A)
L1=200 μ H L2=200 μ H	15	18,75	110	130	65
L1=100 μ H L2=200 μ H	17	21,25	90	130	70
L1=50 μ H L2=200 μ H	15	18,75	85	130	75
L1=20 μ H L2=200 μ H	15	18,75	82	130	77
L1=10 μ H L2=200 μ H	15	18,75	81	130	78
L1=300 μ H L2=300 μ H	25	31,25	132	155	60
L1=150 μ H L2=300 μ H	23	28,75	110	140	63
L1=100 μ H L2=300 μ H	25	31,25	105	155	65
L1=50 μ H L2=300 μ H	25	31,25	100	140	68
L1=400 μ H L2=400 μ H	28	35	140	180	55
L1=200 μ H L2=400 μ H	30	37,5	125	160	58
L1=100 μ H L2=400 μ H	30	37,5	115	160	63
L1=50 μ H L2=400 μ H	30	37,5	115	160	65
L1=20 μ H L2=400 μ H	30	37,5	115	160	65
L1=500 μ H L2=500 μ H	26	32,5	175	195	50
L1=100 μ H L2=500 μ H	40	50	125	175	59
L1=50 μ H L2=500 μ H	38	47,5	125	175	60
L1=50 μ H L2=500 μ H R=3 Ω	40	50	130	162	80
L1=800 μ H L2=800 μ H	34	42,5	205	240	43
L1=400 μ H L2=800 μ H	42	52,5	180	220	47
L1=50 μ H L2=800 μ H	52	65	155	200	55
L1=10 μ H L2=800 μ H	52	65	155	160	55



Şekil 5.17. 30/80 μ s darbe şeklini elde etmek için kurulan simülasyon devresi



Şekil 5.18. $U_c=10$ kV, $C=2,5\mu$ F, $L_1=50\mu$ H, $L_2=400\mu$ H, için simülasyon sonucu ($I_p= 640$ A $T_1/T_2=45/105$ μ s)

Yapılan simülasyon sonucunda elde edilen zaman ve tepe değeri parametreleri istenen sonuçlara yakın olduğu görülmüştür. Tablo 5.4.'e göre bobinler sarılmıştır.

Tablo 5.4. 30/80 μ s Darbe şekli için endüktans tasarım parametreleri

	30/80 Akım darbesi					
	50 uH			400 uH		
Endüktans L (uH)	50			400		
Bobin çapı D (mm)	500			500		
İletken çapı d (mm)	2,5			2,5		
Kılıflı iletken çapı k (mm)	2,6			2,6		
İki iletken merkezi arası (sarım adımı) p (mm)	5	7,5	10	5	7,5	10
Sarım sayısı N	6,5-7,0	7	7-7,5	23	25,5	28
Bobin toplam uzunluk l (mm)	36	55	75	118	193	285



Şekil 5.19. 30/80 μ s darbe akımı için üretilen bobinler (Sol: $L_1=50 \mu$ H Sağ: $L_1=400\mu$ H)

Endüktans değerleri belirlenen bobinleri üretmek üzere $\Phi 500$ mm epoksi (CTP) borular ve $\Phi 2,5$ mm bobin teli kullanılmıştır. Birinci bobin (L_1) 7 sarımlı, ikinci bobin (L_2) ise 26 sarımlı yapılmıştır. Sarımlar el ile yerde yuvarlama yöntemiyle sarılmıştır. Üretilen bobinlerin endüktansları LCR metre ile ölçülmüş ve değerlerinin, $L_1 \approx 45 \mu$ H ve $L_2 \approx 460 \mu$ H olduğu görülmüştür. Elde edilen bobinler Şekil 5.19.'da gösterilmiştir.

5.2. Setlerin Laboratuvar Ortamında Üretilmesi

Üreteçlerin eleman değerlerinin hesapları, simülasyonları ve tasarımları yukarıda verilmiştir. Tasarımları gerçekleştiren elemanları bir araya getirerek setler kullanılabilir durumda olacaktır. Sırasıyla 4/10, 8/20 ve 30/80 μ s setlerinin montajları yapılmış deney yapılabilir duruma getirilesinden bahsedilmiştir. Setlerden elde edilen ölçüm değerlerine bir sonraki bölümde yer verilmiştir.

Daha önceden de bahsedildiği üzere 4/10 μ s ve 8/20 μ s akım darbe setleri için kondansatör setinin iki bölüm halinde montajı yapılmıştır. Deney seti, konsantörlerin boyut ve ağırlıkları, dikkate alınarak, hareket ettirilebilecek biçimde firma içinde yapılmıştır. Bu yapı, kondansatör gruplarının farklı amaçlarla kullanılabilmesi olanak

sağlayacaktır. Metal kaidenin, korozif etkilere karşı korumak amacıyla galvaniz kaplaması yaptırılmıştır. Tek bölüm halinde kullanıldığı durum için tasarım gereği 8/20 μ s akım darbesi, iki bölüm birlikte kullanıldığı durumda 4/10 μ s akım darbesi üretilecektir. Şekil 5.20.'de üretilen kondansatör seti gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Üretilen kondansatör seti önden ve yandan görünümü

