



**YERALTI KABLOLARI İÇİN ARIZA TESPİT CİHAZI
TASARIMI VE UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TUNAHAN AKSU

Danışman

Prof. Dr. YÜKSEL OĞUZ

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi TOLGA ÖZER

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YERALTI KABLOLARI İÇİN ARIZA TESPİT CİHAZI
TASARIMI VE UYGULAMASI

TUNAHAN AKSU

Danışman

Prof. Dr. YÜKSEL OĞUZ

İkinci Danışman

Dr. Öğr. Üyesi TOLGA ÖZER

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2023

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

06 / 07 / 2023

Tunahan AKSU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YERALTI KABLO ARIZA TEST CİHAZI TASARIM VE UYGULAMA

Tunahan AKSU

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tolga ÖZER

Yer altına serilen kablolarda meydana gelen arızaların tespiti için tüm kablo hattının sökülmesi, kullanıcı ve üretici için zaman ve maliyet kayıplarına sebep olmaktadır. Bu durumun oluşması arızanın kablo üzerindeki tam konumunun bilinmesi mecburiyetini doğurmaktadır. Bu çalışmanın önemi kablo hattının sökülmesine gerek duyulmadan kablodaki arızanın yerinin tespit edilebilmesi ile zaman ve maliyet kazancı sağlanmasıdır. Bu tezin amacı, yer altına indirilen orta gerilim kablolarında oluşabilecek izolasyon zayıflığı, kaçak akım, kısa devre gibi arızaların kablo üzerindeki yerinin tespitinin yapılabilmesi için yüksek gerilim ve enerji sağlayabilecek bir darbe üretici tasarımıdır. İletim hattına yüksek gerilim ve enerji verebilecek cihazın elektronik donanımının tasarımı, yazılım tasarımı ile cihaz kontrolünün sağlanması ve mekanik yapı ile üretimin yapılmasıdır. Arıza yerinin tespiti için iletim hattına yüksek gerilim uygulanarak verilen bu enerji ile hat üzerinde arızalı bölgede ark oluşumunun sağlanması ve ark sebebiyle ortaya çıkan sesin hassas kulaklıkla dinlenerek takip edilmesi temel alınmıştır. Tasarlanan cihaz şebekeden veya bataryalı sistemlerde invertörden beslenerek, besleme gerilimini transformatör ve gerilim katlama devreleriyle 8kV'a çıkartmıştır. Yükseltilmiş olan gerilim, yüksek gerilim kondansatöründe depolanır ve böylelikle enerji seviyesi 10000 joule seviyesine ulaşır. Cihazın kullanımını kolaylaştırmak amacıyla cihaza nRF modülü eklenerek kullanıcı için tasarlanan kumanda kontrol ünitesi ile cihazın haberleşmesi sağlanmıştır. Kontrol ünitesi 2km'lik çapta cihazı uzaktan kontrol edebilecek şekilde

tasarlanmıştır. Aynı amaçla tasarlanan muadil kablo arıza tespit cihazlarından farklı olarak cihazın kullanım ömrünü arttırmak, cihaz bakım masraflarını, işçilik ve kablo bakım/onarım maliyetlerini azaltmak cihazı uzaktan kontrol edebilecek donanım ile mümkün olmuştur. Çıktı olarak cihaz tümüyle üretilmiş ve piyasa kullanımına sunulmuştur. Bu çalışmada 8kV olarak sunulan ark gerilimi ilerleyen çalışmalarda 16kV,32kV gibi seçeneklerin eklenmesiyle artan gerilim sayesinde arıza tespit hattı mesafesinin uzamasıyla daha kapsamlı bir hale getirilebilir. Arıza tespit hat uzunluğunun artmasıyla kullanıcı tarafından sağlanan uzaktan kontrolün haberleşme mesafesi de arttırılabilir. Ek olarak kontrol ünitesine eklenebilecek mesafe bulan “echo algoritması” gibi yazılımsal düzenlemeler ve bu yazılımları destekleyen donanım eklenerek ark sesinin tespitinde kullanılan kulaklık, kaldırılabilir.

2023, xii + 110 sayfa

Anahtar Kelimeler: Voltaj katlayıcı, Yeraltı kablo, Darbe jeneratörü, Yüksek gerilim

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

UNDERGROUND CABLE FAULT TESTER DESIGN AND APPLICATION

Tunahan AKSU

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric-Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Yüksel OĞUZ

Co-Supervisor: Asst. Prof. Tolga ÖZER

In this research, dismantling the entire cable line for the detection of faults in cables laid underground causes time and cost losses for the user and the manufacturer. The occurrence of this situation necessitates knowing the exact location of the fault on the cable. The importance of this study is to provide time and cost savings by determining the location of the fault in the cable without the need for dismantling the cable line. The aim of this thesis is to design a pulse generator that can provide high voltage and energy in order to determine the location of faults such as insulation weakness, leakage current, short circuit that may occur in medium voltage cables that are lowered underground. It is the design of the electronic hardware of the device that can provide high voltage and energy to the transmission line, providing the device control with software design and production with the mechanical structure. In order to detect the fault location, it is based on this energy, which is given by applying high voltage to the transmission line, to ensure arc formation in the faulted area on the line and to listen to the sound caused by the arc by listening with sensitive headphones. The designed device is fed from the network or from the inverter in battery systems, and the supply voltage is increased to 8kV with transformer and voltage doubling circuits. The amplified voltage is stored in the high voltage capacitor and thus the energy level reaches 10000 joules. In order to facilitate the use of the device, an nRF module was added to the device, enabling the device to communicate with the control unit designed for the user. The control unit is designed to

be able to remotely control the device with a diameter of 2 km. Unlike equivalent cable fault detection devices designed for the same purpose, it has been possible to increase the service life of the device, to reduce device maintenance costs, labor and cable maintenance/repair costs, with hardware that can remotely control the device. As an output, the device has been completely produced and presented to the market. The arc voltage, which is presented as 8kV in this study, can be made more comprehensive by extending the distance of the fault detection line, thanks to the increased voltage with the addition of options such as 16kV, 32kV in future studies. By increasing the fault detection line length, the communication distance of the remote control provided by the user can also be increased. In addition, software arrangements such as the echo algorithm that can be added to the control unit and the hardware that supports these software can be added, and the earphones used in the detection of arc sound can be removed.

2023, xii + 110 pages

Keywords: Voltage doubler, Underground cable, Pulse Generator, High voltage

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Yüksel OĞUZ'a ve eş danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tolga ÖZER'e, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Sinan KIVRAK'a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Simin Yılmaz Aksu'ya teşekkür ederim.

Tunahan AKSU
Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	5
2.1 Yeraltında Kullanılan Kabloların Arıza Nedenleri	13
2.1.1 Üretim Hataları	14
2.1.2 Kargo, Stok ve Depolamadaki Hatalar	14
2.1.3 Kablo Montajı Hataları	14
2.1.4 Mekanik Etkiler Sebebiyle Oluşan Hatalar	15
2.1.5 Korozyon	16
2.1.6 Gerilim Darbeleri ve Termik Etkiler	16
2.1.7 Yaşlanma	17
2.2 Yeraltı Kablolarındaki Arıza Şekilleri	17
2.2.1 Şönt Arızaları	17
2.2.2 Açık Devre Arızaları	17
2.2.3 Nem Arızaları	17
2.2.4 Ezilme Bükülme Arızaları	18
2.2.5 Kısmi Deşarj Arızaları	18
2.2.6 Arıza Tipleri	18
2.3 Kablolarındaki Arızaların Ön Tespiti	20
2.3.1 Oluşan arızanın belli bir alana indirgenmesi	23
2.3.2 Köprü Yöntemi	24
2.3.2.1 Klasik Köprü Yöntemi	25
2.3.2.2 Murray Köprü Yöntemi	25
2.3.2.3 Hillborn Köprü Yöntemi	27
2.3.3 Yakma Yöntemi	27

2.3.4	Darbe Yansıma Yöntemi	29
2.3.4.1	Hattın Elektriksel Modeli	30
2.3.4.2	Dalganın Yansıması ve İletim esnasındaki Katsayılar	34
2.3.4.3	Arızalı Noktanın Bulunması	40
2.3.5	İkinci Anlık Darbe Yöntemi.....	42
2.3.6	Darbe Akım Yöntemi	42
2.3.7	Bozunma (Decay) Yöntemi.....	45
2.3.8	Arıza Yerinin Tam Tespit Yöntemi	46
2.3.8.1	Maksimum Yöntemi	47
2.3.8.2	Minimum Yöntemi	47
2.3.8.3	Adım Gerilim Yöntemi.....	48
2.3.8.4	Büküm Alanı Yerleştirme Yöntemi.....	49
2.3.8.5	Kablo Tanımlama Yöntemi	50
2.3.8.6	Akustik Arıza Tespit Yöntemi.....	51
3.	MATERYAL ve METOT.....	54
3.1	Yüksek Gerilim Darbe Üretici	57
3.1.1	Yüksek Gerilim Üretimi.....	57
3.1.1.1	Yükseltici Tip Transformatör	58
3.1.1.2	Marx Jeneratörü	61
3.1.1.3	Gerilim Katlama Devresi	63
3.1.2	Darbe Üretimi.....	68
3.1.2.1	Yüksek Gerilim Kondansatörü	69
3.1.2.2	Solenoid Tip ve Normal Tip Kontaktör	70
3.1.3	Şarj – Deşarj	72
3.1.4	Darbe Jeneratörünün Kontrol Ünitesi	75
3.2	Darbe Jeneratörünün Kontrol Kumandası	78
3.3	Algoritma	81
3.3.1	Darbe Jeneratörünün Algoritması	81
3.3.2	Darbe jeneratörünün kontrol kumandasının algoritması	84
4.	BULGULAR.....	86
5.	TARTIŞMA ve SONUÇ.....	102
6.	KAYNAKLAR	106

ÖZGEÇMİŞ.....	110
---------------	-----



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μ F	Mikro-Farad
A	Amper
C	Kondansatör
D	Diyot
E	Enerji
I	Akım
J	Joule
L	Bobin
P	Aktif Güç
Q	Enerji
R	Direnç
S	Görünür Güç
U	Gerilim
V	Gerilim
W	Güç
W*h	Wat-saat

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım
AG	Alçak gerilim
CM	Santimetre
DC	Doğru akım
G Sa/s	Giga sample per second
GIS	Gas Insulated Systems
GR	Gram
ICM	Impulse Current Method
IVM	Impulse Voltage Method
KA	Kiloamper (1000*amper)
KV	Kilovolt (1000*volt)
LCD	Sıvı kristal ekran
mAh	Miliamper saat
MS	Milisaniye
nRF	Radyo frekansı
OG	Orta gerilim
PET	Pulse Echo Technique
RMS	Route mean square
SIM	Secondary Impulse Method
SN	Saniye
TDR	Time domain reflectometry
VA	Volt amper
YG	Yüksek gerilim
ZAER	Zaman Etki Alanı Reflektometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Enerji iletim hattı diagramı.	1
Şekil 2.1 Yeraltı kablolarının döşeme şekli örneği (İnt. Kyn. 2).	15
Şekil 2.2 Arızaların yerinin tespiti için akış diagramı.	20
Şekil 2.3 Arıza tespit akış diagramı.	22
Şekil 2.4 Yöntemler ve uygulama yerleri.	23
Şekil 2.5 Wheatstone Köprüsü.	25
Şekil 2.6 Murray Köprüsü.	26
Şekil 2.7 Hillborn Köprüsü.	27
Şekil 2.8 Enerji iletim hattının π eşdeğer devre modeli (İnt. Kyn. 1).	31
Şekil 2.9 Enerji iletim hattının T eşdeğer devre modeli (İnt. Kyn. 1).	31
Şekil 2.10 Seri arızanın gösterimi.	35
Şekil 2.11 Seri arızada yansıyan dalga.	36
Şekil 2.12 Şönt arızanın eşdeğer devresi.	37
Şekil 2.13 Şönt arızada yansıyan dalga.	37
Şekil 2.14 Muf noktasındaki yansıyan dalga.	41
Şekil 2.15 Her muf noktasındaki yansıyan dalga.	41
Şekil 2.16 Sağlam ve arızalı hat arasındaki fark.	42
Şekil 2.17 Direk mod (İnt. Kyn. 3).	43
Şekil 2.18 Karşılaştırmalı mod (İnt. Kyn. 3).	44
Şekil 2.19 Sinyaller arası fark (İnt. Kyn. 3).	44
Şekil 2.20 Bozunma yöntemi işlemi sırasındaki adımları (İnt. Kyn. 5).	45
Şekil 2.21 Maksimum yöntemi (İnt. Kyn. 5).	47
Şekil 2.22 Minimum yöntemi (İnt. Kyn. 5).	48
Şekil 2.23 Adım gerilim yöntemi (İnt. Kyn. 5).	49
Şekil 2.24 Büküm Alanı Yerleştirme Yöntemi (İnt. Kyn. 5).	50
Şekil 2.25 Akustik arıza tespit yöntemi (İnt. Kyn. 5).	52
Şekil 3.1 Darbe gerilim yöntemi şeması.	54
Şekil 3.2 Yeraltı kablolarının arıza tespit cihazının şeması.	57
Şekil 3.3 Basit transformatör şeması.	58
Şekil 3.4 Marx jeneratörünün şarj ve deşarj devre şeması.	62
Şekil 3.5 Gerilim katlama devresi	63

Şekil 3.6 20F160 kodlu diyotu görseli.	64
Şekil 3.7 250VAC – 400VDC 100µF kondansatör.	65
Şekil 3.8 Gerilim katlama devresinin örnek bir LTspice simülasyonu.	65
Şekil 3.9 Gerilim katlayıcı devrenin simülasyondaki gerilim (KV)-zaman(sn) grafiği.	66
Şekil 3.10 100µF kondansatör ile yapılmış olan simülasyonun grafiği.	67
Şekil 3.11 1µF kondansatör değeri ile yapılmış olan simülasyon grafiği.	67
Şekil 3.12 Darbe üretimi için tasarlanmış olan şematik gösterimi.	69
Şekil 3.13 Darbe jeneratörünün yüksek gerilim kondansatörü.	70
Şekil 3.14 Kontaktör.	71
Şekil 3.15 İzolasyon transformatörü.	72
Şekil 3.16 İzolasyon transformatörü ile yapılan simülasyon sonucu.	73
Şekil 3.17 Yüksek gerilim üretecek olan cihazın şeması.	74
Şekil 3.18 Mikrodenetleyici (MCU).	75
Şekil 3.19 Mikrodenetleyici kartı blok şeması.	76
Şekil 3.20 Darbe jeneratörü kontrol kartının resmi.	77
Şekil 3.21 nRF24L01+ modülü.	78
Şekil 3.22 Darbe jeneratörü kontrol kumandasının şeması.	79
Şekil 3.23 Kontrol kumandası kartının PCB çizimi.	79
Şekil 3.24 Darbe jeneratörünün kontrol kumandasının görüntüsü.	80
Şekil 3.25 Darbe jeneratörüne ait kontrol kumandasının akış diagramı.	85
Şekil 4.1 Darbe jeneratörünün nihai devre şeması.	86
Şekil 4.2 Şarj direnci eklenmiş ve eklenmemiş devrelerin simülasyonu	87
Şekil 4.3 En yüksek gerilim değerine şarj esnasındaki direnc üzerindeki güç değeri ...	87
Şekil 4.4 Kondansatörü şarj direnci.	89
Şekil 4.5 Güncellemelerden sonraki gerilim testi	90
Şekil 4.6 Şarj grafiğinde gerilim ve akım grafiği.	94
Şekil 4.7 Yüksek gerilim şarj esnasındaki akım ve gerilim grafiği.	95
Şekil 4.8 Arıza tespitinde kullanılacak olan darbe jeneratörünü cihazı	96
Şekil 4.9 Darbe jeneratörünün test düzeneği.	97
Şekil 4.10 Darbe jeneratörünün test düzeneği ve ark küresi.	98
Şekil 4.11 Şarj edilen gerilim ve depolanan enerji miktarını gösteren grafiktir.	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

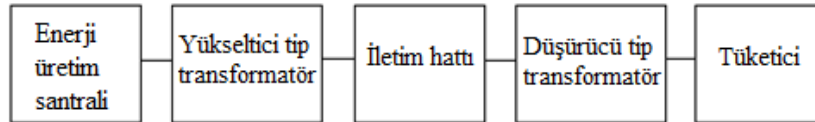
	Sayfa
Çizelge 1.1 Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.....	2
Çizelge 2.1 Arızaların karakteristiğine göre incelenmesi.	19
Çizelge 2.2 Malzeme özelliklerine göre yayılım hız değerlerinin tablosu.....	30
Çizelge 2.3 PVC izoleli özellikli kabloların kesitine göre endüktif değerleri (XL).....	33
Çizelge 2.4 XPLE izoleli özellikli kabloların kesitine göre endüktif değerleri (XL). ...	33
Çizelge 2.5 Seri arızalarda, arıza direncine göre yansıma değeri tablosu.	38
Çizelge 2.6 Şönt arızalarda, arıza direncine göre yansıma değeri tablosu.	38
Çizelge 2.7 Kesit alanına, malzeme tipine ve mesafeye bağlı direnç tablosu.....	39
Çizelge 3.1 Piyasada bulunan örnek transformatör özellik tablosu.	59
Çizelge 3.2 Transformatör için gereken denklemler ve tanımları.....	59
Çizelge 3.3 Denklemlerde kullanılan sembollerin ifadeleri ve birimleri.	60
Çizelge 3.4 Solid State şirketinin 20F160 kodlu diyot.....	64
Çizelge 3.5 İşlemcinin özellikleri.....	76
Çizelge 4.1 Gerilim ve enerji tablosu.....	99
Çizelge 4.2 İstenilen enerji ve depolanan enerji arasındaki fark tablosu	100
Çizelge 5.1 Piyasa cihazların özelliklerinin karşılaştırma tablosu	103

1. GİRİŞ

1760'lı yıllarda meydana gelen sanayi devriminden sonra dünya üzerinde enerjiye ihtiyaç her geçen gün artmıştır. Artan ihtiyacı karşılamak maksadıyla öncelikli olarak fosil yakıt dediğimiz geri dönüşümü olmayan diğer bir tabir ile yenilenemeyen enerji kaynaklarıyla sağlanmaktadır. Günümüzde ise yenilenebilir enerji kaynağı dediğimiz güneş, rüzgâr, biokütle, jeotermal, hidrolik, hidrojen ve dalgalardan faydalanarak doğanın bize sunduğu imkanlar değerlendirilmeye başlanmıştır.

Artan bu enerji ihtiyacı sadece ülke içerisinde kalmayıp başka ülkelere elektrik enerjisi ihraç etme sektörünü de doğurmuştur. Bununla beraber her ülkenin frekans ve gerilim seviyesi farklı olmasından dolayı üretilen enerji ya ihraç edilecek ülke standardına göre üretilmeli ya da belli bölgelerin aynı frekans ve gerilim değerlerini kullanması gerekmektedir. Bu amaçla ülkemizde Avrupa Elektrik İletim Koordinasyonu Birliği olan UCTE tarafından istenen standardı sağlamaya çalışılmaktadır.