Her iki deney setinde kullanılmak üzere, ölçme sistemi ve buna ilişkin taşıyıcı düzenin tasarımı ve üretimi firma içinde yapılmıştır. Sistemin tasarımı, setlerde yer alan bobinler, anahtarlama küreleri ve bu kürelerin, yüksek gerilim altında istenen açıklığa ayarlanmasına olanak sağlayan hareket sistemi dikey ekseninde yer alacak biçimde tasarlanmıştır. Yapının farklı deney setlerinde kullanılabilmesine olanak sağlamak üzere, bobinlerin, kolayca sökülüp takılmasına olanak veren bir yapı oluşturulmuştur. Küre açıklığını ayarlamak için, akümülatör üzerinden beslenen, IR (infra-red) kontrollü adım motoru düzeni kullanılmıştır. Tasarlanıp üretilen ölçme ve ayar sistemine ait fotoğraf, Şekil 5.21.'de gösterilmiştir. Şekil 5.21.'de ölçüm kaidesi bölümleri;

- 1: Darbe şekline göre tasarımılanan bobinlerin takıldığı bölüm,
- 2: Atlama kürelerinin bulunduğu bölüm,
- 3: Uzaktan kontrollü step motor bölümü,
- 4: ölçüm kaidesini taşıyan, farklı setler ile kullanılma fırsatı veren hareketli zemin.



Şekil 5.21. Ölçme, ayar sistemi ve kaidesi

Sistemde kullanılan katlar arası alüminyum ayırıcıların işlenmesi ve taşıyıcı izolatörlerin üretimi, firmamız atölyesinde yapılmıştır. Kaide, laboratuvar içinde kolaylıkla hareket ettirilebilmesi için, döner tekerlekli alüminyum taban üzerine oturtulmuştur.



Şekil 5.22. 4/10 μ s ve 8/20 μ s darbe akımı seti olarak kullanılabilcek üreteç seti

Hesaplamaları, simülasyonu ve tasarımı tamamlanan bir diğer set olan 30/80 μ s darbe akım üretici şekil 5.17.'deki devre şekline göre montajı gerçekleştirilmiştir. Set kurulumu için eski 8/20 μ s darbe akım üreticinde kullanılan kondansatörler değerlendirilmiştir (Şekil 5.1.). Ölçüm seti olarak Şekil 5.21.'de görseli verilen kaide kullanılmıştır. Diğer setlerde olduğu gibi bu set kondansatörleri de yüksek gerilim transformatöründen doğrultulan gerilim ile şarj olmaktadır.



Şekil 5.23. 30/80 μ s akım darbesi için oluşturulan set

Üretimleri ve montajları gerçekleştiren tüm setlerin istenen değerde akım darbesi ürettiğinin kontrolüne deneysel çalışma bölümünde yer verilmiştir. Elemanları birbirine bağlayan ara baraların yapımı mekanik atölyede gerçekleştirilmiştir.

Akım ölçümleri için 10 m Ω değerindeki şönt direnç kullanılacaktır. Ancak şönt direnç üst dayanma sınırı 20 kA ile sınırlıdır. 100 kA seviyesinde üretilecek olan akımların ölçümü için kullanılamayacaktır. Bunun yerine Rogowski akım sensörü prototipleri tasarımları yapılmış ve ölçümler bu sensörler üzerinden yapılmıştır.

Gerilim ölçümleri için gerilim bölücüler üzerinden osilokoptan ölçülmüştür. Bölücülerde çevirme oranlarının, alternatif gerilim için 1000:1, darbe gerilim bölücüsünde ise ölçüm belirsizliğinin ve okuma hatalarının küçük olmasını sağlamak için yaklaşık olarak 2000:1 yapılmasının uygun olduğuna karar verilmiştir

5.3. Darbe Akımı Ölçümleri İçin Rogowski Bobini Tasarımı

Orta gerilim metal oksit parafudr deneylerini gerçekleştirmek amacıyla laboratuvar ortamında Metal Oksit Parafudr standardının (madde 8.7) çalışma çevrimi deneyi başlığı altında yer alan yüksek akım darbesini için yüksek akım darbe üretici gerçekleştirilmiştir. Bu set ile tam parafudr üzerine 100 kA (4/10 μ s) darbe akımı uygulanmıştır [12].

Laboratuvarda mevcut durumda yıldırım akım darbesi artık gerilim deneyi 20 kA'e kadar 8/20 μ s dalga formunda yapılmaktadır. Darbe akım ölçümleri 10 m Ω şönt direnç üzerinden yapılmaktadır. Şönt direncin en yüksek ölçüm değeri 20 kA ile sınırlıdır. Üretilen 100 kA darbe akımı için şönt direnç ile ölçüm yapılamamaktadır. Bunun üzerine yüksek akımları güvenilir bir şekilde, doyuma gitmeden ölçebilecek bir ölçüm sistemi gereksinimi duyulmuştur. İhtiyaca yönelik olarak darbe akım sensörü olan Rogowski bobininin karakteristiği istenen şartları sağladığı görülmüştür. Bunun için Rogowski akım sensörü tasarımı çalışması yapılmıştır. Doyuma gitmemesi, doğrusal olması, düşük akım değerlerinde belirlenen dönüştürme oranının yüksek akımlarda da geçerli olması sebebiyle 100 kA'lik darbe akımının Rogowski akım sensörüyle ölçülmesi hedeflenmiştir. Tasarımlanan darbe akım sensörleri Şekil 5.24.'te verilmiştir.



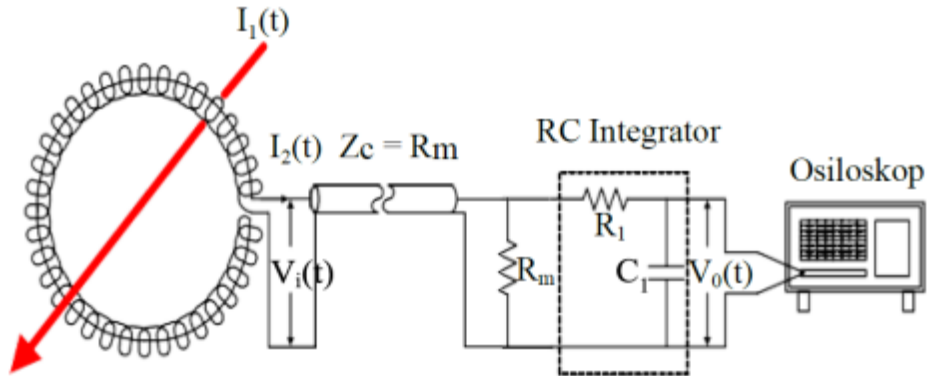
Şekil 5.24. Rogowski akım sensörlerinin akım taşıyan bara etrafına konumlandırılması

Sarılan bobinlerin direnç, kapasite ve endüktans değerleri LCR metre ile ölçülmüştür. Ölçülen değerler ve sarım parametreleri Tablo 5.5’de verilmiştir

Tablo 5.5. Tasarımlanan Bobinlerin sarım parametreleri

Bobin No:	İletken Çapı (mm)	Bir sarımın çapı (mm)	Endüktans değeri (uH)	Kapasite değeri (uF)	Bobin iç direnci(ohm)
R.B 1	0,8	14	32	790	0,55
R.B 2	0,8	14	47	530	0,72
R.B 3	0,7	16	130	190	1,41
R.B 4	0,8	12	25	1010	0,45
R.B 5	0,8	12	21	1180	0,47
R.B 6	0,65	16	115	220	1,63
R.B 7	0,4	16	116	220	4,30
R.B 8	0,8	16	119	210	1,10

Her bir prototipin performansı, 8/20 μ s’lik darbe akımı 36 kV 10 kA etiket değerli tam parafudr üzerine uygulanarak test edilmiştir. Uygulanan akım 10 m Ω ’luk şönt direnç üzerinden osiloskoptan ölçülmüştür. Parafudrun toprak bağlantısı üzerine prototip Rogowski bobinleri (Şekil 5.24.) konumlandırılmıştır. Bu sayede osiloskop üzerinden hem şönt direnç hem de rogowski bobinleri üzerinden ölçümler ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Prototiplere ait ölçüm sonuçları yorumlanmıştır. İlk ölçümlerde şönt dirence en yakın performans gösteren 3 bobin seçilerek deney işlemlerine devam edilmiştir. R.B.3, R.B.7 ve R.B.8 bobinlerinin gerilim çıktıları şönt değerine daha yakın çıktılar olduğu gözlenmiştir. Bu prototipler için bobin uçlarına farklı değerlerde direnç ve kondansatörler eklenerek RC integratör etkisiyle şönt direnç değerine daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.25. Rogowski bobini ölçüm sistemi

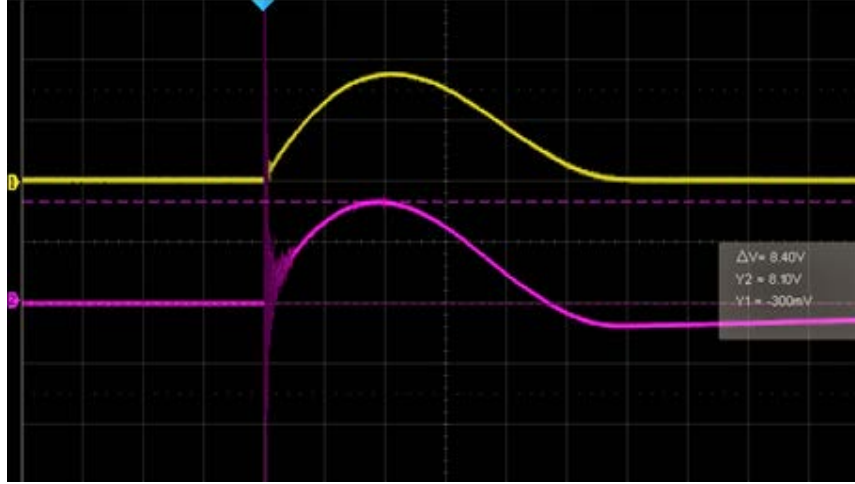


Şekil 5.26. Tasarımı tamamlanan R.B.8

Rogowski akım sensörüne kondansatör eklenmiş, cephe başlangıcında oluşan osilasyonların azaldığı görülmüştür (Şekil 5.27). Eklenen kondansatör ile RC integratör sağlanmıştır (Şekil 5.25.). Bobin sargılarının pozisyonunun değişmemesi için sargılar makaron ile sarılarak (Şekil 5.26.) darbelere karşı önlem alınmıştır. Yıldırım akım darbesi üretici aynı gerilim değeriyle beslenerek R.B.8 ile 6 değerinde ölçüm alınmış, bu ölçümlerle kA/V biriminde bir dönüştürme oranı (tablo 5.6.) hesaplanmıştır. Dönüştürme oranı (F) daha sonraki ölçümlerde kullanılarak akım değeri hesaplaması yapılmıştır.