Elektrik enerjisinin üretiminden tüketiciye kadar olan kısmı 4 bölüme ayırabiliriz. Bunlar; enerji üretim santrali, yükseltici ve düşürücü transformatörler, iletim hattı ve tüketicidir. Şekil 1.1'de diagram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Enerji iletim hattı diagramı.

Enerji üretim santralinin birden fazla çeşitleri vardır. Bunları yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynağı olarak iki başlık altında toparlayabiliriz. Yenilenebilir enerji kaynakları doğada bulunan ve tüketilemeyen, sürekli olarak kullanılabilen enerji kaynaklarıdır. Yenilenemez enerji kaynakları ise tüketildiğinde azalan ve tekrardan kullanılamayan kaynaklardır. Bu kaynakların dünya üzerindeki miktarları bellidir ve belli bir zaman sonra tüketime bağlı olarak bitecektir. Çizelge 1.1'de görülmektedir (Koç 2013).

Çizelge 1.1 Enerji kaynaklarının sınıflandırılması.

Yenilenemez Enerji Kaynakları	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
1-Fosil kaynaklı	Hidrolik
Kömür	Güneş
Petrol	Biyokütle
Doğal gaz	Rüzgâr
2-Çekirdek kaynaklı	Jeotermal
Uranyum	Dalga
Toryum	Hidrojen

Termik, rüzgâr, hidroelektrik gibi santrallerde üretim genel olarak senkron makine üzerinden üretilir. Senkron makinenin fiziksel olarak dönüşü sayesinde üzerinde bulunan sargılardan 10-15kV elektrik enerjisi işletmenin müsaade ettiği frekans değeri aralığında üretilerek yükseltici transformatör bağlanır.

Elektrik enerjisi yükseltici transformatör ile Türkiye’de genel olarak 154/380kV gerilim seviyesine çıkartılarak iletim hattına bağlanır.

Elektrik enerjisinin üretildiği yer ile tüketiciyi birleştiren ve bu enerjiyi taşımaya yarayan kısma elektrik nakil hattı veya iletim hattı denir. Enerji nakil hatlarında kullanılacak olan kablo, taşınacak olan enerjinin miktarına, üretim ile tüketim arasındaki uzaklığa bağlı olarak farklı gerilim seviyelerinde, farklı tip tel ve kesitleriyle taşınırlar. Yükseltilmiş olan gerilim buna uygun kablo, direk, izolatör gibi malzemeler ile güvenli bir şekilde şehir dağıtım merkezleri olan transformatör merkezlerine iletim sağlar.

Transformatör merkezlerinde ise düşürücü transformatör ile tekrardan gerilim seviyesi orta gerilim veya alçak gerilim diye tabir ettiğimiz seviyeye çekilerek tüketiciye ulaştırılmıştır. İhtiyaç duyulan bu enerjinin iletimi havai hat veya yeraltı hattı üzerinden tüketiciye ulaştırılır. Açık arazi ortamlarında, dağlık arazilerde şehir girişlerine, dağıtım merkezlerine kadar genellikle havai hat kullanılır. Yeraltı hatları ise genelde havai hat için mesafenin fazla olduğu akarsu havzasında, şehir içlerinde kullanılır.

Havai hatlar üretilen enerjinin tüketiciye ulaştırılmasında en çok kullanılan hattır. Havai hat ekonomik açıdan yeraltı kablosuna göre daha maliyet etkindir. Bu avantajının yanında sel, yağmur, yıldırım düşmesi gibi doğal afetlere karşı olumsuz etkilenmektedir. Havai hatların genel olarak avantajları şunlardır;

- Havai hatlar ekonomik açıdan maliyet etkindir.
- Arıza tespiti kolaydır.
- Bakımları kolaydır ve kısa zamanda onarılabilir.
- Dağ, orman, uçurum gibi engebeli arazilerde kullanımı kolaydır.
- Kurulan direklerin altlarında tarım, hayvancılık gibi işler yapılabilir.

Bunlara rağmen dezavantajları da mevcuttur. Bunlar;

- Çevre koşullarından kolayca etkilenebilirler.
- Görsel kirliliğe neden olabilirler.
- Taşıdıkları yüksek gerilim sebebiyle çevreye elektromanyetik dalga yayarlar.
- Ormanda kullanılan hatlarda meydana gelebilecek kopmalar yangına sebebiyet verebilmektedir.
- Alçaktan uçan hava araçları için potansiyel tehlikedirler.

Yeraltı hatları ise havai hatlar ile iletimin kullanılmadığı, şehir içlerinde veya boğaz gibi havzalarda kullanılır. Kurulumunda direk ve diğer malzemelerin kullanımına ihtiyaç yoktur. Bundan dolayı bazı görüşlere göre görüntü kirliliği yoktur. Yeraltı kablolarının genel olarak avantajları şunlardır;

- Şehir içlerindeki kötü görüntüyü azaltır.
- Hava olaylarından etkilenmez.
- Bakıma ihtiyaçları yoktur.
- Yerleşim bölgelerinde daha güvenlidir.

Dezavantajları da şunlardır;

- Kurulum maliyetleri oldukça yüksektir.
- Arızanın tespit edilebilmesi zordur.
- Arızanın onarımı normale göre zordur.
- Uzun süreli ömrü olduğundan bakım gerektirmez.

Yeraltı kablolarının çok pahalı olması, olası bir arızanın yerinin tespiti ve tamirinin karmaşıklığı nedeniyle daha çok üst kablolar kullanılmaktadır. Bununla birlikte, karmaşık havai kablolama şeması nedeniyle daha güvenli enerji iletimi sağlamak ve şehrin estetiğini bozmamak için bazen şehir merkezlerinde yer altı yüksek voltajlı elektrik hatları tercih edilmektedir.

Kabloların yeraltına çekilmesi daha güvenli olsa da oluşabilecek arızaların belirlenmesi, yerinin bulunması, kısa zamanda onarılıp enerjinin tekrar tüketiciye ulaştırılması güçtür. Bu zorluk maliyet ve zaman olarak üretici ve tüketiciyi etkilemektedir. Bundan dolayı yeraltı kablolarında meydana gelen arızaların kısa zamanda bulunması ve onarılması konusunda çeşitli çözümler araştırılmış ve denenmiştir.

Bu çalışmada arızaların çözülmesi için yurtdışından gelen ve maliyeti yüksek olan arıza tespit cihazının yerlisinin üretilmesi konusunda araştırma, geliştirme ve örnek prototip cihazı geliştirdik. Cihazımız yeraltı kablosu üzerine maksimum 8kV 2000 joule kadar enerji ve gerilim verebilen, uzaktan kontrollü olup ister otomatik tetikleme ister manuel tetikleme seçenekleri ile tekerlekli bir cihazdır. Taşınması ve hareket ettirmesi de imkanlar dahilindedir. Arızalı kabloya verilen bu enerjinin, arızanın olduğu yerde atlama yaptırması sonucu kablolardan ark sesi çıkmaktadır. Bu ses hassas kulaklık ile takip edilip arızanın kesin olarak yerinin bulunması sağlanmaktadır. Böylelikle tüm hat boyu yeraltı kablosunun kazılması yerine noktasal olarak arızanın yeri tespit edilmiş olup, arızanın giderilme süresi ve maliyeti düşürülmüştür.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Kablo üretim fabrikaları oldukça maliyetli ve uzun yıllık yatırımlardır. Fabrikalarda veya iletilen yerlerde iş sağlığı ve güvenliği, işletmenin maliyet etkinliğinin sağlanabilmesi için kabloların üretilen enerjiyi en kaliteli ve en az arızalı şekilde yani kesintisiz olarak iletmesi çok önemlidir. Bu gibi maddeler sebebiyle kablolar için; üretim, kurulum ve işletme aşamalarında yaşanabilecek arızaların en az olması dikkat edilmesi gereken hususların başında gelmektedir. Bunlara rağmen yine de bazı hatalar üretim, kurulum veya işletme esnasında mekanik veya elektriksel olarak gözükmemektedir.

Bu arızaların daha erkenden fark edilebilmesi için yurtdışında periyodik olarak belirli zamanlarda kabloları gerilim verilerek ömür testi veya iletim testi yapılmaktadır. Ancak bu uygulama ülkemizde yapılmamaktadır. Bundan dolayıdır ki oluşabilecek herhangi bir arızada, arızanın yerinin en kısa sürede bulunup onarımının gerçekleştirilmesi kritik bir konudur.

Arızanın kısa sürede bulunabilmesi hem tüketici hem de üretici ve işletmeci açısından faydalı bir durumdur. Maliyetler düşecektir, zaman kazanılacaktır, memnuniyet artacaktır, işletme devamlılığı olumlu yönde etkileyecektir, güvenilirliği arttıracaktır.

İletim hatlarında karşılaşılan arızaların çoğu AG kablo arızaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu arızaların yerinin bulunması ile ilgili birçok araştırma ve çalışma yapılmaktadır.

Endüstri alanında kullanılan YG kablolarda oluşan arızaların tespiti için “Yürüyen Dalga Modeli” ilkesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Beyer vd. 1982). Lakin bu uygulamalar maliyet açısından pahalı olarak değerlendirildiğinden ve iletim hatlarının bulunduğu arazilerde uygulaması kolay olmadığından AG ve OG kablolardaki arızalar içinde değerlendirilmemektedir.

Yürüyen dalga modeli ile yüksek frekanslı bir sinyali işleyip görüntüleyebilen bir osiloskop ile elektromanyetik saçılma veya gürültüyü tespit edebilen YG kablusunun arıza tespiti için kullanılabilecek arıza bulma dedektörü geliştirmişlerdir (Weeks ve Steiner 1982).

Yeraltında kullanılacak olan kablolar için verilen darbenin gittiği ve geldiği yani yansıma süresinin hesabı ile arızanın yeri ve türü konusunda ön bilgilendirme yapılabilen Darbe Yansıma Yöntemi (PET) uygulamaları üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Clegg 1993). Bu tekniğinde dezavantaj olarak değerlendirebileceğimiz durum ise oluşan sinyalin analizi için tecrübeli birinin olması gerektirmesidir.

İletim hattındaki kabloların iki ucundan birinin “Gaz yalıtımlı sistemler” (GIS) kısmına bağlı olabileceği durumlarda en çok kullanılan arıza tespiti yöntemlerinin çoğunun kullanılamayacağını belirtilmiştir ve buna karşın “Yürüyen akım dalgası” methoduna dayanan yeni nesil bir arıza tespit cihazı üzerinde çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Komodo vd. 1991). Bilinen yöntemlerin kullanılamama nedeni ise GIS sistemlerinde kablo bağlantıları kapalı metal blok hücrelerdir. Dolayısıyla arıza tespiti yapacak olan cihaza bağlantı yapmak genel anlamda zordur veya sınırlıdır. Bu yüzden GIS sistemlerinde arıza tespiti standart yapılar ile yapılamamaktadır.

Bir diğer çalışmada, genel manada yüksek gerilim kablolarına uygulanabilen “Yansıyan dalga” metodu ile AG kablolarındaki arızalar tespit edilmesi için bir cihaz geliştirilmiştir. Kablonun empedans ve yalıtkanlığını sağlayan dielektrik malzemenin geçirgenliği incelenip metot üzerindeki etkisi incelenmiştir (Potivejku vd. 2000). Bir dalganın havadaki hareketi esnasındaki hızı ışık hızı olarak tabir ettiğimiz yaklaşık 300×10^6 m/s’dir. Ancak yansıyan dalga metodu kablolar üzerinde kullanılmasından dolayı kablonun çevresinde bulunan yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti ϵ_r değeri havanınkinden farklıdır ve dalga havadakinden farklı bir yayılım göstermektedir. Buna göre;

$$v = \frac{v_s}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

V_s : ışık hızı (300×10^6 m/s)

V : yayılan dalganın hızı

Olarak değerlendirilmektedir. Üretilmiş olan kabloların dielektrik sabiti birbirinden farklı olabilmektedir. Bu da bize şunu göstermektedir. Her kablonun yayılım değeri birbirinden farklıdır ve bu kablonun yalıtım malzemesine bağlıdır. Örneğin PVC kablolar için bir değerlendirme yapmak gerekirse yaptıkları uygulamada bu kablodaki yayılım değerini yaklaşık $165 \times 10^6 \frac{m}{s}$ olarak değerlendirmişlerdir.

Böyle çalışmaların yanı sıra modelleme üzerinde de birçok çalışma vardır. İletim hatlarının nonlinear sistem modeli çıkartılmıştır ve Levenberg–Marquardt gibi verilerin optimize edilmesine yardımcı olan bir algoritma ile yapay sinir ağı kullanılarak doğru ölçümlerle desteklenmiştir (Wang ve Hou 2004). Sistemin teorik modeli, arızalı bir kablo bulunan şebekeden, arıza bilgileri toplandıktan sonra modellenmiştir. Bu model Matlab Simulink programı kullanılarak modellenmiştir ve simülasyonu yapılmıştır. Bu simülasyon ile gerçekte uygulanan arıza tespit sisteminin sonuçları karşılaştırılmış ve birbirlerini destekler nitelikte sonuçlar elde edilmiştir. Arızanın olduğu mesafeyi %0,3 hata payı ile doğru tahmin edip modelin doğruluğunu kanıtlamışlardır.

Arızaların meydana geldikleri yerin belirlenmesinde kullanılan yapay sinir ağı modelinin verimini arttırmak için “Hata önleyici veri füzyon yöntemi” kullanılmıştır (Wang ve Hou 2005). Kablo sistemi basit olmayan ve doğrusal özellik göstermeyen bir sistem olduğundan ölçülen verilerin doğruluğu veya güvenilirliği yapay sinir ağlarının girdisi olarak çok önem arz etmektedir. Ağın kalitesinin artması için orijinal ve doğru veriler ile araya karışmış olan yanlış veya hatalı ölçümler birbirinden ayrılmalıdır. Elde edilen bu verilerin hataya olan eğilimleri “Dalgacık” algoritması ile ayrıştırılmaktadır. Sonuçta yapay sinir ağı kullanılarak oluşturulmuş modelin çıktısı gerçeğe yakındır ve hatalar tahmini sınırlar içerisinde kalmayı başarmıştır.

Kablodaki arıza yerinde bir ark oluşturmak içinde çalışmalar yapılmaktadır ve bu ark süresinin uzatılmasına yönelikte çalışmalar mevcuttur. Geliştirilen cihaz, ilk olarak ark çıkarmak amacıyla enerjiyi kabloya verir ve ark bitmeden yeniden bir ark daha vererek

arkı devam ettirmeye çalışmaktadır. Bu cihaz yürüyen dalga modeli olarak adlandırılan yöntemi baz alarak üretilen “Darbe akım yöntemi” yani ICM ve “Darbe gerilim yöntemi” yani IVM kullanım alanı genişlemektedir. ICM ve IVM yöntemleri kablolarda oluşan zedelenme gibi empedans değeri yüksek olan arızaları bulmada çok etkindir. Buna rağmen okunan darbenin şeklinin yorumlanması kolay değildir ve tecrübe gerektirmektedir. Bu durumu da kolaylaştırmak için “İkincil darbe yöntemi” yani SIM üzerinde çalışmalar yapılarak geliştirilmiştir. Yüksek gerilim kabloya verilirken oluşan arkta faydalanılarak düşük gerilimli bir sinyal kabloya verilir ve yansıyan sinyal okunur. Yani yöntemin temeli kabloda bir ark varken bir sinyal daha verebilmektir. Ark süresi normal süresi olan 100µs’nin üzerine çıkmayı amaçlamıştır. Arazideki uygulamalarda görülmüştür ki, mekanik kontaktör dediğimiz selenoidler gibi malzemelerden dolayı ark stabil ve kararlı durumda değildir. Bu da sistemde, başlangıçta okunan değerde parazitli ve gürültülü bir sinyal olarak gözükmektedir. Bu sorunları da çözmek için iki alternatif üzerinde durulmuştur.

- Düzenli ve stabil bir ark jeneratörü
- Ark süresinin uzatılması ile stabilitenin yakalanması

Bunlara ek olarak da sinyalin gönderildiği an da bir o kadar önemlidir. Bu sorunları çözmek adına ark süresini uzatmayı amaçlayan bu cihaz laboratuvar ve arazi ortamındaki testlerde başarılı denilebilecek sonuçlar vermiştir.

Bir diğer çalışmada ise “Murray döngü yöntemi” ve “Darbeli radar yöntemi” kablo arızalarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen arızayı bulmak için hattın devreden çıkarılması, çok fazla zaman ve çaba gerektiren ölçüm cihazlarının bağlantısının yapılması gibi sebeplerden ötürü hem üretici hem tüketici açısından memnun olunmayan bir çözümdür. Fiber optik dağıtılmış sıcaklık sensörünü (FODT) kabloya entegre ederek arızanın yerini bulmak amaçlanmıştır (Zhang vd. 2000). Direnç topraklamalı güç sisteminde XLPE izoleli yeraltı kablusunun arıza tespiti için uygulanan FODT sensörü arıza noktasını anında bulabilmektedir. Ancak bu cihaz ve uygulamanın da mesafe gibi bir problemi mevcuttur.

Bir kabloda bir arıza meydana geldiğinde, arıza gerilimi, arıza akımı, ortaya çıkan arıza empedansı ve konum arasında belirli ilişkiler vardır. Bu nedenle, bir girdi uzayını bir çıktı uzayına eşlemenin etkili bir yolu olan bulanık mantık ile ilgili olarak, basitçe temsil ederek (diğer yapay zekâ sistemlerine kıyasla) verimli, ekonomik ve uyarlanabilir bir yöntem olarak hata lokasyonunda kullanılabilir. Arızanın yerinin tespiti için gereken yaralı bilgiler için dalgacık teknolojisine dayalı gelişmiş sinyal işleme tekniğini kullanan yeni bir arıza yeri belirleme tekniği kullanılmıştır. Tek çekirdekten oluşan bir dağıtım sistemindeki bozuklukları tanımlamak ve bulmak için bulanık mantığa uygulanmaktadır. (Moshtagh ve Aggrawal 2004).

Yeraltı sisteminin arızasının baz istasyonundan tam mesafesini belirlemek için çok faydalı olacak iki yöntem bu araştırmada sunuluyor. Yöntemlerden biri Murray döngü yöntemi, diğeri ise Ohm Yasası Yöntemidir. Murray döngü yöntemi, hata konumunun baz istasyonundan tam mesafesini hesaplamak için bileme taşı köprüsünü kullanır ve bunu kullanıcı cep telefonuna gönderir. Ohm kanunu yönteminde ise herhangi bir arıza meydana geldiğinde akım değiştiği için gerilim düşümü kablodaki arızanın uzunluğuna bağlı olarak değişecektir. Her iki yöntem arıza yerini bulmak için gerilim dönüştürücü, mikrodenetleyici ve potansiyometre kullanır (Hans vd. 2017).