Tablo 5.6. R.B. 8 Dönüştürme oranı hesaplama çalışması

U_{ac} (kV)	U_{dc} (kV)	$U_{artık}$ (kV)	$I_{şönt}$ (kA)	U_{RB8} (V)	F (kA/V)
95	134	94	8,2	8,9	0,921
94	132	96	7,3	8	0,913
94	132	96	7	7,6	0,921
94	132	94	7,1	7,7	0,922
94	132	96	7,4	8,1	0,914
94	132	96	7,9	8,4	0,940
Ortalama					0,922
Standart Sapma					0,010



Şekil 5.27. Sarı prob şönt direnç, pembe prob R.B.8

Belirlenen dönüştürme oranı (F) ile Rogowski akım sensörü tasarım hedefi olan yüksek darbe akımının ölçümünde kullanılabilir hale gelmiştir. Tasarlanıp, üretilen darbe akımı ölçme sensörünün performansı, yukarıda sözü edilen akım şöntü ile karşılaştırılarak sınanmıştır. Akım sensörünün, öngörüleni karşıladığı görülmüştür. Ancak, farklı karakteristiklere sahip akım darbelerinde, beklentilerin aksine; farklı çevirme oranlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Örneğin, yüksek darbe (100 kA-4/10 μ s) akımı için çevirme oranının 0,922 kA/V, uzun dalga (500 A – 30/80 μ s) darbe akımında ise 5,359 kA/V olduğu görülmüştür.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölüm başlığı altında tasarım ve üretimi yapılmış olan darbe setlerinin akım ölçüm sonuçları, çalışma performansları sınanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları ile elde edilen deney çıktılarının tutarlılığı değerlendirilmiştir.

6.1. 30/80 μ s Darbe Akımı Deneysel Çıktıları

Tasarımı ve üretimi tamamlanan 30/80 darbe akım setinin tamamlanmış hali Şekil 5.23. ve Şekil 6.3.'te gösterilmiştir. Kondansatör ve bobin yapısı atlama küresi bulunan ölçüm kaidesine bağlantısı yapılmıştır. Darbe akımı atlama aralıksız metal oksit üzerine uygulanmıştır (Şekil 1.6.). Kondansatörler AC yüksek gerilim transformatörüyle beslenmiştir. AC yüksek gerilim transformatörü, yarım dalga doğrultucu yapı kullanılarak kondansatörleri şarj etmiştir. Şarj olan kondansatörler atlama küresinin uzaktan kumanda ile kontrolü ile yaklaştırılarak atlama işlemi gerçekleştirilerek parafudr üzerine darbe akımı uygulanmıştır. Uygulanan akım şönt direnç üzerinden (Şekil 5.3.) osiloskop ile ölçülmüştür (Şekil 5.5.). Şönt direnç ile birlikte tasarımı tamamlanan Rogowski bobininiyle de ölçüm alınmıştır.

Tablo 6.1. 30/80 darbe akım deneysel sonuçları

AC Voltmetre	DC Voltmetre	Şönt direnç (CH1)
10 kV	6 kV	Tepe : 548 A
		T1 : 47,5 us
		T2 : 102 us
		T0 : 130 us
11kV	6kV	Tepe : 508 A
		T1 : 50 us
		T2 : 102 us
		T0 = 125,2 us



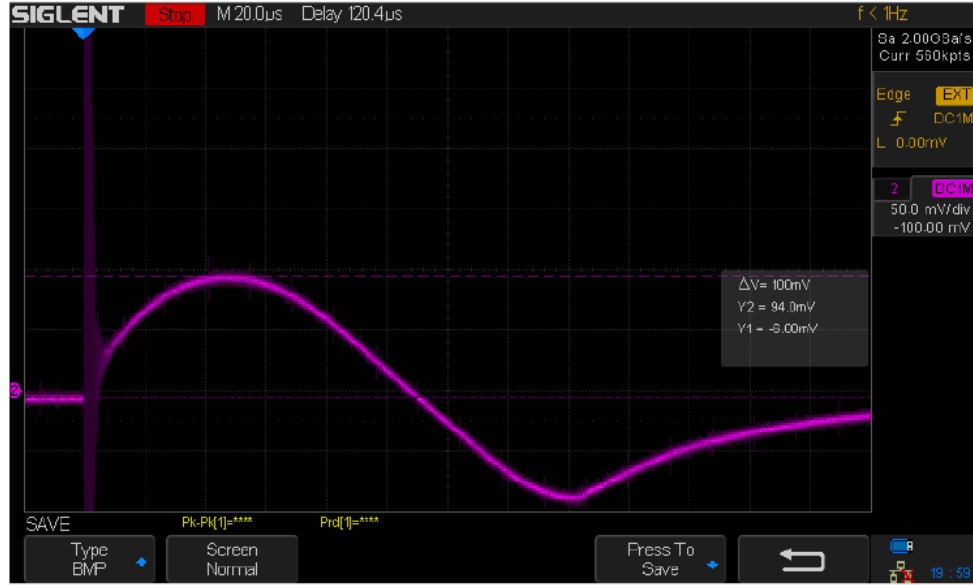
Şekil 6.1. 30/80 µs darbe akım osiloskop görüntüsü