Ohm Yasasına göre, sabit sıcaklık ve kesit alanı koşulları altında kablonun direncinin uzunluğu ile orantılı olduğu bulunur. Örnek verebileceğim bu çalışmada, bir mikro denetleyici, LCD ekran, arıza algılama devre modülü, wi-fi Modülü ve düzenlenmiş güç çıkışı ile uygun güç kaynağı düzenlemesinden oluşan bir sistem geliştirilmiştir. Devredeki akım, mikrodenetleyici ile birbirine bağlanan röleler tarafından algılanır. Arıza algılama devresi, her bir direncin yanında bir dizi seri direnç ve anahtar kombinasyonu ile yapılır. Önerilen bu sistem, proteus sürüm 8.1 üzerinde simüle edilmiş ve test edilmiştir. Donanım, simüle edilmiş tasarım temelinde tasarlanmıştır. Sonunda, arıza sadece tespit edilmekle kalmaz, aynı zamanda tam olarak yerde bulunmuştur (Asif vd. 2020).

Elektrikli ekipmandaki bir arıza, akımın amaçlanan yoldan sapması nedeniyle elektrik

devresindeki bir kusur olarak tanımlanabilir. Arızalara genellikle mekanik arızalar, kazalar, aşırı iç, dış stresler ve diğerleri neden olur. Bir kablo arızalı olduğunda, bu tür kabloun direnci etkilendir. Düzeltilemezse, gerilimin kablodan akmasını tamamen engeller. Yeraltı kablolarındaki arızaları tespit etmek için kullanılan mevcut yöntemlerdeki zorluk, arızanın bulunduğu mesafenin hesaplanmasındaki yanlışlık ve bu tür ekipmanların çabuk arızalanmalarıdır. Bu makalede ise, bu zorlukların üstesinden gelmek için kabloun direncini ölçme, kablodaki arızanın türünü tespit etme ve aynı zamanda ucuz malzemeler kullanarak arızanın yerini doğru bir şekilde hesaplama kapasitesine sahip yeni bir yeraltı kablo arıza dedektörü sunmaktadır. Önerilen cihaz kullanılarak birkaç test yapılmıştır ve sonuçlar önerilen yöntemin maksimum 2 km mesafe içinde yer altı kablolarında hem açık devre hem de kısa devre sorunlarını tespit etmede tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermiştir (Dada vd. 2019).

Bir diğer çalışmada ise esas olarak senkronize örnekleme tekniğine, dalgacık analizine ve yürüyen dalga ilkesine dayanan, kablo arızası konumuna geliştirilmiş bir yaklaşım önermektedir. Yeni şemanın ana hatları ve üç ana tekniğe kısa bir girişten sonra, bu özel uygulama için en iyi dalgacık seviyelerini belirlemek üzere hatalı geçici dalga biçimlerinin dalgacık analizi ayrıntılı olarak yürütülür. Ardından, yaklaşımı tam olarak değerlendirmek için çeşitli sistem ve arıza koşulları altında Alternatif Geçici Program (ATP) tarafından simüle edilen 400 kV'luk bir yeraltı kablo sistemi kullanılır. Sayısal sonuçlar, bu şemanın kablo hattı uzunluğunun %2'sinden daha az hata ile güvenilir ve doğru olduğunu göstermektedir (Zhao vd. 2001).

Ayrık dalgacık dönüşümü kullanımına dayalı olarak yer altı kablo sistemlerinde geçici arızaları tespit etmek ve sınıflandırmak için yeni bir yöntem sunmaktadır. 400 kV'luk bir yeraltı kablo sistemi, ATP/EMTP (elektro-manyetik geçiş programı) ile çeşitli sistem ve arıza koşulları altında simüle edilmiştir. Daubechies sekiz dalgacık dönüşümü, yeni bir arıza tespiti ve sınıflandırma şemasının geliştirilmesi için arıza geçişlerini analiz etmek için kullanılır. Simülasyon sonuçları, bu şemanın etkili ve sağlam olduğunu göstermektedir (Zhao vd. 2000).

Bu makale, her kabloun iki terminalinde senkronize dijital arıza kaydı verileri mevcut

olduğunda, eski kablo sistemleri için yeni bir dalgacık tabanlı arıza yeri şeması sunar. Önerilen şema, güçlü bir sinyal işleme aracı olarak dalgacık tekilliği algılama teorisini kullanarak çok uçlu eski kablo sistemlerinde arıza yerini tahmin ediyor. Birinci ve ikinci gerilim ileten dalgaların güç kablolarının her iki ucuna gelişi güvenilir bir şekilde belirlenebilir. Geliştirilen dalgacık işleme şeması faz koordinatları yerine modal koordinatlara uygulanmıştır. Önerilen şema, hareket eden dalgaların yayılma hızındaki değişikliğin arıza yeri hesaplamaları üzerindeki etkisini ortadan kaldırma yeteneğine sahiptir. Bu, kablo değiştirme parametreleri probleminin, özellikle de kablonun göreceli geçirgenliğinin yaşla birlikte değişmesi sorununun çözülmesine yardımcı olacaktır. Yöntem, baralara çok yakın olan arızalarda bile geçerlidir. Önerilen arıza yeri şemasının özellikleri, Alternatif Geçiş Programı/Elektromanyetik Geçiş Programı kullanılarak kapsamlı simülasyon çalışmaları ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, önerilen hata bulucu için kabul edilebilir bir doğruluk derecesini gösterir (Gilany vd. 2007).

Yeraltı kömür madenlerinde güç kablosu arıza noktasının doğru ve hızlı tespiti ilgili teknisyenlerin ilgisini çekmiş olup, üzerinde çalışılması ve çözülmesi gereken acil bir sorundur. Yazarlar, köprü yöntemini kullanarak güç kablosu arıza tespit devreleri tasarlamışlardır. Bu makale, tek fazlı açık devre, iki fazlı kısa devre, tek fazlı topraklamanın arıza noktalarını hızlı ve doğru bir şekilde tespit edebilen devre şemasını sundu. Yazarlar, kablo arıza noktaları tespit devresinin doğruluğunu doğrulamak için tipik iki fazlı kısa devre için arıza noktaları tespitini test ettiler. Bu yazıda, deneysel veriler ve sonuçlar verilmiş ve son olarak kısa devre arıza tespit devresinin hatası analiz edilmiştir (Aihua vd. 2010).

Bu bildiride, yer altı güç kablolarının analizi, kablonun arızasını ve ortalama ömrünü tespit etmek amacıyla Fourier analizi kullanılarak yapılmıştır. Bu deneyde üç tip kablo kullanılmıştır; normal bir kablo, bir kısa devre kablosu ve delikli bir kablo. Her durumdaki empedans hesaplanır ve Fourier dönüşümü uygulanır, böylece ortaya çıkan empedans büyüklüğü ve empedans fazı frekans alanında incelenebilir. Herhangi bir girişimi ortadan kaldırmak için deneysel verilere çeşitli pencereleme teknikleri uygulanır. Fourier analizi daha sonra hem gönderen uç gerilimden hem de diferansiyel gerilimden hesaplanan empedans verilerine uygulanır. Bu analiz, üç farklı kablo tipinin frekans

tepkisindeki farklılıkları ortaya çıkarır ve sonunda arıza tespiti için bir ölçü olarak kullanılabilir. Ön sonuçlar, frekans yanıtındaki farklılıkları ortaya koymaktadır. Buna göre Fourier tipi yöntemler, yer altı kablolarındaki arızaların tespiti ve tespiti için düşük maliyetli ve uygulanabilir çözümler olarak etkin bir şekilde kullanılabilir (Pandey ve Younan 2010).

Enerji iletim ve dağıtım sisteminde yer altı kablo arızalarının oluşması çeşitli sebeplerden dolayı kaçınılmazdır. Güç kaynağının uzun süre kesintiye uğraması, güç dağıtımçıların ve perakendecilerin ciddi gelir kaybına ve müşterilerin rahatsız olmasına neden olabilir. Bu nedenle, arızaların hızlı bir şekilde tespiti ve düzeltilmesi, güç dağıtımçıları ve perakendeciler için önemli bir endişe kaynağıdır. Bu makale, şu anda uygulamada olan bir dizi yüksek gerilim kablo arıza tespit tekniklerini ve araştırma topluluğu tarafından önerilen yüksek hesaplama yöntemlerine dayanan bir dizi son teknoloji ürünü incelemektedir. Belge ayrıca, arıza bulma görevini daha kolay ve daha hızlı hale getirebilen kompakt ve hafif yüksek gerilim arıza tespit makinelerinin tasarım süreci için bazı kılavuzlar sunar (Islam vd. 2012).

Bu belge, yeraltı alçak gerilim dağıtım şebekelerindeki kalıcı arızalar için otomatik arıza tespit tekniğini açıklamaktadır. Sistem, tek fazlı “tee-off”lardan kaynaklanan yansımaları ortadan kaldırmak ve 3 fazlı açık veya kısa devre arızalarını bulmak için Zaman Etki Alanı Reflektometrisi sinyallerini önceden işler. Sistem, hataları bulmak için TDR sinyallerini analiz etmek için uyarlanabilir filtreleme kullanır. Prosedür, yalnızca tipik bir TDR tabanlı arıza tespit cihazı kullanıcısının ihtiyaç duyduğu yorumlama becerisini en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda tek fazlı te'ler ve arızalar arasında ayrım yapar. Yeni yöntemin performansı, gerçek yeraltı alçak gerilim dağıtım şebekelerden elde edilen saha verileri kullanılarak mevcut uygulamaya göre değerlendirilir. AG kablo modellerinde 210 metre mesafeye kadar kaydedilen verilerin analizi de gösterilmektedir (Siew 2003).

Bu yazıda, genelleştirilmiş dağıtım sistemleri için genişletilmiş bir empedans tabanlı arıza konumu formülasyonu sunulmaktadır. Dağıtım fiderlerinin çoğu, birkaç yanal, simetrik olmayan hatlar, oldukça dengesiz çalışma ve zamanla değişen yüklerle karakterize edilir.

Bu özellikler, geleneksel hata yeri belirleme yöntemlerinin performansını tehlikeye atar. Önerilen yöntem, giriş verileri olarak yalnızca yerel gerilimleri ve akımları kullanır. Mevcut yük profili bu ölçümlerden elde edilir. Formülasyon, yük değişimi etkilerini ve farklı arıza türlerini dikkate alır. Sonuçlar, Güney Brezilya'daki Rio Grande do Sul'daki (CEEE-D) Elektrik Enerjisi Dağıtım Devlet Şirketi'nden gerçek bir dağıtım sistemi kullanılarak sayısal simülasyonlardan elde edilmiştir. Karşılaştırmalı sonuçlar, tekniğin arıza tipine ve arıza mesafesi, direnç, başlangıç açısı ve yük değişimi gibi geleneksel arıza yeri problemlerine göre sağlamlığını gösterir. Formülasyon gömülü yazılım olarak uygulanmıştır ve şu anda CEEE-D'nin dağıtım operasyon merkezinde kullanılmaktadır (Salim vd. 2009).

Yeni başlayan kablo arızalarının erken ve doğru tespiti, kamu hizmeti sektörü için büyük ilgi görmektedir. Bu tür arızalar, alt döngü ve çok döngü tipleri olarak sınıflandırılabilir. Alt çevrim tipi arızalar üzerine çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen, çok çevrimli arıza tipleri için çok az çalışma yapılmıştır. Bu makale, bir kabloda çok çevrimli bir başlangıç arızasını tespit etmek ve bulmak için yeni bir yöntem önermektedir. Yeni başlayan arıza, kendi kendini temizleyen bir ark arızası olarak modellenmiştir. Hesaplanan gerilimin bozulma derecesi, yeni başlayan bir arızanın oluşumunu tespit etmek için kullanılır. Ölçülen ve hesaplanan dalga biçimleri arasındaki uyum derecesi, arıza mesafesinin aranmasına rehberlik etmek için kullanılır. Doğruluk, gerilim dalga biçiminde ve güç kaybı karakteristiklerinde görüldüğü gibi başlangıç arıza açısı dikkate alınarak daha da iyileştirilir. Önerilen yöntem PSCAD/EMTDC simülasyonları ile doğrulanmıştır. Önerilen algılama yöntemini daha da doğrulamak için laboratuvar deneyleri de yapılır (Zhang vd. 2017).

2.1 Yeraltında Kullanılan Kabloların Arıza Nedenleri

Her ürün gibi yeraltında kullanılacak olan kablolarında birçok sebepten ötürü arıza meydana gelebilmektedir. Üretim, montaj, baskı, depolama, ömür gibi birçok etmen kabloların arıza sebepleri olabilmektedir.

2.1.1 Üretim Hataları

Dünyada birçok ürün ve konu için belli standartlar tecrübe ile bilim harmanlanarak oluşturulmuştur. Yeraltı kabloları da standartlarda tanımlanan şekilde iletkenlik, izolasyon, belli bir gerilim karşısında direnme ve dielektrik katsayılı kayıp faktörü değerleri gibi isterler neticesinde bu değerlere uygun şekilde üretilirler (Saner 1998). Üretim esnasında meydana gelebilecek olan aksaklıklar sebebiyle oluşacak arızalar veya defolar, test üniteleri ile yapılacak testlerde veya üretim teknisyenlerinin denetimleri ile bulunmaktadır. Üretici yaptığı kabloların aralarından rastgele bir şekilde numune alarak kabloların kalitesini anlamaya çalışmaktadır. Hem tüketici hem de müşteri konumunda olan ülkemizin en büyük elektrik dağıtım şirketi Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş., aldığı alçak gerilim veya orta gerilim kablolarını MYD/96-015 ve MYD/96-018.A gibi standartlara göre numuneleri test etmektedir. Ancak ve ancak bu testlerden başarıyla geçen kabloları sistemde kullanmaktadır.

2.1.2 Kargo, Stok ve Depolamadaki Hatalar

Her bir ürün için muhafaza ve koruma yöntemleri farklı olabilmektedir. Kablolarında kendine özgü koruma yöntemleri vardır. En basit olarak görülecek kısımlar ise zedelenmesini ve hasar görmesini engelleyecek köpük, streç gibi muhafaza ve mukavemeti arttıracak malzemelerin kullanılmasıdır. Bunlarla birlikte tır dorsesine yerleşimi de önemlidir. Kapalı bir şekilde nakliyatın gerçekleşmesi bir o kadar önem arz etmektedir. Çünkü hava koşullarından dolayı oluşabilecek oksitlenme, yıpranma gibi etkilerden muhafaza edilmelidir.

2.1.3 Kablo Montajı Hataları

Kablolar tüm elektrik iletimini sağladıkları için aslında kaba gibi gözükseler de dikkatli davranılması gereken malzeme ve ürünlerdir. Kabloların montajı veya yeraltına serilmesi sırasında yapılabilecek insani dikkatsizlikler uzun vadede bize arıza olarak dönebilmektedir. Yapılan bu dikkatsizlikler kabloların gereğinden fazla bükülmesi, esnetilmesi, kesici ve delici özellikte olan malzemelerin yakınlarından geçerek

götürülmesi gibi sebepler olarak tanımlanabilir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi yeraltı kabloları uzun mesafeler boyunca dikkatli bir şekilde ve aralarında mesafe olacak şekilde tuğlara serilmelidir.



Şekil 2.1 Yeraltı kablolarının döşeme şekli örneği (İnt. Kyn. 2).

Kablo eki olarak tanımlanabilecek olan muflar, kabloları montajı esnasında damarlar için gerekli çapın üzerinde bir çap değeriyle kıvrılması gerekir (Powers 1994). Kabloların serim işlemi bittikten sonra test aşamaları başlatılmalıdır. Yeraltı kabloları güç kullanım etkinliği (ingilizcesi ile “Power Usage Effectiveness”) standartlarına göre (İnt. Kyn. 2);

- 0-1kV gerilim kapasitesine sahip kabloların derinlik seviyesi 40-50cm
- 1-10kV gerilim kapasitesine sahip kabloların derinlik seviyesi 60-70cm
- 10-35kv gerilim kapasitesine sahip kabloların derinlik seviyesi 80-10cm
- +35kV gerilim kapasitesine sahip kabloların derinlik seviyesi 100-120cm olmalıdır.

2.1.4 Mekanik Etkiler Sebebiyle Oluşan Hatalar

Üretilen ve serilmek üzere sahaya getirilen kabloların başına gelen en sık rastlanan hata türlerinden biridir. Dikkatsiz bir şekilde yapılan kazılar, dökülen hafriyat yığınları, yanlış bölgelere yapılan saha çalışmaları gibi birçok sebepten ötürü kablolarda arızalar meydana

gelmektedir ve bu arızalara belki de uzun süreler sonra meydana gelmektedir.

2.1.5 Korozyon

Sadece kargolama ve muhafazadaki eksiklikler nedeniyle değil toprakta bulunan humus asidi, kireç gibi kimyasal özellikte bulunan maddeler etkisiyle de korozyon etkisi görülmektedir. Arazi koşullarına göre veya arazide bulunan toprak özelliklerine göre kablo seçilmelidir. Misal vermek gerekirse kükürt oranı yüksek bir araziye serilmiş olan kırmızı renkteki PVC kablolarda zaman içerisinde siyahlaşma durumu gözlenecektir. Doğru akım kaynakları için serilmiş olan kablolarda elektrolitik korozyon etkisi görülecektir. Akaryakıt istasyonları yakınlarında kullanılmış olan kablolar zamanla zarar görebilmektedir.

2.1.6 Gerilim Darbeleri ve Termik Etkiler

Arızaların en problemli olanı kısa devre arızalarıdır. Bu arıza meydana geldiğinde kablolarda termik etkiler gözlemlenmektedir. Döşeme esnasında, uzaklık kurallarına uyulmadan döşenmiş yeraltı kablolarında, merkezi sistem ile ısıtma ihtiyacını gideren yerlerdeki kablolarda ve ısınan kablolardaki ısıyı aktarmakta güçlük çekilen yerlerde termik etkiler gözlemlenmektedir. Bundan dolayı yeraltı kablolarının döşenecek yerlerin ısı iletkenliği ölçülmelidir ve bölgeye uygun kablo seçilmelidir.

Gerilim darbeleri iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlar iç ve dış etmenler olarak değerlendirilebilir. İç gerilim topraklamanın kesilmesinde ve yapılan anahtarlama işlemleri esnasında oluşabilmektedir. Dış etkiler ise, yere düşen yıldırım veya yüksek gerilim kaynaklarından gelebilecek etkiler olarak değerlendirilebilir. Bu gerilim değerleri kabloların zaaf olarak tabir edebileceğimiz izolasyonun eksik veya hatalı olduğu yerlerde, muf noktalarında veya kablo uçlarında birikir ve gerilim atlaması olarak tabir ettiğimiz arklar meydana gelebilmektedir. Ark olayı daha çok havai hatlarda bulunan bağlantı noktalarında, açık kablolarda veya direnç değişiminden dolayı oluşan yansımalarından dolayı meydana gelmektedir.

2.1.7 Yaşlanma

Kablolar için yalıtkanlık, iletkenlik, dayanım, ömür gibi birçok özelliği için dünya üzerinde birçok test sistemi vardır. Üretilen kablolar her kablo üretildikten sonra ömür testine girmektedir. Bu testler ile istenen standartlar özelinde kablonun izolasyon, iletkenlik, dayanım gibi özelliklerini ne kadar zaman zarfı içerisinde devam ettireceği analiz edilmektedir. Böylece kablo kullanılmadan ömürleri test edilmiş olmaktadır.

2.2 Yeraltı Kablolarındaki Arıza Şekilleri

Kablolardaki zayıflık nereden kaynaklanırsa arıza orada meydana gelmektedir. Kablolarda birden fazla arıza çeşidi ile karşılaşmak mümkündür.

2.2.1 Şönt Arızaları

Kısa devre arızaları olarak da isimlendirilebilecek olan arıza, çok damarlı kablo içerisindeki iletken kısmın normalde temas etmediği bir diğer iletken kısma temas etmesi sonucu oluşmaktadır. Bir diğer sebep ise şase-toprak olarak adlandırılan veya zırh olarak adlandırılan iletken kısma değmesi sonucu oluşmaktadır.

2.2.2 Açık Devre Arızaları

Arıza birimleri arasında seri kablo arızası olarak da adlandırılmaktadır. Kablo içerisindeki iletken kısmın birbirinden ayrılması, kopması sonucu oluşan yüksek empedans değeri sebebiyle iletimin sağlanamaması durumudur.

2.2.3 Nem Arızaları

Kablolardaki zedeli noktalardan kablonun iletken kısmı ile buluşan suyun, bağlantı veya muf noktalarında iletkenler arası kısa devre etmesi sonucu karşılaşılan arızalardır.

2.2.4 Ezilme Bükülme Arızaları

Kabloların dönüş çaplarından daha çok bükülmesi sonucunda yalıtkan kısmının esneyip zayıflamasından dolayı iletkenler arası kısa devre oluşmasını kapsayan arızalardır. Daha çok kablounun yeraltına serilmesi aşamalarında dikkat edilmemesi sonucunda belki de uzun süreler sonra meydana gelebilecek arızalardır.

2.2.5 Kısmi Deşarj Arızaları

Yalıtkan kısmın, ezilme ve esnemeler sonucunda zayıflaması veya bu kısmın üretim sürecindeki eksiklikler sebebiyle içerisine giren hava, yabancı madde veya boşluklar sebebiyle oluşan “picocoulomp” mertebesindeki elektriksel kaçaklardır. Bu kaçaklar kısa süre zarfında büyük arızalara neden olmazlar ancak kabloyu o noktadan daha da zayıflatarak uygun koşullar oluştuğunda kablo üzerinde daha büyük arızaların oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Yani küçük olarak tabir ettiğimiz kaçaklar büyüyerek yalıtkan kısmı daha da deler (Shim vd. 1999).

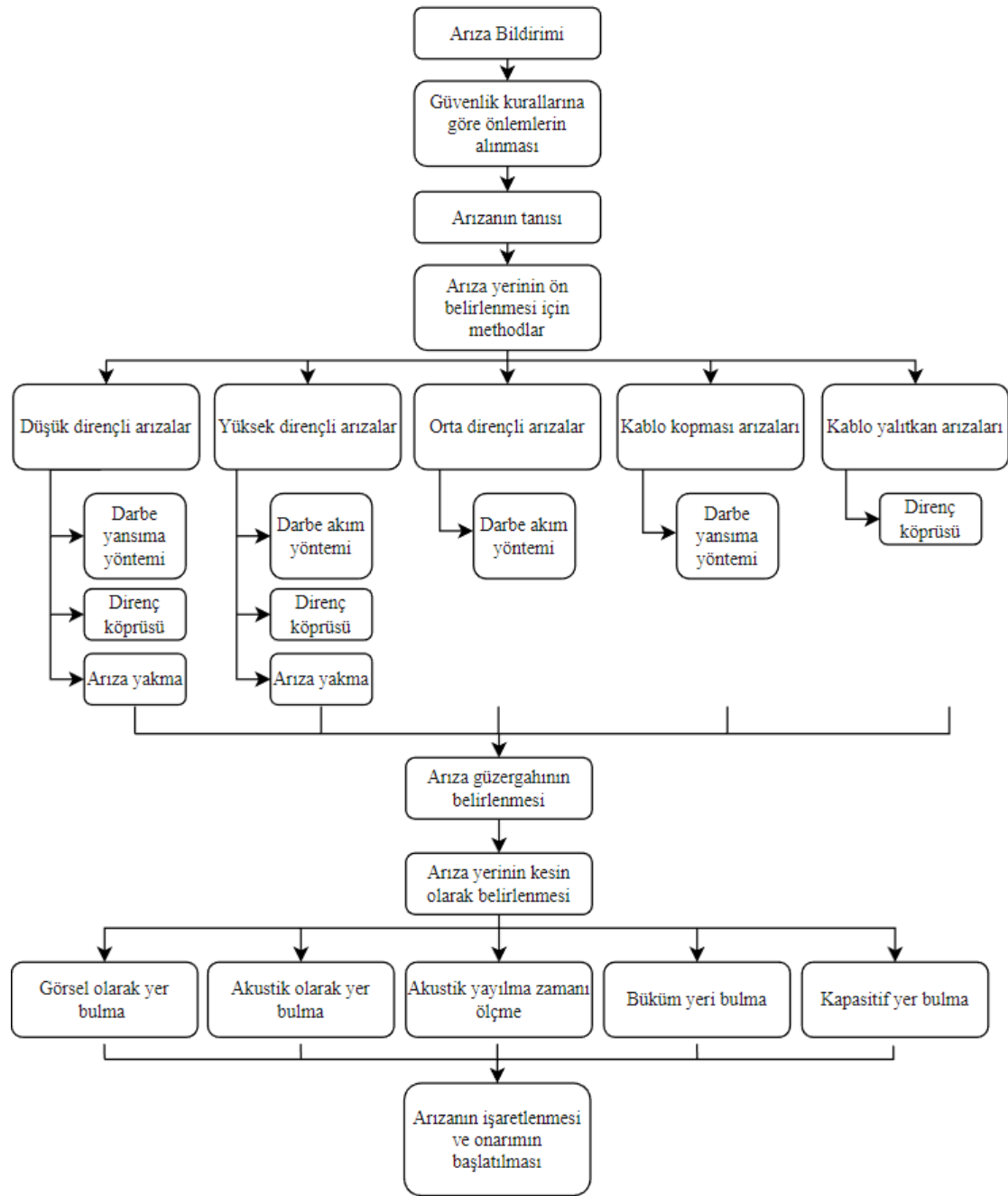
2.2.6 Arıza Tipleri

Kablolarda oluşan arızaların bulunmasını en belirleyici etken arıza tipinin öngörülebilir olmasıdır. Kablolarda oluşan arızalar kısa devre ve açık devre olarak iki ana başlıkta incelense de kendi içlerinde de bazı maddelere ayrılmaktadır. Kablolardaki arızalara elektiksel açıdan çizelge 2.1’deki gibi sınıflandırılabilir.

Çizelge 2.1 Arızaların karakteristiğine göre incelenmesi.

Kısa Devre	Açık Devre
<i>Bir şönt arızasını tespit etmek için bir yalıtım direnci testi gerçekleştirilir. Kablo ucu açık devre olarak kalır.</i>	<i>Bir seri arızayı tespit etmek için süreklilik testi yapılır. Kablo ucu kısa devreli kalır.</i>
Şönt arızalar	Açık devre
1- Mekanik bir hasar kablodaki iç iletkenlerde kısa devre oluşturmuştur. 2- Yanmış kablo izolasyonu, direnç değeri düşüktür, $R < 5 \Omega$, iletken ve zırh arasında kısa devre oluşur. 3- Buharlaşan izolasyon, Kablo içindeki iletken ile koruyucu zırh arasında oluşan bir yol sebebiyle oluşan arızadır.	1- Mekanik bir hasar sonucunda kablounun içerisindeki iletkenlerin, zırhın veya yapılmış olan bağlantıların kopmasına neden olmuştur. 2- Gerilim veya akım sebebiyle bağlantı noktalarında oluşan hasarlar iletimin kopmasına neden olmuştur.
Lineer olmayan arızalar (Gerilime bağlı)	Lineer olmayan arızalar (Akıma bağlı)
1- Gerilim seviyesi 500V değerinden büyükse kablo yalıtkanında delinme gözlenmektedir. 2- Yeraltı kablolarında direnç değeri gerilim seviyesine bağlıdır.	1- Eşmerkezli nötr korozyon 2- Kötüleşen ekleme veya sonlandırma 3- Yanmış iletken 4- Kablonun nemlenmesi veya su girişi sebebiyle kısa devre olup patlaması
Açık devre	
<i>Kabloların sahip olduğu gerilim kapasitesinden daha yüksek bir gerilim darbeleri altında çalışmaktadır.</i>	
1- Mekanik olarak hasar, sonlandırma durumu açık veya bağlantıda kopukluk mevcuttur. 2- Arızadan sonra sigortaların kapatılması sebebiyle kısa devre olmuş kablounun yanması ve yanan kısımdan mekanik olarak kopması	

Oluşan arızaların tiplerine göre arıza yerinin bulunmasında kullanılacak yöntem değişiklik göstermektedir. Şekil 2.2'deki tabloda arıza tiplerine göre kullanılabilecek yöntemler gösterilmektedir (Tekin 2006).



Şekil 2.2 Arızaların yerinin tespiti için akış diagramı.

2.3 Kablolarındaki Arızaların Ön Tespiti

Kablolarda oluşan arızalar için çalışmalar öncelikle basit deneyler ile başlamalıdır. Yapılacak olan bu deneyler neticesinde arıza yerinin tespiti için kullanılacak yöntemin zeminini hazırlanmaktadır. Yapılacak olan basit ön deneyler ile arıza tespit süresi açısından kazanç sağlanmaktadır.

Birçok yöntem bulunan arıza tespit yöntemlerinden herhangi birini seçmeden arızalı olduğu düşünülen kablonun elektriksel olarak analizleri yapılmalıdır. Düşük gerilim seviyesine sahip bir direnç ölçme cihazı ile tüm hatların birbirleri arasındaki direnç ölçümleri yapılır. Ardından yapılacak olan ön çalışmalar izolasyon testi ile devam etmektedir.

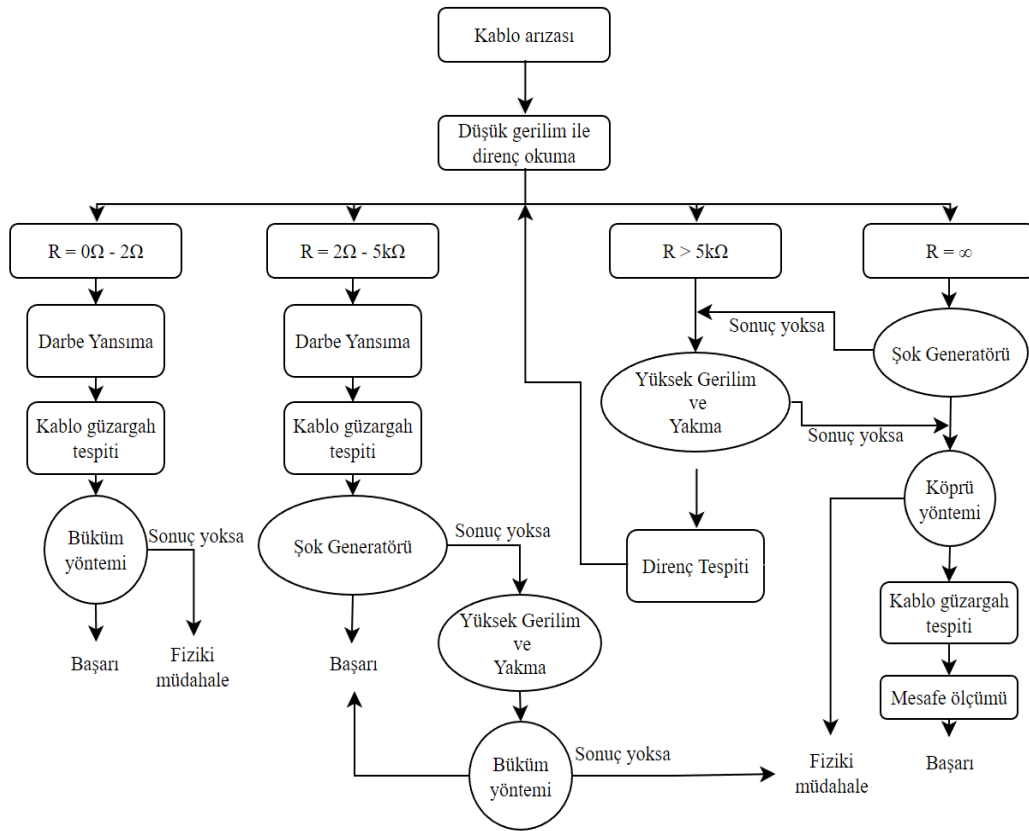
Arıza bölgelerinin bulunmasında direnç ölçümü başlangıç olarak çok önem arz etmektedir. Ön tespit için kullanılacak olan yöntem ile alınan sonuçların yorumlanmasında bizi hataya sokacak olan durumlardan kurtarmaktadır.

Örneğin arızalı bir kablo üzerinde yapılacak olan çalışmalarda kullanılan darbe yansıma ölçeri ile kablonun ilk durumu incelenecektir. Yalıtım direncinin tespiti sırasında arızalı kabloya uygulanacak olan yüksek gerilim zayıflamış olan izolasyonu tamamen ortadan kaldırarak delinmeye sebep olabilmektedir. Bu delinme ile kısa devre hatası meydana gelmektedir. Bundan dolayı darbe yansıma ölçen cihazının göstermiş olduğu arızasız durumu, yalıtım deneyinde arızalı olarak gözlenebilmektedir. Bu da kablo hakkında yanlış bulgular edinmemize sebep olmaktadır.

Bir diğer durum ise arızalı kabloya uygulanacak olan izolasyon testi arızanın mevcut durumunu değiştirebilmektedir. Ender görülen hatalarda da olsa arızalı bölgede oluşabilecek küçük akım akışları sebebiyle arıza durumu belirsizleşebilir. Bu nedenle ilk olarak düşük gerilim seviyesine sahip bir ölçü aleti ile tüm hatların kendi arasında ve toprak ile olan direnç değerlerine bakılmalıdır. Eğer bu durum bize fikir vermiyorsa izolasyon testi ancak o zaman yapılmalıdır.

Direnç ölçüm işlemi tamamlandıktan sonra ise kablonun kopup kopmadığını anlamak için hattın sonu bir diğer hatta veya toprağa kısa devre edilmelidir. Bu testten anlamlı bir sonuç elde edilebilmesi için kablonun uzunluğu ve elektriksel özellikleri bilinmelidir. Kablo iletkenleri arasındaki direnç dengesizlikleri bize hattaki seri olan bir sorunu göstermektedir (Tekin 2006).

Bu deneylerden sonra darbe yansıma ölçer ile kablo incelenebilmektedir. Bu deneyler sırasında hattaki direnç değerleri çok düşük veya çok yüksek ise darbe yansıma cihazı da arızayı göstermeyecektir. Kablodaki direnç seviyeleri ölçülürken bir hata ile rastlanmadığında ve bu yöntem kullanılırken bir hata ile rastlanıyorsa hata zırh dediğimiz kısımda mevcut olabilir. Bu incelemeler ile alınan sonuçta hata algılanabilir durumda ise ön belirleme yapılabilmektedir. Kablolar üzerinde uygulanan ön çalışmalar ile edinilen bilgiler ve direnç değerleri göz önüne alındığında ilerlenebilecek yollar şekil 2.3’ de gösterildiği gibi olabilmektedir (Tekin 2006).



Şekil 2.3 Arıza tespit akış diagramı.

Arızaların bulunmasında kullanılacak olan yöntemler maliyet, zaman, imkân ve risk seviyesi olarak değerlendirildikten sonra belirlenmelidir. Bu risklerin içerisinde test işleminin yapıldığı gerilim seviyesi de mevcuttur. Yöntemler ve kullanılabilecek yerleri listeleyen şekil 2.4’te gösterilmektedir.

	Kısa devre, cıvatalı arıza	Açık iletkenler, eş merkezli nötr korozyonu	Yağ veya su ıslanmış arızalar	YG parlama arızaları, yüksek direnç arızaları	İletken ile şase veya toprak arasındaki arızalar	Aşırı YG parlama arızaları, sürekliliği olmayan arızalar
Klasik ZAER	X	X				
Karşılaştırmalı ZAER	X	X				
Dalgalanmalı ark yansıma yöntemi			X	X		
Anlık darbe yöntemi	X		X	X		
Yakma arkının yansıma yöntemi			X	X	X	
Voltaja bağlı bozunma yöntemi			X			X
Köprü yöntemleri	X		X		X	

Şekil 2.4 Yöntemler ve uygulama yerleri.

ZAER ve köprü yöntemleri, en yüksek fayda ve maliyet oranıyla arıza tespitine izin verir. Ancak ZAER ve köprü teknikleri ile arıza tespiti tüm kablo tesisatları için mümkün değildir. Güçlü vurucular ve alternatif akım veya doğru akım yakma setleri, arızalı kablo sistemine arıza akımları enjekte eder. Arızaya giden arıza akımı sinyalini takip etmek için AC, DC veya darbe (dalgalanma) izleme cihazları kullanılır. Akım izleme teknikleri kullanılırken, kablo arızasını saatlerce veya günlerce düşük dirençli bir duruma getirmek için bir örtmece olan arıza koşullandırma genellikle gereklidir. Akım izleme yöntemleri oldukça yıkıcıdır ve arıza çevresinde kablo sistemi yangınlarına neden olabilir.

2.3.1 Oluşan arızanın belli bir alana indirgenmesi

Herhangi bir arızanın olduğu bölgede çeşitli deneyler ve ekip çalışmaları ile birlikte meydana gelmiş arıza belli bir alana indirgenmek istenmektedir. Bu daraltma çalışmaları kapsamında sigorta diye tabir ettiğimiz ayırıcı özellikli malzemeler çokça kullanılmaktadır. Eğer böyle malzemeler yoksa fiziki olarak kablonun kesilip denenmesi gerekmektedir. Her iki yöntemle de amaç arıza noktasını bulmaktır.

Hattaki arızayı bulmak için çalışmalar bölüm bölüm ilerletilerek daraltılmaya çalışılmaktadır. Hatasız olarak görülen kablo bölümleri diğer sistemden yalıtılarak diğer

kısmı tekrar enerji verilmek suretiyle çalışmalar devam etmektedir. Arızalı hattı bulmak için kullanılan sigortalardan biri açarsa, ekipler ve çalışmalar o bölüme odaklanıp arızayı lokalize etmiş olacaktır. Ancak her ne olursa olsun hattın belli bir bölümüne enerji tekrar verildiği için hem üretici hem tüketici açısından çeşitli zararlara yol açabileceğinden bu yöntem artık pek de kullanılmaz. Günümüzde kadar gelen bir sürü çalışmalar ile teknolojik anlamda birçok çözüm ortaya konulmuştur.

2.3.2 Köprü Yöntemi

Tarihler 1850’li yılları gösterdiğinde dünyada ilk kez Almanya’da yeraltı kabloları kullanılmaya başlanmıştır. Kablolar yeraltına alındığında kullanımdan veya üretiminden dolayı oluşan arızaların tespit edilmesinde zorluklar yaşanmıştır ve yine aynı yıllarda bu arızaları tespit edecek basit ölçekli cihaz tasarımları ve geliştirmeleri yapılmaya başlanmıştır. O dönemde kullanılan elektrik daha çok doğru akım özellikli olduğundan ilk yapılan ölçüm cihazlarına klasik ölçüm cihazı denmiştir (Gürelli 1979).