Ölçeklenen Rogowski akım sensörü kullanılarak, 500 A'lık uzun dalga darbe akım seti ile üretilen darbe akımlarının ölçülmesi olanağı da elde edilmiştir. Ancak, aynı sensörün, farklı karakteristige sahip darbe akımlarının ölçülmesinde çevirme oranının değiştiği görülmüştür. Bu nedenle sensörün, uzun akım darbesi ile yeniden ölçeklenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla 10 mΩ'luk şönt direnç kullanılmış; ancak, şönt direncin zorlanabileceği göz önüne alınarak ölçekleme, sınırlı sayıda darbe uygulanarak yapılmıştır.

Tablo 6.2. Rogowski akım sensörü çevirme oranı belirleme

Işönt (kA)	U_{RB} (V)	F (kA/V)
0,548	0,1	5,480
0,508	0,097	5,237
Ortalama		5,359
Standart Sapma		0,17

Tablo 6.2. de verilen iki akım değerine göre ölçme sonuçları dikkate alınarak, akım sensörünün uzun darbe akımında dönüştürme oranının **5,359 kA/V** alınabileceği kanaatine varılmıştır. Akım sensörü ile elde edilen 536 A ve 30/80 µs'lik uzun darbe akımının osilogramı, Sekil 6.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2. Akım sensörü ile ölçülen 536 A'lik uzun dalga darbe akımı ($U_{RB} \times F = 0,1 \text{ (V)} \times 5,359 \text{ (kA/V)} \approx 536 \text{ A}$).



Şekil 6.3. 30/80 µs Deney seti

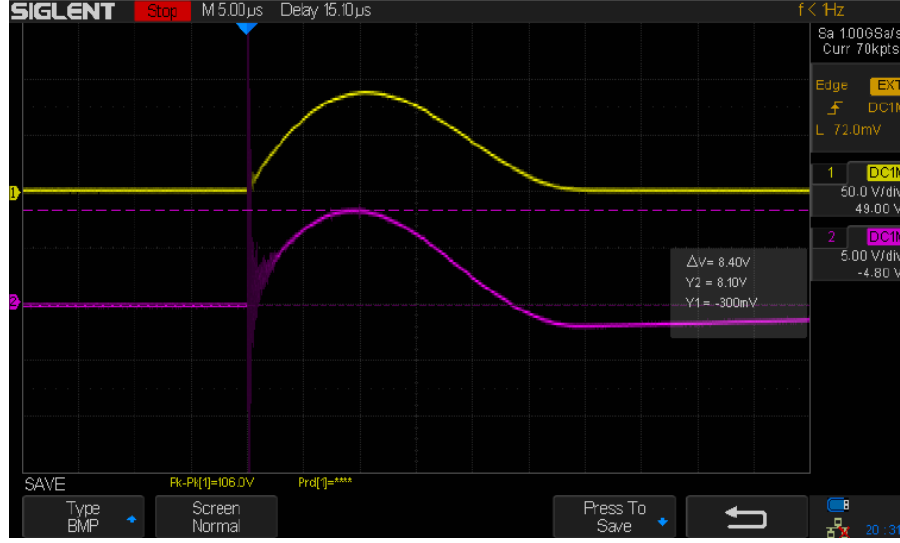
Darbe şekillerinden ve parametrelerden de anlaşılacağı üzere tasarımdan başarılı sonuç alınmıştır. Deney devresi standartta belirtilen deneylerde kullanılabilir durumda olduğu görülmüştür. Şekil 5.18. ile verilen simülasyonda zaman parametreleri $T_1/T_2 = 45/105 \text{ µs}$ bulunmuştu. Gerçek ölçüm değeri Tablo 6.1.'de $T_1/T_2 = 47,5/102 \text{ µs}$ olarak ölçülmüştür. Simülasyon çalışması ile gerçek değerlerin yakın olduğu görülmüştür.

6.2. 8/20 μ s Darbe Akımı Deneysel Çıktıları

Tek ünite kondansatör grubu atlama küresi bulunan ölçüm kaidesine bağlantısı yapılmıştır. Darbe akımı atlama aralıksız metal oksit üzerine uygulanmıştır (Şekil 1.6.). Kondansatör ünitesi AC yüksek gerilim transformatörüyle beslenmiştir. AC yüksek gerilim transformatörü, yarım dalga doğrultucu yapı sayesinde kondansatörleri şarj etmiştir. Şarj olan kondansatörler atlama küresinin uzaktan kumanda ile kontrolü ile yaklaştırılarak atlama işlemi gerçekleştirilerek parafudr üzerine darbe akımı uygulanmıştır. Uygulanan akım şönt direnç (Şekil 5.3.) üzerinden osiloskop (Şekil 5.5.) ile ölçülmüştür. Şönt direnç ile birlikte tasarımı tamamlanan Rogowski bobininiyle de ölçüm alınmış sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 5.26). Parafudr üzerinde kalan artık gerilim darbe gerilim bölücü vasıtası ile ölçülmüştür. Deney setinin tam kurulu hali Şekil 6.4. ile verilmiştir.