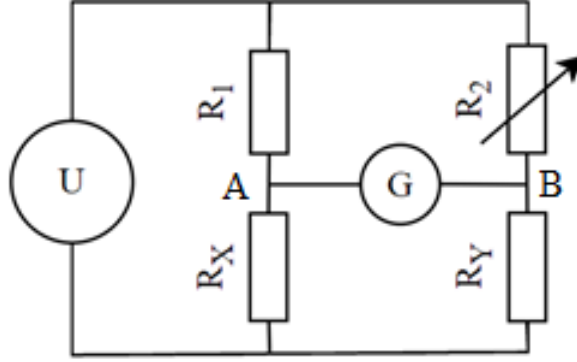
Bu yöntemlerin kullanılabilmesi için genel olarak bazı ön şartların sağlanmış olması gerekmektedir.

- Kabloların başlangıç ve bitiş noktaları boşta ve açıkta olmalıdır.
- Test işlemi için hattın dönüşünü sağlayacak olan kısım tamamlanmış olmalıdır.
- Dönüş hattı için kullanılan direnç veya bağlantı kısa devre etkisi yapacağından uzakta konumlandırılmalıdır.
- Bağlantılar ayrı ayrı bir şekilde iletken kısımlara yapılmalıdır.
- Direnç değeri kesit alanına bağlı olduğundan değişken hatlarda bu bilgiler belli olmalıdır.
- Sistemde oluşabilecek sızıntı veya kaçak akımlar ölçüm değerine etki edecektir bundan dolayı ölçüm sırasında tüm önlemlerin alınması gerekmektedir.

Ön koşullar göz önüne alındığında bu işlemin yapılması günümüz şartlarında pek de pratik ve kolay gözükmemektedir.

2.3.2.1 Klasik Köprü Yöntemi

Geliştirilen köprü methodlarının temelini “Wheatstone Köprüsü” oluşturmaktadır. Bu köprünün temel gösterimi şekil 2.5’te gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Wheatstone Köprüsü.

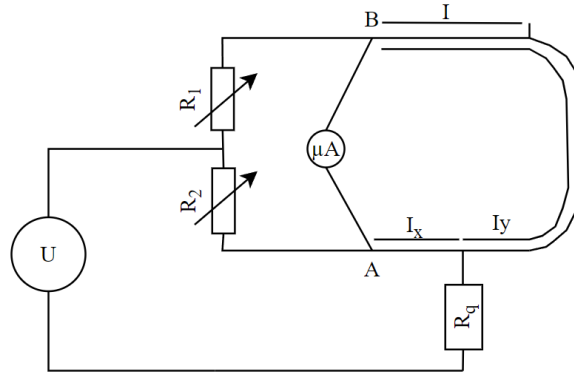
$$\frac{R_X}{R_Y} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.2)$$

$$I_X = I * \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.3)$$

Şekilde 2.5 ile gösterilen A noktası ile B noktası arasındaki gerilim farkı sıfır olduğunda denklem 2.2 ve 2.3 oluşmaktadır. Arızada meydana gelen direnç değeri oluşturulmuş olan köprüye bir etkisi mevcut değildir. Bu yöntem ile arızaları hattın 2m ile 2km aralığında 0.1 direnç değerinden 50M direnç değerine kadar olan aralıkta tespit yapılabilmektedir.

2.3.2.2 Murray Köprü Yöntemi

Murray köprü yöntemi oldukça basit bir yöntemdir. Basit şeması şekil 2.6’de gösterilmektedir. Hesaplama yapılabilmesi için kablo özelliklerinin veya ölçüm devresinin eşdeğer direncinin bilinmesi gerekmektedir (Bungay ve Macllister 1990). Ölçüm, iç direncin iki kolu ile kablo iletkeninin arıza noktası arasındaki mesafedir. Bu, gösterilen iki dış direnç koluna karşı dengelenerek yapılır. Devreyi uzak bir yerden tamamlamak için uzak bir noktada kısa devre yapılır.



Şekil 2.6 Murray Köprüsü.

Bu durumda, A noktası ile B noktası arasındaki gerilim farkı dengelenir ve direnç oranları eşitlenir.

$$\frac{R_X}{R_Y} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.4)$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_X}{R_X + R_Y} \quad (2.5)$$

R_1 ile gösterilen direnç değeri sağlam olan kablo damarına giden köprü hattıdır. R_2 ile gösterilen direnç değeri ise arızalı damara bağlı köprü hattıdır. Kablonun belirli bir uzunluktaki doğru akım direnç değeri sabit olduğundan x ve y olarak gösterilen kısımdaki değerler uzunluk olarak düşünülmektedir. Böylelikle eşdeğer devredeki değer formül 2.6'deki gibidir.

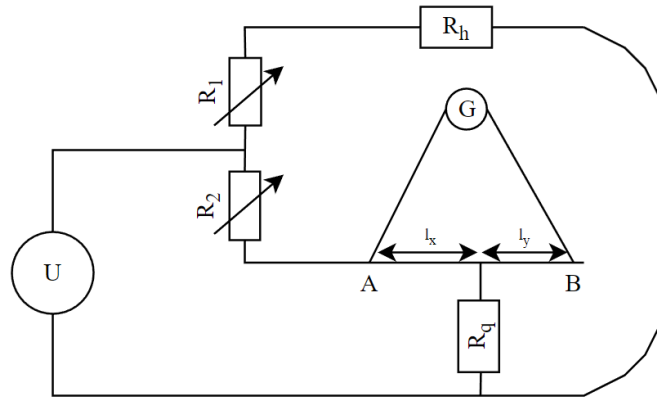
$$I_X = \frac{R_2(I_X + I_Y)}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

Bu uygulamanın doğru sonuç vermesi için veya uygulanabilir olarak değerlendirilebilmesi için hatta aynı mesafe ve özelliklere sahip sağlam olduğu belirlenmiş bir hat olmak zorundadır. Doğru bir sonuç elde edilebilmesi için gerekli olan bir diğer durum ise R_q olarak gösterilen yalıtım direnci, arızalı hattın direnç değerinden çok büyük olmalıdır. Kesitlerin değiştiği noktalar hatta mevcut ise bu noktalardan ayırım yapıp test yapılması gerekmektedir. Çünkü kesit alanı da direnç değerini etkileyen faktörlerden biridir.

Uygulama ise kullanılan ölçü aleti, direnç ve doğru akım kaynağı gereklidir. Kaynağın gerilimi arızanın direnç değerine bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Akım değeri sıfır olacak şekilde direnç değerleri ayarlanır ve ölçüm yapılır. Dengeleme işlemi için gerilimi arttırmak veya akım seviyesini düşürmek ideal çözümlerdir. Bu yöntemin ana toleransını belirleyen etkenler, direnç toleransları, ölçü aletlerinin hassasiyetleri ve akım seviyesinin dengesiz olmamasıdır.

2.3.2.3 Hillborn Köprü Yöntemi

Bu yöntem murray köprüsü yönteminin çalıştırılmadığı durumlarda alternatif olarak değerlendirilebilmektedir. Murray köprüsü kullanımında ihtiyaç duyulan sağlam damar, bu yöntemde ihtiyaç değildir. Basit diagramı şekil 2.7’te gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Hillborn Köprüsü.

Arıza mesafesini eş değer devrede aşağıdaki formüldeki gibi bulunabilmektedir.

$$l_X = l * \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_h} \quad (2.7)$$

2.3.3 Yakma Yöntemi

Arızalı hatlarda karşılaşılan durumlardan biri de yüksek dirençli arızalardır. Bu arızaların yerinin tahmin edilebilmesi ve analiz edilebilmesi için direnç değerinin belirli seviyelerde

olması inceleme ve analiz açısından gereklidir. Bundan dolayı direnç değerini düşürebilmek için “yakma yöntemi” kullanışlıdır.

Yakma yönteminin temel gereksinimleri yüksek gerilim, yüksek akım ve kontrolcüleridir. Yüksek gerilim ve akım seviyesi kablonun yüksek dirençli kısmında direnç değerini istenen seviyeye düşürmekte fayda sağlamaktadır. Bu cihazların genel güç değerleri 1kVA seviyesi ile 10kVA seviyesine kadar olabilmektedir. Bu cihazlar genellikle araç kabinleri içerisinde monte edilip arıza noktasına araç ile götürülmektedir. Ağır ve büyük yapıdır ve elle taşınması zordur. Kabloların kullanıldığı yer ve özelliklerine göre, çıkış gerilimi 1kV dan 15kV seviyesine kadar değişmektedir.

Yakma yöntemi ile arızanın yerinin bulunmasının için kullanılacak başka bir yöntem için zemin hazırlanmak amaçlanmıştır. Yapılan bu işlemle birlikte arızalı noktada düşük dirençli bir köprü oluşmuştur. Bu duruma getirebilmek için ark oluşturacak bir yüksek gerilim verilir. Cihazın kendi gerilim seviyesi yeterli olmadığı durumlarda ise devreye paralel şekilde yüksek gerilim üretici bağlanır.

Kabloda yanma durumu oluşmaya başladığında ise kontrollü bir şekilde gerilim seviyesi düşürülür. Ancak bu düşüm esnasında devamlılık sağlanmalıdır. Ark oluşumu kesilirse tekrardan gerilim seviyesi yüksek seviyelere çıkartılıp işlem tekrar edilir.

Enerji seviyesi testin ilk anından itibaren takip edilmesi gerekmektedir. Yüksek olduğu durumda eriyen kablo yalıtım malzemesi arızalı böyleyi kaplaması durumunda artık daha yüksek gerilim ve akım seviyesine ihtiyaç duyulacağı için takip önemlidir. İşlemin başlangıcında enerji seviyesi düşük olarak başlanmalıdır. Takipli bir şekilde gerilim seviyesi arttırılmalıdır. Gerilim belli bir yerden sonra düşüp akım seviyesi artıyorsa artık işlem doğru bir şekilde yapılmış anlamına gelmektedir. Bu durumda açığa çıkan gaz ve malzemeler ile o bölgede karbon köprüsü oluşmaktadır.

Karbon köprüsünün kalitesi ise güç değerine bağlıdır. Bu değer çok yüksek olursa oluşan köprünün yanma durumu ile karşılaşılabilir. Eğer düşük seviyede tutulursa işlem artık sönmüş olup tekrardan sürecin başa dönmesine sebebiyet vermektedir.

2.3.4 Darbe Yansıma Yöntemi

Bu yöntem için hatta yapılacak olan farklı bağlantılara, elle hesap yapılmasına ve hata payını düşüren özellikleri ile kullanıcıya basitlik açısından kolaylık sağlamıştır. İlk çıkış yaptığı yıllarda kablo arızalarını çözümlemek için geliştirilmiştir ancak günümüzde birçok teknolojik çalışmanın temelini ve alt yapısını oluşturmuştur. Örnek vermek gerekirse baskı devrelerdeki malzemelerin ve yolların sürekliliğinde kullanılmıştır.

Darbe yansıma yönteminin temeli arızalı hatta gönderilmiş olan bir sinyalin yansıma zamanı arasındaki fark hesaplanarak bulunmaktadır. Bu darbe ve sinyal kablo üzerindeki herhangi bir empedans değişikliği olduğu durumda gönderilmiş olan bu sinyalin hepsi veya bir kısmı yansıma yapmaktadır. Darbe sinyalinin ilerleme hızı sabit olduğu düşünüldüğünde bu sinyalin çıkış yaptığında veya ateşlendiğinde zaman sayıcı başlatılır, sinyalin bir kısmı veya hepsi geri geldiğinde zaman sayıcı durdurulur ve zaman değerine bakılır. Böylelikle arızanın nerede olduğu konusunda mesafe cinsinden elimizde bir veri olmaktadır.

$$D = t * \frac{V}{2} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8 ile gösterilen matematiksel işlem ile arızanın konumu hesaplanabilmektedir.

- D ile ifade edilen arızanın uzaklığıdır. Birim cinsi ise metre olarak değerlendirilir.
- t ile ifade edilen ise darbenin gidiş ve dönüşünü kapsayan sürenin tamamıdır. Birim değeri mikro saniye seviyelerindedir.
- V ile ifade edilen değer darbenin yayılma hızıdır. Birimi ise metrenin zamana oranıdır.

Bu yönteminde başarısını da kendi içerisinde etkileyen bazı nedenler vardır. Bu faktörler;

- Yayılma hızı malzeme özelliklerine göre değişiklik gösterdiği için sabit alınmaması gerekmektedir. Bu hız için ise denklem 2.9'daki ifade kullanılmaktadır.

$$V = \frac{V_s}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.9)$$

V_s ile ifade edilen değer ışığın boşluktaki hız seviyesidir. ϵ ise kablonun yalıtkan özelliğinin dielektrik sabitidir. Elektrik üretim, dağıtım ve arıza sektörlerinde kullanılan bazı malzemelerin yayılma hızlarını gösteren çizelge 2.2 aşağıda verilmiştir. Buna göre mesafe bulmak için kullanılan v değeri sabit olarak değil, kullanılan ürüne göre değişiklik göstermelidir. Böylelikle hata konularında biri azaltılmış olur.

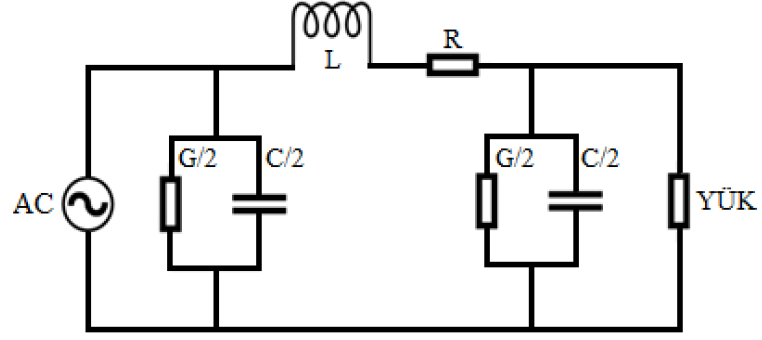
Çizelge 2.2 Malzeme özelliklerine göre yayılım hız değerlerinin tablosu.

İzolasyon Tipi	Yayılım Hızı (m/μs)
Kağıt	216-264
Kağıt (yağ emdirilmiş)	150-171
PE	~200
XLPE	156-174
PVC	152-175
PTFE	~215
HAVA	~282

- Arızalı bölgenin ön belirlenmesin de kullanılan darbe yansıma yönteminde gönderilen dalga ek yapılmış kısımlardan, muf bölgelerinden yasıma yapabilmektedir. Bundan dolayı arıza bölgesinin tanımlanması zor bir durum haline gelmektedir. Bunlara ek olarak darbenin ilk değerinin ve noktanın yanlış belirlenmesi yine arıza bölgesinin tanımlanmasında zorluk çıkaracaktır.

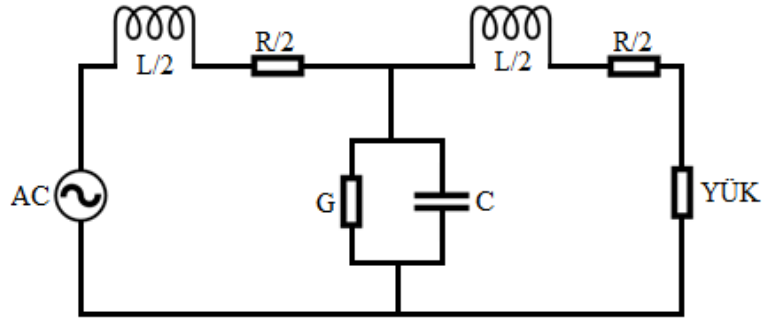
2.3.4.1 Hattın Elektriksel Modeli

İletim hatlarının elektriksel modeli R değeri direnci, L değeri endüktansı, C değeri ise hatlar arasındaki kapasitans değerini, G değeri ise hattın kaçak geçirgenliğini temsil etmektedir (İnt. Kyn. 1).



Şekil 2.8 Enerji iletim hattının π eşdeğer devre modeli (İnt. Kyn. 1).

İletim hattın π model olarak gösterilen eşdeğer devrede hattın direnç değeri, iletim kabloların arasındaki ve toprak ile arasında olan kondansatör değeri, kaçak geçirgenlik değeri ve hattın endüktans değeri şekil 2.8’de eşdeğer devre ile gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Enerji iletim hattının T eşdeğer devre modeli (İnt. Kyn. 1).

İletim hattının bir diğer modeli ise T modelidir. Hatta bulunan kondansatör, direnç, kaçak geçirgenlik ve endüktans değerleri ile model değerlendirilmektedir. Şekil 2.9’de eş değer devresi gösterilmektedir.

Genel anlamda iletim hatlarında pi ve t şeklindeki yapılar sürekli olarak devam eder. Yani aslında iletim hatlarında bu iki modelin birlikte olduğu durum ile karşılaşılmaktadır. Kısım kısım pi, bölüm bölüm t model olsa da genel anlamda bu iki model birlikte gözükmemektedir. Test esnasında arızalı kablo grubuna verilecek olan gerilim kablo içerisinde yayılım gösterirken kablonun endüktans değerinden dolayı gerilim endüklenir. Bu gerilim ile akım oranı bize kablonun üretiminden gelen karakteristik direnç değeri yani empedans değerini verir. Endüklenen gerilim “ e ” ile endüklenen akım “ i ” ile olarak alınır;

$$Z_0 = \frac{e}{i} \quad (2.10)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (2.11)$$

Hat üzerinde kaçak iletkenlik ve resistif yük olmadığı düşünülürse yani kayıp olmadığı durum düşünülürse;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.12)$$

Denklem artık denklem 2.12'deki gibi olacaktır. L değerimiz metredeki endüktans değerini, C değerimiz metredeki kapasitans değerini, Z₀ değerimiz ise darbenin eşdeğer direnç değerini göstermektedir.

Kablonun endüktans değeri (L) ise,

$$L = \left(4.6 * \log \frac{d}{r} + 0.5 \right) * 10^{-4} \left(\frac{H}{km} \right) \quad (2.13)$$

Denklem 2.13'teki d değerimiz iletkenler arası açıklık ve birimi santimetredir, r değerimiz iletken yarıçapıdır ve birimi santimetredir. Simetrik bir hatta endüktans değerleri her faz için eşittir ve açıklıklar da eşittir. İletkenler simetrik yerleştirilmemişse endüktans değerleri birbirinden farklı olacaktır. Kablonun oluşturduğu indüktif etki sebebiyle frekansa bağlı direnç değeri ise formül 2.14 de olduğu gibi bulunmaktadır.

$$X_L = 2 * \pi * f * L \quad (2.14)$$

Çizelge 2.3 PVC izoleli özellikli kabloların kesitine göre endüktif değerleri (XL).

Nominal İletken kesiti (PVC)	Nominal Gerilim 0.6/1kV Çok Damar	1 damar	3.6/6kV 3 damar	1 damar	6/10kV 3 damar	1 damar
25	0,082	0,103	0,107	0,137	0,122	0,127
50	0,078	0,095	0,097	0,127	0,114	0,113
95	0,075	0,088	0,088	0,112	0,103	0,104
120	0,073	0,085	0,085	0,107	0,099	0,100
150	0,073	0,084	0,083	0,105	0,096	0,097
185	0,073	0,084	0,081	0,102	0,093	0,094
240	0,072	0,082	0,078	0,097	0,089	0,093
300	0,072	0,081	0,077	0,095	0,087	0,091

Çizelge 2.3’ de görüldüğü üzere kablo kesiti arttıkça endüktif reaktans azalmaktadır. Ek olarak, endüktif reaktans, kablonun tek veya çok çekirdekli olmasından da etkilenir.

Çizelge 2.4 XPLE izoleli özellikli kabloların kesitine göre endüktif değerleri (XL).

Nominal İletken kesiti (XPLE)	Nominal Gerilim 0.6/1kV 1 damar	Çok damar	6./10kV 1 damar	Çok damar	8.7/15kV 1 damar	Çok damar	12/20kV 1 damar	Çok Damar
50	0,088	0,072	0,127	0,110	0,132	0,117	0,137	0,123
95	0,082	0,069	0,114	0,099	0,118	0,105	0,123	0,110
120	0,082	0,069	0,109	0,095	0,114	0,101	0,118	0,106
150	0,082	0,069	0,106	0,092	0,110	0,098	0,114	0,102
240	0,079	0,069	0,098	0,087	0,102	0,091	0,105	0,095

Çizelge 2.3 ve çizelge 2.4’te görüldüğü gibi kablonun yalıtkan özelliklerine göre de endüktif etkisi değişmektedir.

Kablonun kapasitif değerini incelemek istersek, kablo iletkenleri hem toprakta hem de kendi aralarında kondansatör özelliğine sahiptir. Bu özellik sebebiyle uygulanan gerilim seviyesi ve frekans değerine bağlı olarak güç kalitesine etkisi gözle görülmektedir. Kapasitif değer formülü ise,

$$C = \left(\frac{0,0242}{\log \frac{d}{r}} \right) \left(\frac{\mu F}{km} \right) \quad (2.15)$$

Frekansa bağlı direnç değerini ise,

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C} \quad (2.16)$$

Formüllerden yararlanarak iletim hattının eşdeğer devredeki değerleri bulunabilmektedir. Örnek vermek gerekirse, 100 cm aralıklı sabit iletkenlerden oluşan üç fazlı bir sistemin iletkenleri, bir eşkenar üçgenin köşelerini oluşturacak şekilde düzenlenmiştir. İletken çapı 20 mm'dir. Bu sistemin endüktansını ve gücünü km cinsinden hesaplamak istersek;

$$L = \left(4,6 * \log \frac{100}{1} + 0,5 \right) * 10^{-4} \left(\frac{H}{km} \right) = 0,00097 \frac{mH}{km}$$

$$C = \left(\frac{0,0242}{\log \frac{100}{1}} \right) \left(\frac{\mu F}{km} \right) = 0,0121 \frac{\mu F}{km}$$

2.3.4.2 Dalganın Yansıması ve İletim esnasındaki Katsayılar

Karakteristik empedans değerine sahip Z_0 sonlu uzunluğundaki bir iletim hattı, karakteristik empedansa eşit bir yük değeri ile hat sonlandırılırsa, kaynaktan aktarılan tüm enerji yüke üzerine aktarılır. Ancak, empedans ile yükün direnci arasında fark oluşmuşsa, bu durum yük üzerinden kaynağa doğru yansıyan bir dalga olarak görünür. Aslında bu dalga yüke aktarılamayan enerjidir.

Kabloya karakteristik empedansı Z_0 olan bir darbe uygulanırsa, kabloda bir arıza varsa, darbe arıza noktasından yansıtılacaktır. Yansıtılan dalganın genliği ve polaritesi,

aşağıdaki gibi yansıma katsayısı ρ ile ifade edilir.

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2.17)$$

Kablonun içerisinde yayılım gösteren dalganın katsayısı,

$$\tau = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0} \quad (2.18)$$

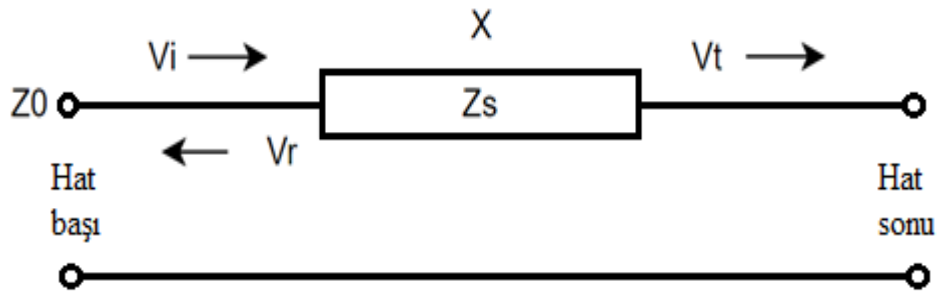
$$V_r = \rho * V_i \quad (2.19)$$

$$V_t = \tau * V_i \quad (2.20)$$

Z_L değişkeni arızanın bulunduğu yerin yük empedansıdır. V_i arızanın bulunduğu yerdeki gerilim seviyesidir. V_r arızalı kabloya gönderilen dalganın yansıyan değeridir. V_t kabloya iletilen değerdir (Ho vd. 1993).

2.3.4.2.1 Hatta Oluşan Seri Arızalar

İletim hattında oluşabilecek arıza çeşitlerinden biri de seri olarak adlandırılan, aynı hat üzerinde olup iletimin sağlanamaması sebebiyle arıza teşkil eden noktalardır. Gösterimi şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10 Seri arızanın gösterimi.

Z_s değerimiz kablonun x noktasında bulunan arızanın empedans değeridir. Z_L ise yük üzerinden kabloyu gören tüm empedans değeridir.

$$Z_L = Z_S + Z_0 \quad (2.21)$$

Daha önce belirttiğimiz denklem 2.17 ve 2.18 ile aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\rho = \frac{Z_S}{Z_S + 2Z_0} \quad (2.22)$$

$$\tau = \frac{2(Z_S + Z_0)}{Z_L + 2Z_0} \quad (2.23)$$

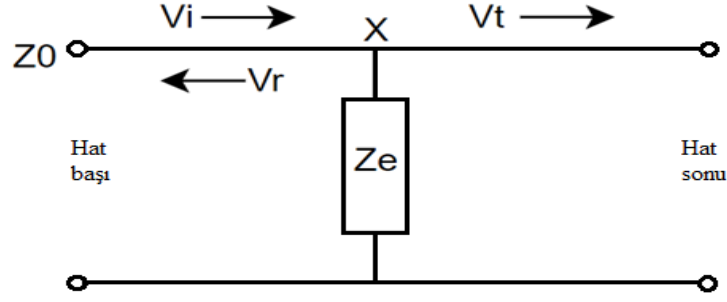
Kablonun bitiminde açık devre olan bir hatta, Z_S sonsuz olduğu için yansıma katsayısı ρ ise 1 olarak değerlendirilir (Ho vd. 1993). Seri hatalar ve kablo sonlandırmaları, pozitif genlikteki yansıma darbeleri olarak görünür. Kablo tamamen koparsa, arıza noktasındaki empedans sonsuz olduğundan, darbenin tüm enerjisi kaynağa geri yansıtılır. Böyle bir durumda kabloya uygulanan darbe arızalı bölgeyi aşamaz. Bu tür ölçüm için eğri Şekil 2.11’da gösterilmektedir (Altın vd. 2022).



Şekil 2.11 Seri arızada yansıyan dalga.

2.3.4.2.2 Hatta Oluşan Şönt Arızalar

Şekil 2.12’de şönt arızanın olduğu bir hattın eşdeğer devre modeli gösterilmiştir (Altın vd. 2022). Z_E değeri kablonun üzerinde bulunan herhangi bir noktadaki arızanın empedans değeridir. Z_L değerimiz ise yük üzerinden kabloyu gören empedans değeri olarak değerlendirilmektedir. Böylelikle,



Şekil 2.12 Şönt arızanın eşdeğer devresi.

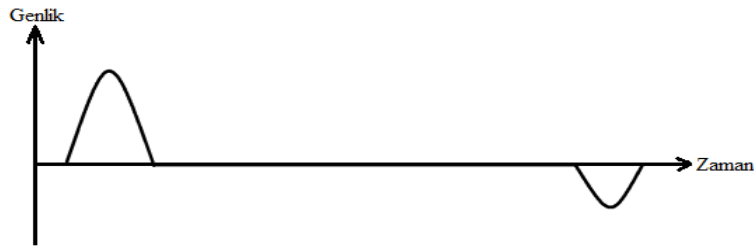
$$Z_L = Z_E // Z_0 = (Z_E * Z_0) / (Z_E + Z_0) \quad (2.24)$$

Z_E değeri aynı zamanda Z_S olarak denklemde kullanılmaktadır. Kurulan denklem 2.17 ve 2.18 ile,

$$\rho = \frac{-Z_0}{Z_0 + 2Z_E} \quad (2.25)$$

$$\tau = \frac{2Z_E}{Z_0 + 2Z_E} \quad (2.26)$$

Denklem 2.25 ve 2.26 bulunmaktadır. Şönt arızalarda Z_E değerimiz sıfır olarak değerlendirileceğinden dolayı, ρ değerimiz ise -1 olarak sonuçlanacaktır.



Şekil 2.13 Şönt arızada yansıyan dalga.

Şekil 2.13’de şönt arızada görülebilecek örnek bir yansıma grafiği verilmektedir. Seri arızalar için bulunan ve kullanılan denklem 2.22’de Z_0 değeri için 50 ohm direnç değeri baz alındığında (güç dağıtım kablolarında 15 ila 80 ohm civarında gelebilmektedir), yüzdelik olarak yansıma faktörü değerimiz arıza direncinin değerine göre değişmektedir. Bu değerler göz önüne alındığında çizelge 2.5’te görüldüğü gibi sonuçlar çıkmaktadır.

Çizelge 2.5 Seri arızalarda, arıza direncine göre yansıma değeri tablosu.

Z_s değeri	Yansıma değeri (%)
1M ohm	99,98
50k ohm	99,8
2,5k ohm	96,1
99 ohm	49,74
9 ohm	8,25

Çizelge 2.5’de görüldüğü üzere gönderilen dalganın değerinin belli bir kısmı yansımaktadır ve bu değer arızalı bölgedeki direnç değerine göre değişmektedir.

Şönt arızalarda ise bu durum değişmektedir. Yansıma değerimiz için bulunan ve kullanılan denklem 2.25, negatif değerli olduğundan seri arızadan farklı bir sonuç elde edilmektedir. Çizelge 2.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 Şönt arızalarda, arıza direncine göre yansıma değeri tablosu.

Z_s değeri	Yansıma değeri (%)
2500 ohm	-0,99
1250 ohm	-1,96
750 ohm	-3,22
75 ohm	-25
7,5 ohm	-62,5
0,75 ohm	-97

Kablo boyunca ilerleyen dalgaların genliği kablonun direnci sebebiyle azalır, kablonun kapasitif etkisinden dolayı ise yükselme ve düşme eğimi değişmektedir. Kesit alanı ile direnç değişim değerleri tablo 2.3’te örnek olarak verilmiştir. Bu tablodaki değerler 20 derece sıcaklık değerini baz alınarak düzenlenmiştir. Formül ise,

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (2.27)$$

Doğru akım için olan formül 2.27’de, L değerimiz iletkenin uzunluğu, A değerimiz kesit alanı, ρ değerimiz ise iletkenin öz direncidir. Buna göre bakır için iletkenin öz direnç değeri havai hat ile yeraltı kablosu için değişse de ortalama olarak $0.0174 \Omega * mm^2/m$ civarı olarak değerlendirilir. Alüminyum öz iletken direnci ise $0.0282 \Omega * mm^2/m$ olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 2.7 Kesit alanına, malzeme tipine ve mesafeye bağlı direnç tablosu (İnt. Kyn. 2).

Kesit Alanı (mm ²)	Direnç – Bakır (ohm/km)	Direnç – Alüminyum (ohm/km)
1,5	12,1	-
2,5	7,41	-
4	4,61	-
6	3,08	-
10	1,83	-
16	1,15	1,91
25	0,727	1,2
35	0,524	0,868
50	0,387	0,641
70	0,255	0,413
95	0,193	0,320
120	0,153	0,253
150	0,124	0,206
185	0,0991	0,164
240	0,0754	0,125
300	0,0601	0,100

Çizelge 2.7’de görüldüğü üzere şönt arızalı hattaki direnç değeri 750 ohm seviyesinin civarı veya üstü olduğu durumda gönderilen dalganın yansıma değeri çok düşüktür. Diğer bir deyişle, arıza empedansı karakteristik empedansın 10 katı olan arızalar için kayda değer yansıma elde edilemez. Aslında, pratikte başarı oranı çok daha düşüktür (Clegg, 1993). Yapılan bu hesap, kabloda kayıp olmadığı varsayımına dayanmaktadır. Gerçekte, kablo kayıpları ve küçük empedans farkları, darbenin kablo üzerinde zayıf kalmasına ve yansıyacak olan darbenin genliğinin beklenenden çok daha küçük olmasına neden olur.

2.3.4.3 Arızalı Noktanın Bulunması

Yansıma prensibi arızalı kablo üzerine gönderilen dalganın yayılım hızı ile mesafe ölçümünü temel almaktadır. Denklem 2.28'de gösterildiği gibi basit bir denklem yardımıyla arızalı hattaki sinyali analiz edip ön yer tespit çalışmasını gerçekleştirebiliriz.

$$D_x = Zaman * \left(\frac{Işık \text{ hızı}}{2} \right) = t * \frac{300*10^6}{2*\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.28)$$

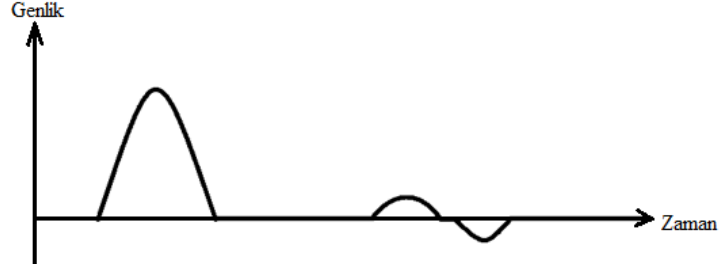
Denklemdaki D_x olarak gözüken değerimiz sinyalin verildiği yer ile arıza noktasının olduğu yer arasındaki mesafedir ve birimi metredir. Denklemden t olarak gösterilen ifade ise arızalı hatta gönderilen dalganın kablo üzerindeki seyahat süresidir ve birimi saniyedir. Işık hızı değerimiz ise sabit olup denklemden gösterilmektedir ve birimi metrenin saniyeye oranıdır. Denklemden ϵ_r değerimiz ise kablonun yalıtkanından dolayı oluşan dielektrik sabitidir.

Denklemden ışık hızının ikiye bölünme ifadesi, aynı uzunluktaki kablonun gidiş ve dönüş hatlarında yayılan dalganın süre olarak yarısını temsil etmektedir.

Kapasitans ve endüktans değerleri kablo yapısına, üretim süreçlerine ve kullanım yerlerine göre değişmektedir. Bu değerlerdeki bir değişiklik, direnç değerinde bir değişikliğe neden olur. Kablo yapısındaki her değişen nokta, endüktans ve kapasitansta ve dolayısıyla dalga direncinde bir değişikliğe neden olur. Yansımalar ayrıca iki farklı kablonun birleşim noktalarında, faz değişim noktalarında, sıkıştırmalarda, kaplinlerde, branşmanlarda vb. meydana gelir. Bu nedenlerin dalga direncinde meydana getirdiği değişiklik sonucunda şok yine geliş yönüne yansır. Ancak dalga direncine eşit olan arıza noktalarında arızalı kabloya gönderilen dalga zayıflar ve olması gerekeni yansıtamaz.

Daha önce de bahsettiğimiz yansıyan dalgaların temsili görüntülerinde kısa devre olan arızalarda veya düşük dirençli diye tabir edebileceğimiz arıza durumlarında gönderilen dalga ters polarite olarak gözükmektedir. Yüksek dirençli arızalarda ise gönderilen dalga değerinden düşük ancak aynı yönde gelen bir yansıma gözükmektedir. Bunların haricinde

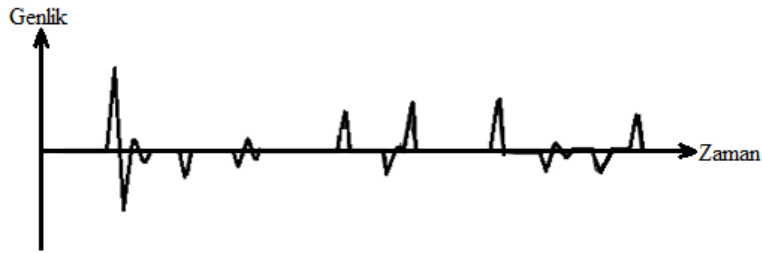
muf noktalarında veya ek noktalarında oluşabilecek yansımalar da mevcuttur. Bu yansımaların ise karakteristiği ve incelenmesi yapılmıştır ve görevli kişi bu tecrübe ve bilgiye sahip olmalıdır.



Şekil 2.14 Muf noktasındaki yansıyan dalga.

Şekil 2.14'te görüldüğü üzere muf noktasında eğer sadece bağlantı varsa ve seri hat iletimi devam ediyorsa oluşabilecek bir yansıma grafiği verilmiştir. Verilen dalganın büyük bir kısmı hat üzerinde ilerleme kaydetse de muf noktalarında şekildeki gibi yansımalar mevcut olabilmektedir.

Şehir ve yol aydınlatmalarında kullanılan iletim hatlarında birden çok bağlantı ve paralellik gözlenmektedir. Bu durum ile hat empedans değeri düşmektedir. Şekil 2.14'te görülen grafiğin her bağlantı durumunda tekrarlanması ile tespit durumu gittikçe zorlaşmaktadır.

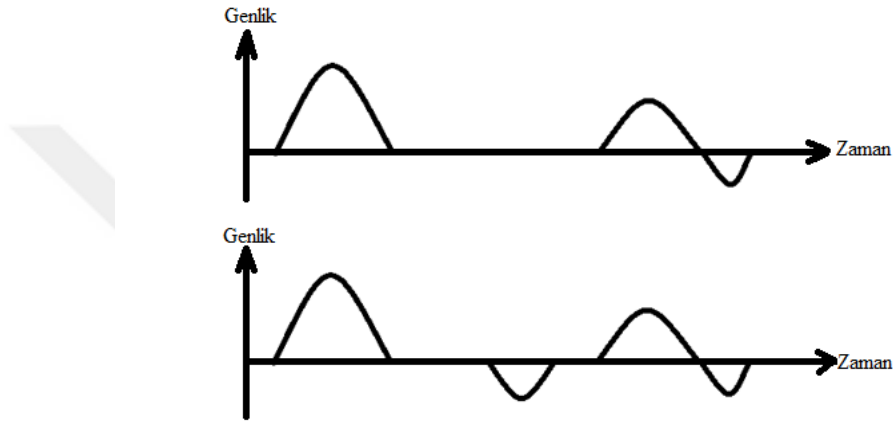


Şekil 2.15 Her muf noktasındaki yansıyan dalga.