Şekil 6.4. 8/20 μ s Yıldırım akım darbesi artık gerilim ölçümü deney devresi



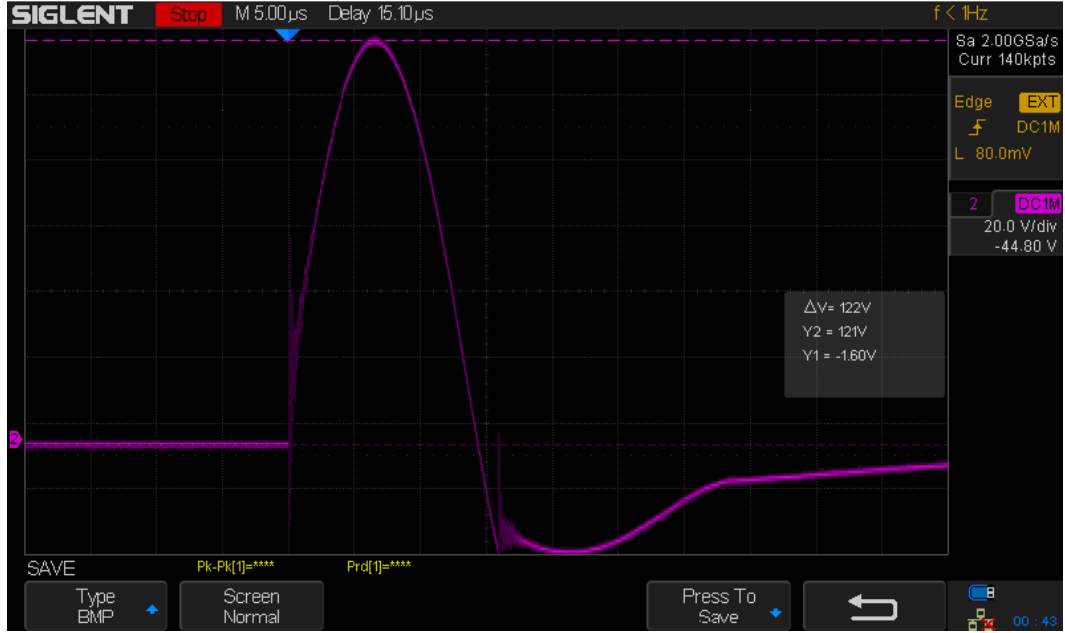
Şekil 6.5. 8/20 µs yıldırım akım darbesi osiloskop görüntüsü (Sarı prob: Şönt direnç ölçümü, pembe prob: Rogowski akım sensörü ölçümü)

Şekil 6.5.'de $T_1/T_2 = 8,8/18,8$ µs olarak ölçülmüş toleranslar içinde olduğu görülmüştür. Şekil 5.14.'deki simülasyon da ise $T_1/T_2 = 7.2/19$ µs olarak tahmin edilmişti. Simülasyon sonuçları ile gerçek değerlerin yakın sonuçlar olarak elde edilmiştir. Tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen deney seti ile yıldırım darbe akımı parafudr üzerine başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

6.3. 4/10 µs Darbe Akımı Deneysel Çıktıları

Her iki kondansatör ünitesi paralel bağlanarak, atlama küresi bulunan ölçüm kaidesine bağlantısı yapılmıştır. Darbe akımı atlama aralıksız metal oksit üzerine uygulanmıştır (Şekil 1.6.). Kondansatör ünitesi AC yüksek gerilim transformatörüyle beslenmiştir. AC yüksek gerilim transformatörü, yarım dalga doğrultucu yapı sayesinde kondansatörleri şarj etmiştir. Şarj olan kondansatörler atlama küresinin uzaktan kumanda ile kontrolü ile yaklaştırılarak atlama işlemi gerçekleştirilerek parafudr üzerine darbe akımı uygulanmıştır. Uygulanan akımın genliği 100 kA seviyelerinde olacağından dolayı şönt direncin bu ölçümde kullanılması uygun değildir. Şönt direncin ölçebildiği en yüksek akım değeri 20 kA ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenden dolayı akım, tasarımı tamamlanan ve bir çevirme oranına ($F=0,922$ kA/V) sahip olan Rogowski akım sensörü ile ölçülmüştür. Deney seti Şekil 5.22.'de verilen görseldeki gibi kurulmuştur.