Şekil 2.15'te görüldüğü gibi bağlantı noktası çok olan iletim hatlarında meydana gelebilecek dalga şekli verilmiştir. Bu şekilde oluşan bir grafik eğrisinde arıza noktası bulunması kolay olmamaktadır.

2.3.5 İkinci Anlık Darbe Yöntemi

İkinci anlık darbe yöntemi, diğer adıyla “Secondary Impulse Method” (SIM), darbe yansıma methodunu baz almaktadır. Darbe yansıma yöntemini baz alan her methodun birinci kuralı empedans eşitlemesi yapmaktır. Empedans değerinde oluşacak bir dengesizlik hat başında yansıma meydana getirerek arızalı hattın bulunmasında zorluk çıkarabilmektedir.



Şekil 2.16 Sağlam ve arızalı hat arasındaki fark.

Bu yöntem arızalı hat ile sağlam hat üzerinde uygulanan dalgaın karşılaştırmasını yöntem olarak belirlemiştir. Arızalı olan kabloda sinyal grafiği arızalı noktaya kadar sağlam kablo hattı gibi davranmaktadır. Sinyal, arızalı noktaya ulaştığında ise fark oluşur ve bu fark grafik olarak gözle gözlemlenmektedir. Bu fark ile arıza yerinin ön tespiti yapılmaktadır. Temsili grafik Şekil 2.16’da görülmektedir.

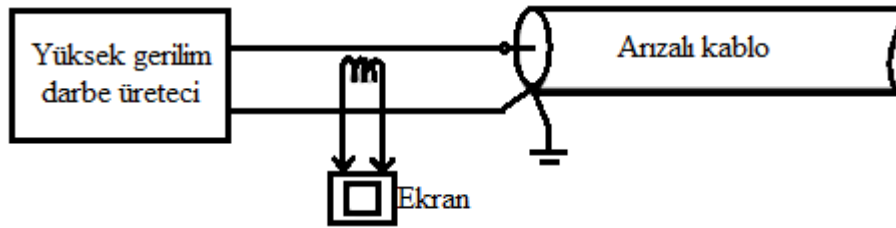
2.3.6 Darbe Akım Yöntemi

Darbe akım yöntemi, literatürdeki tanımlama ile “Impulse Current Method (ICM)”, çok uzun kablolardaki yüksek dirençli kablo arızaları için geleneksel konum belirleme yöntemidir. Bir dalgalanma üretici, bir endüktif kuplör aracılığıyla bir TDR'ye bağlanır. Arızadaki bozulma, dalgalanma üretici ile kablo arızası arasında kablo kılıfı boyunca hareket eden ve TDR tarafından algılanan yansımalarla neden olan bir akımın anlık yansımasını oluşturur. Bir TDR'yi bir dalgalanma üretici ile birleştirmek, geçici olarak

düşük dirençli arızaların bulunmasına izin verir. Kuplör, TDR'yi HV darbelerinden izole eder ve yüksek frekanslı test darbelerinin TDR tarafından sağlanan kablunun dalgalanma jeneratörü tarafından kısa devre yapmamasını sağlar. Ölçümün ilk aşamasında, TDR darbeleri yüksek dirençli veya aralıklı arızalıdır. İkinci aşamada, dalgalanma jeneratörü açılır. Dalgalı darbe genliği, yalnızca arızayı kırarak ve arıza yerinde bir ark oluşturacak kadar yüksek yapılır. TDR darbesi, ark ve geçici düşük dirençli arızanın bir görüntüsünü yansıtacak, negatif bir önyargı ekranda arıza konumunu gösterecektir. Ark sona erdiğinde, arıza yüksek dirençli durumuna geri döner. Dört akım devresi yönteminin, güç kablolarında yüksek dirençli ve aralıklı arızaları önceden tespit etmede başarılı olduğu kanıtlanmıştır:

- Doğrudan mod
- Karşılaştırma modu
- Diferansiyel karşılaştırma modu
- Döngü açık – Döngü kapalı yöntemi

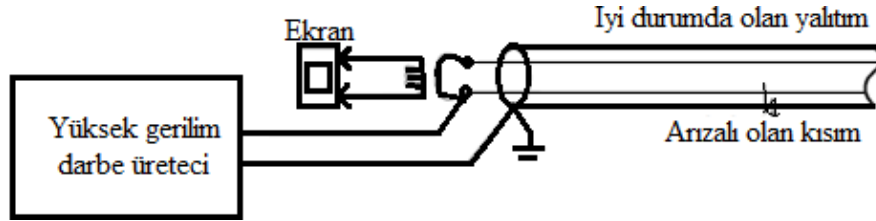
Doğrudan modda, bir dalgalanma üretici veya bir DC test seti, darbe kaynağı olarak işlev görür. Kablunun başlangıç ucu ile arıza arasındaki herhangi bir bağlantı noktası, değerlendirilecek yansıma sürecini bozan birden çok yansıma neden olacaktır.



Şekil 2.17 Direk mod (İnt. Kyn. 3).

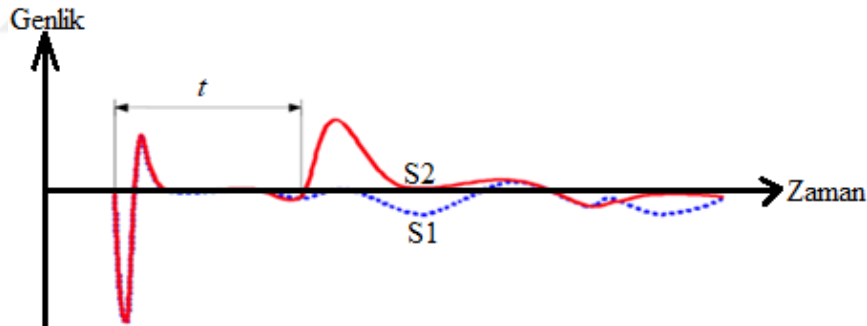
Arızalı kablodaki yansımalar, arızalı iletken ve yerleşik geçici kaydedicili bir darbe yansıma aletine bağlı bir akım kuplörü aracılığıyla kaydedilir. Doğrudan modda, akım kuplörü her zaman jeneratörün yakınında konumlandırılır. Kablunun başlangıç ucuna doğru hareket eden geçici bir akım dalgası akım kuplörünü her geçtiğinde, jeneratörün düşük dirençli çıkış empedansında hemen hemen aynı polarite ile yansıtılır, böylece bu anda giden ve yansıyan dalgalar üst üste biner.

Karşılaştırma modda ise, darbe kaynağı olarak bir yüksek gerilim test seti veya bir dalgalanma üretici (dalgalanma düğmesine basıldığında) kullanılır. Bu yöntem esas olarak T bağlantı ağlarında kullanılır. Sağlam bir hat olmalıdır ve hat sonunda veya başında hatta paralel direnç bağlantısı yoktur.



Şekil 2.18 Karşılaştırmalı mod (İnt. Kyn. 3).

Jeneratör kablo kapasitansını yükler ve arıza konumunda bir ark oluşur. Bu ark, fay konumundan her iki yönde yayılan ilerleyen bir dalga oluşturur. Sağlam kablounun yansıttığı sinyal ile hatalı kablounun yansıttığı sinyal karşılaştırılarak sonuca ulaşılmaya çalışılmaktadır.



Şekil 2.19 Sinyaller arası fark (İnt. Kyn. 3).

Şekil 2.19 da gösterilen temsili fark sinyalleri denklem 2.8 kullanılarak mesafe değeri hesaplanmaktadır. Karşılaştırmalı yöntemin dezavantajları mevcuttur. Bunlar,

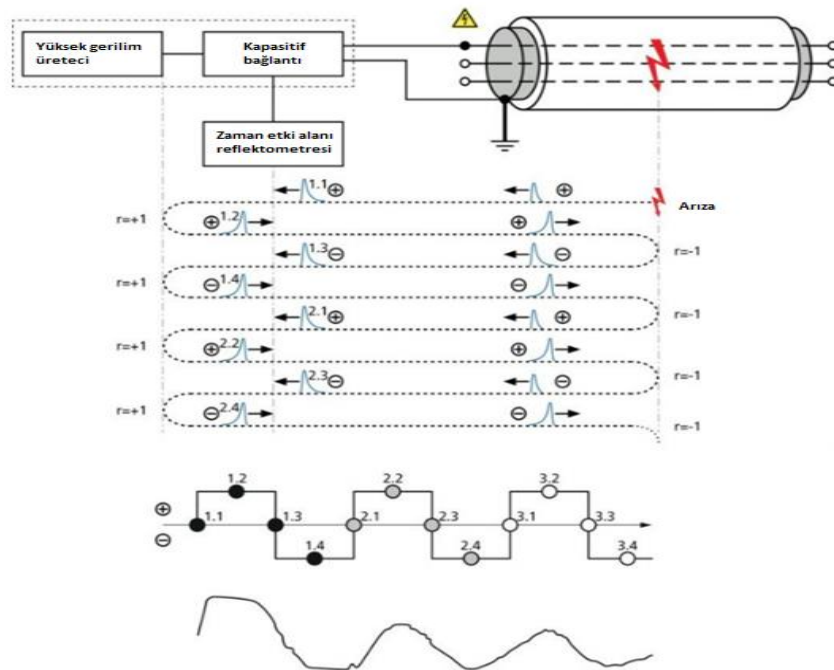
- Üretim sebebiyle oluşan farklılıklar
- İki sinyal grafiğinin karşılaştırılabilmesi
- Arızanın ön belirlenmesi için gerekli süre

Bu sebepler göz önüne alındığında arıza yerinin ön belirlenmesi yapılması için gerekli süre fazla olacaktır. Bu durumda tüketici kesiminin bu süre zarfı içerisinde elektriksiz kalacağı kesindir.

2.3.7 Bozunma (Decay) Yöntemi

Bazı kablolarda, arızanın arıza gerilimi dalgalanma üreticinin nominal çıkışından daha yüksek olabilir. Bu durumda, yüksek gerilim kaynağı olarak daha yüksek gerilim çıkışına sahip bir DC kaynağının kullanılması gerekir.

Bozunma yöntemi, kapasitif bir gerilim bölücü tarafından gerilimin ayrılmasına dayanır. Arızalı kablo, arıza gerilimine kadar yüksek gerilim DC uygulanarak şarj edilir. Kablo bir kondansatör görevi görür, enerjiyi depolar ve bir arıza meydana geldiğinde, kablo arızası ile yüksek gerilim kaynağı arasında dolaşan geçici bir dalga oluşturulur. Geçici dalga, kapasitif olarak bağlanmış bir TDR tarafından kaydedilir ve kaydedilen salınım periyodu arıza mesafesine eşittir. Yukarıdaki ICM yöntemiyle karşılaştırıldığında, bozunma yöntemi, kapasitif kuplör tarafından sürekli olarak kaydedilen geçici bir gerilim dalgasına dayanır.



Şekil 2.20 Bozunma yöntemi işlemi sırasındaki adımları (İnt. Kyn. 5).

Şekil 2.20’de gösterilen, bozunma yöntemi işlemi sırasındaki adımları açıklamaktadır. Kablo negatif gerilim ile şarj edilir ve kablo arızasındaki flaş, kablonun yakın ucuna doğru hareket eden pozitif bir deşarj geçici dalgası oluşturur. Yüksek gerilim kaynağında darbe, polarite değişikliği olmadan yansıtılır. Darbe, kablo arızasına geri döndüğünde, darbe yansıtılır ve polarite değiştirilir. Bu işlem, nabız sönümlenene ve enerji kaybedene kadar tekrarlanır.

2.3.8 Arıza Yerinin Tam Tespit Yöntemi

Arıza ön konumu, kullanıcıya kablo arızasının genel çevresini, hatta bazı durumlarda toplam kablo uzunluğunun yüzde birine kadar verir. Bununla birlikte, zemindeki bir kablo güzergahındaki tüm sapmaları tespit etmek veya tanımak imkansızdır ve bu nedenle, tam yerini belirlemek için kablo arızasını tam olarak belirlemek çok önemlidir.

Başarılı bir kablo arıza yeri tespiti, kablonun ve toprağa döşenen diğer hatların konumunun bilinmesine bağlıdır. Yeraltı kablosunun tam güzergahı bilinmiyorsa, minimum veya maksimum yöntemini kullanarak kablonun konumunu ve derinliğini belirlemek için manyetik frekans prosedürleri kullanılabilir.

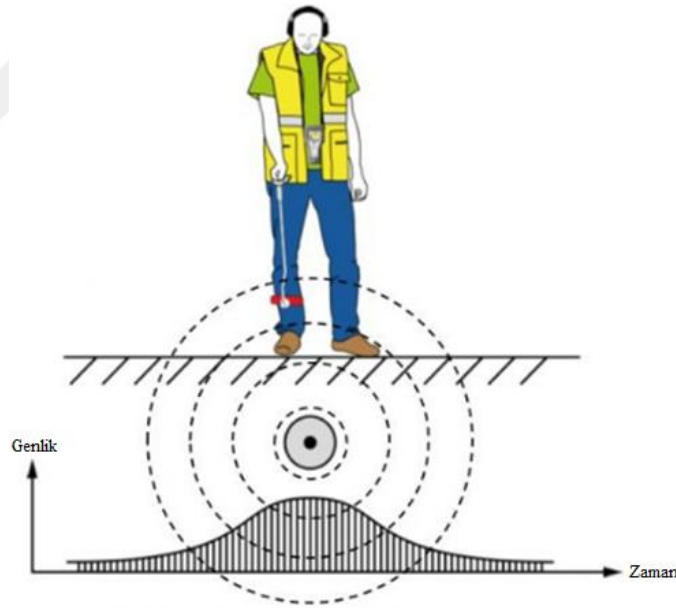
Bir ses frekans üretici, galvanik bağlantı, klipsli akım transformatörü kelepçeli endüktif bağlantı veya bir çerçeve antenli endüktif bağlantı yoluyla arızalı kablonun sağlıklı bir fazına bağlanabilir. En iyi sinyal değerleri elde edilebildiği için galvanik bağlantı en iyi yöntem olarak kabul edilir. Bununla birlikte, canlı kablolar üzerinde rota izlemenin yapılması istendiğinde olduğu gibi, galvanik bağlantının mümkün olmadığı alanlarda veya koşullarda endüktif bağlantı gerekli olabilir. Galvanik kuplaj için, diğer kablolarla endüktif kuplajı en aza indirmek için daha düşük bir frekans tavsiye edilir. Bir sinyali endüktif olarak kuplajlarken daha yüksek bir kuplaj etkisi gereklidir ve bu nedenle daha yüksek bir frekans seçilmelidir.

Bir ses frekans alıcısı ve tespit çubuğu kullanarak kabloyu izlerken, ses frekans üretici aracılığıyla iletilen elektromanyetik sinyal ölçülebilir. Tespit çubuğundaki bobinin yönüne bağlı olarak, sinyal farklı şekilde eşleştirilebilir. Minimum Yöntem ile algılama

bobini kablo yoluna dikeydir ve doğrudan kablo üzerinden alındığında minimum sinyal elde edilir. Maksimum Yöntem için tespit bobini kablo yoluna yataydır ve doğrudan kablo üzerinden alındığında maksimum sinyal elde edilir.

2.3.8.1 Maksimum Yöntemi

Arama bobini yatay ve kablunun alanına dik olarak hareket ettirilirse bobinin sinyal çıkışı kablunun bir noktasında maksimum değerine ulaşır. Bunun nedeni, bobinde indüklenen gerilimin, alanın en güçlü olduğu noktada maksimum değerine ulaşmasıdır. Arama bobini kablo ekseninden uzaklaştıkça alan ile bobin arasındaki etkileşim azalır, dolayısıyla indüklenen gerilim azalır. Şekil 2.21’te görüldüğü gibi sinyal değeri belli bir noktada yoğunlaşmaktadır. Bu noktada kulaklık vasıtasıyla duyduğumuz ses bize arızanın yerini göstermektedir.

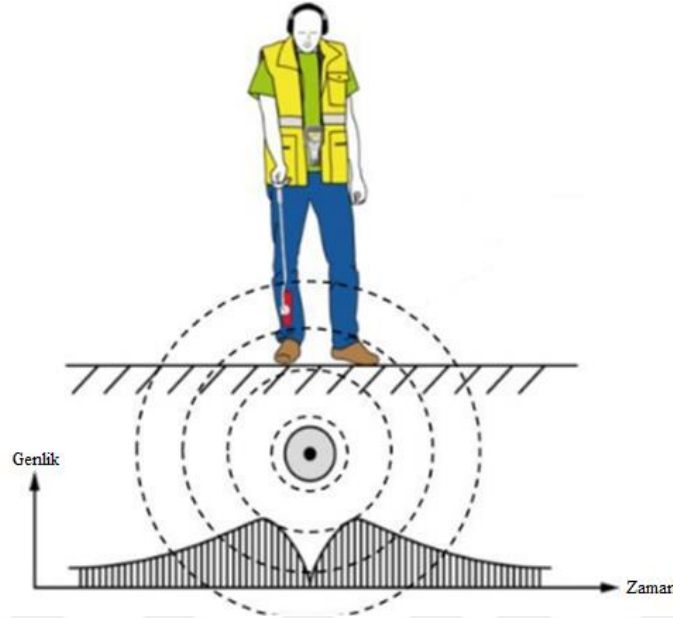


Şekil 2.21 Maksimum yöntemi (İnt. Kyn. 5).

2.3.8.2 Minimum Yöntemi

Arama bobini kablo eksenine dik bir düzlemde tutulursa kablo eksen yönünde alan olmadığı için indüksiyon oluşmayacaktır. Ancak bobin bu eksenin sağına ve soluna hareket ettirilirse bobinde bir gerilim indüklenir. Ölçüm cihazı ekranında bu, sinyal

seviyesindeki bir değişiklik olarak, önce bir tepe noktası, ardından sıfır ve ardından tekrar bir tepe noktası olarak gösterilir. Sinyal seviyesinin sıfır olduğu nokta, kablonun eksenini olarak tanımlanır.