Geliştirilen akım sensörü ile yüksek akım (100 kA) darbe setinde üretilen akımın ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen ölçüm değerlerinin ve osilogramların incelenmesi sonucunda, set için üretilmiş olan bobinlerin eşdeğer endüktanslarının (12 μ H) büyük olduğu görülmüştür. Bobinlerin sarım sayıları kademeli bir şekilde azaltılıp, endüktans değerleri düşürülmüş ve ölçümler tekrarlanmıştır. Ancak, sarım sayılarının azaltılmasının da yeterli olmadığı görülmüştür. Bağlantı iletkenlerinin de bir endüktansa sahip olduğu dikkate alınarak, bobinler yerine yuvarlak kesitli (Φ 8 mm) 60 cm uzunluğunda saplamaların kullanılmasına karar verilmiş ve bu şekilde deneyler tekrarlanıp sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu durumda elde edilen darbe şeklinin amaca uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 6.6. 4/10 μ s yüksek akım darbesi osiloskop görüntüsü ($U_{RB} \times F = 122$ (V) $\times 0,922$ (kA/V) = 112,5 kA, 4/10 μ s'lik darbe akımı)

Söz konusu değişikliklerin yapılmasından sonra, akım sensörü üzerinden alınan, 112,5 kA'lık bir akım darbesi osilogramı Şekil 6.6.'da verilmiştir. Elde edilen akım darbesinin amaca uygun olduğu görülmüştür. Hem Tübitak Projesinin yapılış amacı hemde bu çalışmanın kaynağı olan Yüksek Akım Darbesinin üretilmesi ve ölçülmesi başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada aşırı gerilimler tanımlanmış ve sisteme etkilerine değinilmiştir. İşletme gerilimi altındaki bir koruma aygıtını hangi akımlar ile sınındığının açıklaması yapılmıştır. Söz konusu aygıt ve deney setlerinin tasarım aşamasında, teorik hesaplamalar yapılmış ve bulunan değerlere göre her biri için çok sayıda simülasyon çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre prototip üretimleri gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalı deneyler yapılarak, ürün performansları sınıanmış ve amaçlanan sonuçları elde etmek üzere, ürünler üzerinde düzeltmeler yapılmıştır. Düzeltmelerden sonra, aygıt ve setler üzerinde gerçekleştirilmiş olan performans deneyleri ve karşılaştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

Yüksek darbe akımı (100 kA - 4/10 μ s) ve uzun dalga darbe akımı (500 A – 30/80 μ s) setlerinin performans deneyleri, firmada mevcut akım şöntü (10 kA, 0,01 Ohm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Setlerin, öngörülen performansları sağladıkları görülmüştür. Söz konusu değişikliklerin yapılmasından sonra, akım sensörü üzerinden alınan, 112,5 kA'lık bir akım darbesi Şekil 6.6.'da verilmiştir. Elde edilen akım darbesinin amaca uygun olduğu görülmüştür.

Tasarlanıp, üretilen darbe akımı ölçme sensörünün performansı, akım şöntü ile karşılaştırılarak sınıanmıştır. Akım sensörünün, öngörülenleri karşıladığı görülmüştür. Ancak, farklı karakteristiklere sahip akım darbelerinde, beklentilerin aksine; farklı çevirme oranlarına sahip olduğu belirlenmiştir. Örneğin, yüksek darbe (100 kA - 4/10 μ s) akımı için çevirme oranının 0,922 kA/V, uzun dalga (500 A – 30/80 μ s) darbe akımında ise 5,359 kA/V olduğu görülmüştür.

Yüksek akımların ölçülmesi için tasarlanan rogowski akım sensörünün tasarımına ve kalibrasyonlu şönt direnç ile karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Hedeflendiği gibi 100 kA mertebesindeki yüksek akımlar ölçülmüş ve yapılan tasarım amacına uygun olduğu görülmüştür.

Rogowski akım sensörü sadece yüksek darbe akımların ölçümünde değil, yüksek akım içeren tüm güç sistemlerinde koruma, ölçme ve izleme alanlarında aktif olarak kullanılabilir. Montajının kolay, maliyetinin düşük olması ve benzeri diğer akım ölçüm aygıtlarına göre daha geniş genlik ve frekansta ölçüm yapması Rogowski akım sensörü için tercih sebebi olacağı öngörülmektedir.

Rogowski bobini tasarımının, ölçüm hassasiyeti ve güvenilirliğinin artırılmasına yönelik olarak ilerleyen dönemlerde integratör bölümü üzerinde çalışmalar yürütülebilir. RC integratör yerine kompanzasyon integratörü ya da aktif integratör üzerine çalışmalar yapıp elde edilen ölçüm değerleri karşılaştırılabilir. Aktif integratör ile çıkış sinyalinin genliği ayarlanarak, girişimler filtrelenerek daha düşük akım değerlerinde ölçüm yapılabilir. Bu sayede daha düşük seviyedeki alternatif akım ölçümlerinde tasarımı gerçekleşen rogowski akım sensörü kullanılabilir.

Tez çalışmasının, hava taşıtlarında kullanılan aygıtların darbe dayanım deneylerinin yapılmasında kullanılacak, 200 kA'e kadar darbe akımı üreteçlerini geliştirilmesine katkıda bulunması beklenmektedir. Setlerin akreditasyonunun yaptırılması ile, deney hizmeti vermeyi ve hava taşıtlarında kullanılan donanımların yıldırım darbe dayanımlarına ilişkin deney setlerinin üretilmesi için bir alt yapı oluşturulabilecektir. Bu durumda, TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay San. A.Ş. (TAI)'nin de hava taşıtlarında kullanılan donanımlarda yerli üretimin desteklenmesine yönelik yeni hedefleri doğrultusunda üretim yapan/yapmayı planlayan firmalara da deney hizmeti verilmesine katkıda bulunabilecektir. Amaçlanan deney setlerinin gerçekleşmesi, yerli metal-oksit blok geliştirip, üretilmesine yönelik çalışmalar yapılmasına katkıda bulunabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Özkaya M., *Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 2*, 3. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [2] Ismailoğlu H., Aşırı Gerilimler Oluşumları Etkileri ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma, *TMMOB-EMO Ulusal Elektrik Tesisat Kongresi-Yüksek Gerilim Çalıştayı*, İzmir, 7-10 Mayıs 2009.
- [3] TS EN 60099-4, Parafudrlar-Bölüm 4: A.A. Sistemleri için-Atlama Aralıksız Metal Oksit Parafudrlar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2014.
- [4] TS EN 62475, Yüksek Akımlar için Test Teknikleri-Test Akımları ve Ölçümler İçin Tanımlar ve Gereklilikler *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2009.
- [5] Ramboz J., Machinable Rogowski Coil Design and Calibration, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, **45**(2), 511–515.
- [6] Metwally I. A., Self Integrating Rogowski Coil for High Impulse Current Measurement, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, **59**(2), 353-360.
- [7] Limchaoren W., Yutthagowith P., Rogowski Coil with An Active Integrator for Measurement of Switching Impulse Current, *International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Thailand, 15-17 May 2013.
- [8] Qing C., Hong-bin L., Ming-ming Z., Yan-bin L., Design and Characteristics of Two Rogowski Coils Based on Printed Circuit Board, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Jun. 2006, **55**(3), 939–943.
- [9] Kojovic L. A., Application of Rogowski Coils Used for Protective Relaying Purposes, *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, GA, USA, 29 Oct.-1 Nov. 2006.
- [10] Schon K., *High Voltage Measurement Techniques*, E-book, Springer International Publishing, Switzerland, 2019.
- [11] Yutthagowith P., Pattanadech N., A Program for Design of Impulse Current Generator Circuits, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 21-24 April 2008.
- [12] Yılmaz B., Yüksek Darbe Akımların Ölçümü için Rogowski Bobini Tasarımı, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi 2019 (EEMKON 2019)*, İstanbul, Türkiye, 14-16 Kasım 2019.

- [13] Clifford D. W., Crouch E. K., Schulte E. H., Lightning Simulation and Testing, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1982, **24**(2), 209-224.
- [14] Haryono T, Sirait K.T., Tumiran, Hamsah B., The Design of A High Amplitude Impulse Current Generator, *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, 9-12 Nov. 2008.
- [15] Sonehara T., Kusano H., Hirano Y., Visualization of Lightning Impulse Current Discharge on CFRP Laminate, *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, 11-18 Oct. 2014.
- [16] Halim N. H., Azmi A., Yahya Y., Abdullah F., Othman M., Laili M. S., Development of A Small Scale Standard Lightning Impulse Current Generator, *The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011)*, Selangor, Malaysia, 6-7 June 2011.
- [17] Stuckenholz H., Gamlin M., Overview of Impulse Current Test Standards and the Impact on Test Equipment, *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Vienna, Austria, 2-7 Sept. 2012.
- [18] Kempen S., Peier D., An Optimised High Current Impulse Source, *1st International Conference on High Speed Forming*, Dortmund, Germany, 31 March-1 April 2004.
- [19] Bing W., Cai F., Nan Y., Design of Multi-Component Impulse Current Generator for Practical Lightning Current Simulation, *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, 11-18 Oct. 2014.
- [20] Bing W., Xiaohong H., Zhengcai F., Jian C., Wei S., Design and Implementation of Continuous Multiple Impulse Current Generator for Aircraft Lightning Protection Tests, *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, 17-20 Sept. 2012.
- [21] Schwab A., Low-Resistance Shunts For Impulse Currents, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1971, **PAS-90**(5), 2251-2257.
- [22] Sato S., Okamoto Y., Nishimura S., Impulse Current Waveform Parameters Determination With Zno Load, *2010 Conference Proceedings IPEC*, Singapore, 27-29 Oct. 2010.
- [23] İsmailoğlu H., Aşırı Gerilimlere Karşı Korumada Ark Boynuzlarının Etkinliği, *IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 12-13 Mayıs 2011.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Yılmaz B., Yüksek Darbe Akımların Ölçümü İçin Rogowski Bobini Tasarımı, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi 2019 (EEMKON2019)*, İstanbul, Türkiye, 14-16 Kasım 2019.



ÖZGEÇMİŞ

Burak YILMAZ 1994 yılında Afyonkarahisar/Dinar’da doğdu. Lise öğrenimini Afyon Anadolu Öğretmen Lisesi’nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2016 yılında mezun oldu. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde yüksek gerilimlerin ve yüksek akımların üretilmesi ve ölçülmesi konularında çalışmaları bulunmaktadır. Ayrıca, 2017 yılında Elopas A.Ş. Yüksek gerilim laboratuvarı’nda başladığı Laboratuvar Sorumlusu görevini halen sürdürmektedir.