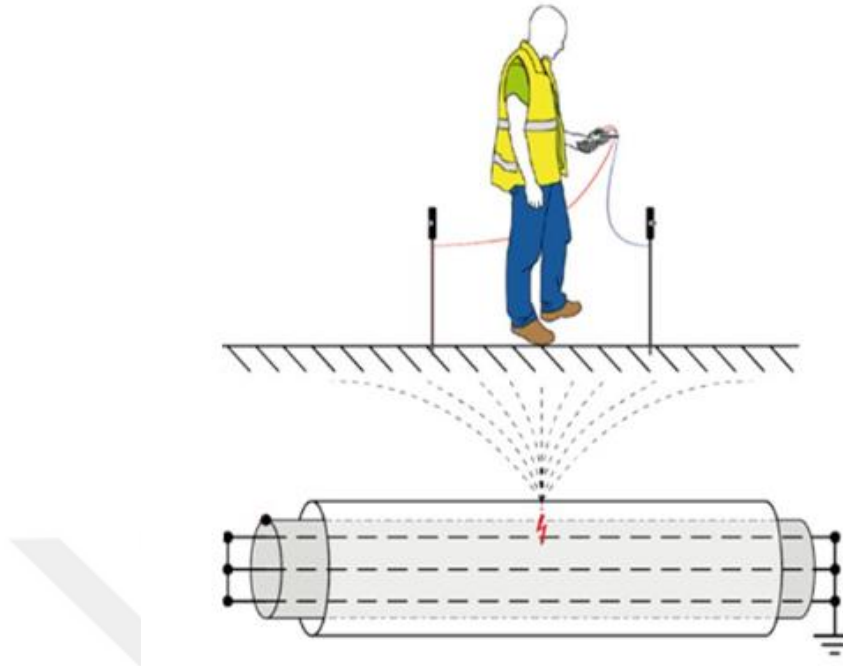


Şekil 2.22 Minimum yöntemi (İnt. Kyn. 5).

Minimum Yöntem, kablonun derinliğini belirlemek için de kullanılabilir. 0°'deki (doğrudan kablo üzerinden) minimum sinyal ile algılama bobini 45°'ye çevrildiğinde elde edilen minimum sinyal arasındaki mesafe, kablonun derinliğine eşittir.

2.3.8.3 Adım Gerilim Yöntemi

Kablo kılıfı arızaları veya toprağa kısa devre arızaları, bir kabloya çarpıldığında bir parlamaya izin vermez. Bu durumda, arızalı kabloya bir dizi gerilim anlık olarak (adım gerilimleri) gönderilir ve bu da toprağa bir gerilim düşüşü üretir. Gerilim düşüşü, yer üstünde iki toprak sondası kullanılarak ölçülebilen bir gerilim farkı ile sonuçlanır. Arızaya doğru yürürken, artan bir gerilim tespit edilmeli ve arızanın hemen üzerinde tespit edilebilir bir polarite değişikliği ölçülecek ve toprak uçları arızanın üzerine simetrik olarak yerleştirildiğinde ortaya çıkan gerilim sıfır olacaktır.

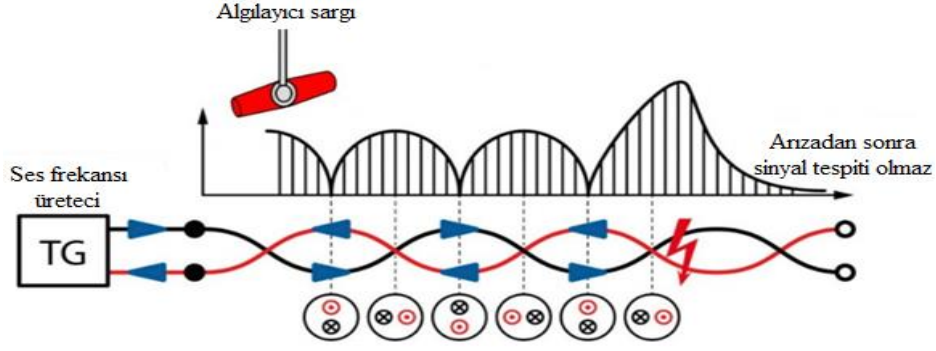


Şekil 2.23 Adım gerilim yöntemi (İnt. Kyn. 5).

Bu yöntemin dezavantajı ise hat üzerine iletken uçlar ile sürekli olarak takip etmek gerekmektedir. Bu ise arıza yerinin bulunmasında vakit kaybına neden olmaktadır. Alan büyüdükçe vakit kaybı artmaktadır.

2.3.8.4 Büküm Alanı Yerleştirme Yöntemi

BAUR tarafından patentli “Büküm Alanı Yerleştirme Yöntemi”, düşük dirençli arıza içeren sinyal ve çok damarlı kablo tesisatlarında başarıyla kullanılmaktadır. Arızalı kabloya yeterli akıma ($> 8\text{ A}$) sahip yüksek frekanslı bir ses sinyali gönderilir ve arıza konumuna ulaştıktan sonra geri döner. Ters akım yönlerine rağmen, bir manyetik alan üretilir ve bir tespit çubuğu kullanılarak, kablodaki damarların geometrik pozisyonunun bükülmesi veya sürekli değişmesi nedeniyle sinyalin maksimum ve minimum değeri tespit edilebilir.



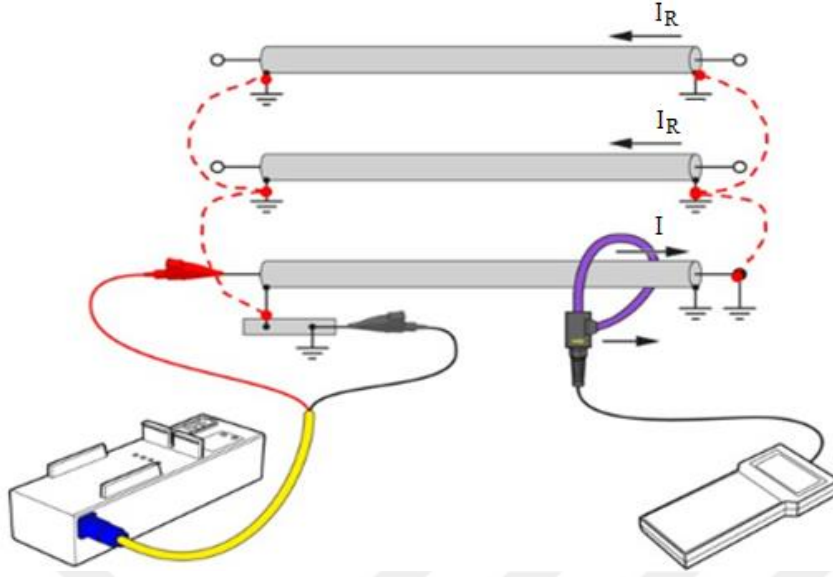
Şekil 2.24 Büküm Alanı Yerleştirme Yöntemi (İnt. Kyn. 5).

Ses sinyali arıza konumunda geri döndüğünden, sinyalin algılanamadığı konum kablo hatası olarak belirlenebilir. Büküm alanı yöntemi, kablo ek yerlerinin tespiti için de kullanılabilir, çünkü bükümlü alan ekin uzunluğuna göre kesintiye uğrar. Büküm alanı her zaman arıza yönünde olduğundan, bu yöntem T-dallı şebekelerde düşük dirençli arızaları işaretlerken büyük bir avantaj sağlar. Tüm sağlıklı kablo dalları sürekli bir düşük sinyal verir. Dalgalı olacak olan yansımalar ve sinyaller bu yöntemi de belli noktalarda hataya sokabilmektedir.

2.3.8.5 Kablo Tanımlama Yöntemi

Kablo arızası belirlendikten ve ortaya çıkarıldıktan sonra, kabloyu tekrar hizmete sokmak için onarım çalışmaları yapılmalıdır. Şiddetli bir kablo arızası meydana geldiyse ve görülüyorsa, hangi kablonun onarılması gerektiğini ayırt etmek oldukça kolaydır. Bununla birlikte, özellikle birden çok kablo bir araya toplandığında, herhangi bir onarım gerektirmeyen sağlam bir kablo bölümünün kesilme olasılığını azaltmak için önce doğru kablonun tanımlanması gerekir.

Kablo tanımlama, hatalı olduğundan şüphelenilen kabloya galvanik veya endüktif olarak bir verici bağlanarak gerçekleştirilir. Verici, şarj edilen ve ardından kabloya boşaltılan bir kondansatör içerir. Daha sonra hedef kablodaki akım darbesini ölçmek için esnek bir kuplör (Rogowski bobini) kullanılır.

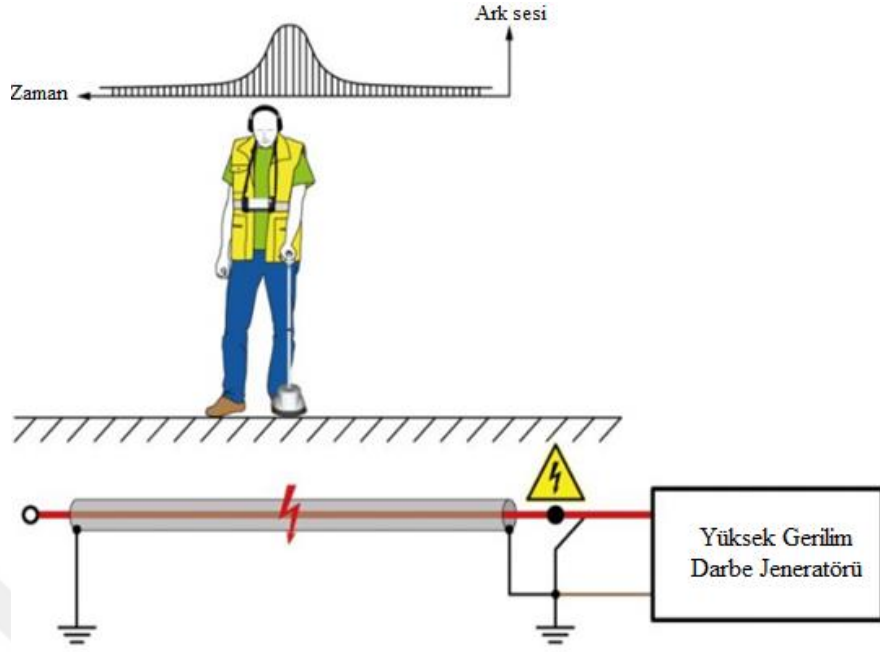


Şekil 2.25 Kablo Tanımlama Yöntemi (İnt. Kyn. 5).

Kabloya iletilen sinyalin genliğinin %100 olduğu kabul edilir. 3 fazlı bir kablo sisteminde veya yakınlarda başka kablolar olduğunda, sinyalin bir yüzdesi sinyalin enjekte edildiği kablonun korumasından ve sinyal genliğinin bir başka yüzdesi çekirdek ve kablodan geri döner. Sinyal topraktan diğer kablolara akacağından, diğer fazların her birinde ekranlama yapın. Bu, sinyalin enjekte edildiği kabloda en yüksek pozitif sinyal yüzdesine ve diğer kablolarda daha düşük negatif sinyal yüzdesine neden olur. Ayrıca alıcı, vericiden kabloya salınan sinyallerin zaman aralığı ile senkronize edilir. Sonuç olarak, doğru kablonun tanımlanması, basitçe en büyük genliğin ve doğru (pozitif) fazın tespiti.

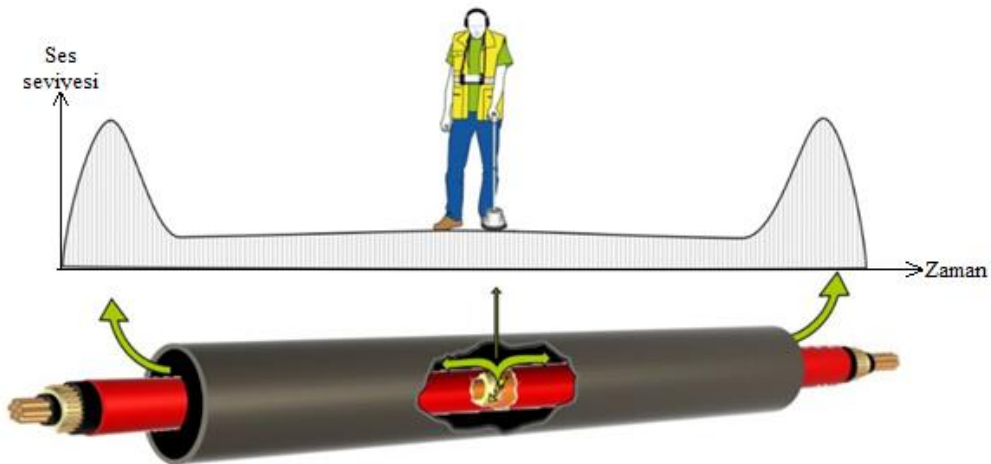
2.3.8.6 Akustik Arıza Tespit Yöntemi

Akustik arıza yeri belirleme yöntemi, kablonun "gümlendiği" gömülü kablolardaki yüksek dirençli veya aralıklı arızaların yerini tespit etmek için kullanılır, yani kablodan arızanın bozulmasına neden olan bir dizi yüksek gerilim dalgalanma darbesi gönderilir. Bir ark sırasında, zemin yüzeyinde bir yer mikrofoni, alıcı ve kulaklık kullanılarak algılanabilen sesli bir akustik sinyal üretilir. Arızaya olan mesafe ne kadar yakınsa, parlama sesinin genliği o kadar yüksek olur.



Şekil 2.25 Akustik arıza tespit yöntemi (İnt. Kyn. 5).

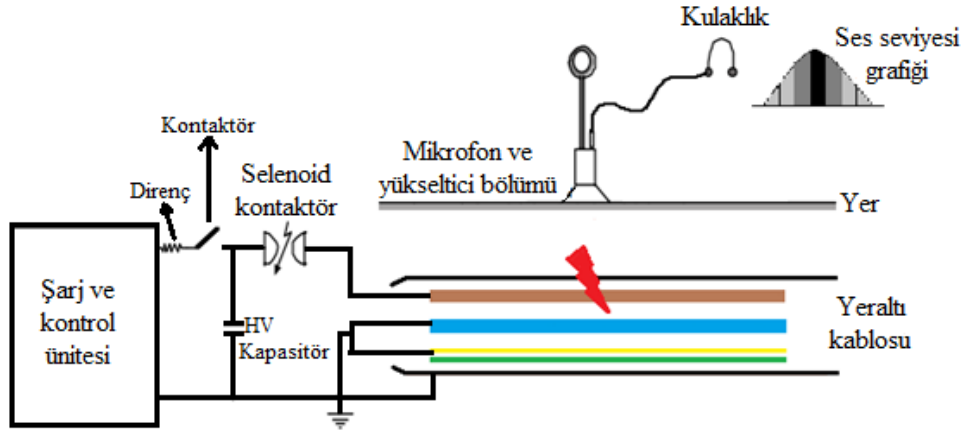
Arıza konumundaki ark ayrıca yer mikrofonu ile tespit edilebilen bir elektromanyetik sinyal üretir. Kablonun bir kanala yerleştirilmesi gibi bazı durumlarda, en güçlü akustik sinyal arızanın üzerinde olmayabilir. Elektromanyetik sinyal ölçülerek bir mesafe hesabı yapılabilir ve alıcı kullanıcıyı arıza konumuna yönlendirir. Elektromanyetik sinyalin yayılma süresi, arızanın bulunduğu yerden etkilenmez. Bu, ark her zaman duymadan önce göreceğiniz için, gök gürültülü bir fırtınadaki ışık ve ses yayılımındaki farklılıklara benzer.



Şekil 2.27 Akustik farklı yerlerde gözükmesi (İnt. Kyn. 5).

3. MATERYAL ve METOT

Darbe yansıtma yöntemi ile elde edilen sonuçlar kullanıcının deneyimine göre değişebileceğinden arıza noktasının kesin tespiti genellikle darbe gerilim yöntemi ile yapılır. Bu çalışmada, bu yöntem için yüksek gerilim darbe üretici tasarlanmıştır. Bu yöntem, arıza noktasında bir darbe üretici tarafından üretilen ses dalgalarının algılanmasına dayanır. Bunun için kullanılan yüksek gerilim darbe üretici temel olarak bir yüksek gerilim kondansatörü, bir atlama aralığı ve bir anahtardan oluşur. Şekil 3.1’de temsili olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Darbe gerilim yöntemi şeması.

Darbe üreticinin yüksek gerilim yüklü darbe kondansatörleri belirli zaman aralıklarında deşarj olur. Darbe üreticinden gönderilen yüksek enerjili darbeler, arıza konumunda bir patlama sesi üretir. Bu ses mikrofon, yükseltici devre ve kulaklıktan oluşan dinleme cihazlarında çıkış olarak gözlemlenir. Deşarj sesinin en yüksek olduğu nokta, mikrofonun kablo arızasına en yakın olduğu noktadır. Deşarj sesi tam olarak arızanın olduğu yerde en yüksek seviyede kaydedilir.

Arıza konumundaki sesin yüksek olmasını sağlayan ise kondansatörlerde biriken yükün yüksekliğine ve sıçrama aralığından çok kısa sürede ve kayıpsız boşalmasına bağlıdır. Darbe üreticilerinde kullanılan gerilim seviyeleri 8 - 16 - 32 kV, enerjiler ise yaklaşık 1000 - 2000 joule enerji seviyesindedir.

Kondansatörlerin şarj süresi, R ve C değerlerine bağlı olan bir zaman sabitine dayanmaktadır. Bu değerlerin sisteme göre optimize edilerek kayıp değerleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Darbe üreticinde depolanan enerji aşağıdaki denklemle verilir.

$$Q = \frac{1}{2} * C * V^2 \text{ Joule}(W * s) \quad (3.1)$$

Arızalı hatta gönderilen dalganın akım değerini ise

$$I_{tepe} = \frac{V}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (3.2)$$

Darbe üretici, tek fazlı gerilimle veya bir akü birlikte çalışan 220V inverter birlikte, yüksek kapasiteli kondansatörleri belli sürede dolduran, yüksek gerilim üreten ve seri arıza durumunda kondansatörlerde depolanan enerjiyi kullanıcının istediği şekildeki aralıklarla deşarj edebilen bir cihazdır. Tasarladığımız cihaza muadillerinden ayıran bir özellik olan uzaktan kontrol edilebilme özelliği ile kullanıcı canlı olarak istediği zaman istediği gerilim değerine ayarlama yaparak deşarj gerilim değerini %0 ile %100 arasında ayarlanabilmektedir.

Cihaz topraklanmış ve enerjiyi hatta verecek olan cihaz kablosu belirli bir kalınlık ve izolasyon seviyesine sahip olmalıdır. En kısa kablo ile arızalı kabloya bağlanmalıdır. Kablonun uçları kısa devre yaparak topraklanmıştır. Daha sonra atlamayı gerçekleştirmek için uygun bir gerilim seviyesi seçilir ve kabloya bir darbe gerilimi uygulanır. Atlamaların başlamasından sonra, amplifikatör kulaklığı ve mikrofon ile önceden tanımlanmış veya eş zamanlı olarak belirlenmiş kablo yolu üzerinde arama çalışmaları başlamaktadır. Ses şiddeti ve indüksiyon alanı fayın arkasında ve arkasında daha düşüktür. Hata sesi, arıza yerinin hemen üzerinde en yüksek seviyeye çıkar ve böylece arızanın yerini gösterir. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere ses seviyesi arızanın olduğu bölümde en yüksek seviyededir ve arıza noktasının darbe gerilimi yöntemi kullanılarak doğru bir şekilde belirlenmesini göstermektedir.

Bu yöntem daha çok yüksek dirençli arızaların konumunu tayin ve tespit edebilmek amacıyla kullanılmaktadır. Gerilim seviyesi, arızalı kablonun nominal gerilim seviyesinin 5 katı seviyesinde belirlenebilir.

Bazı zeminler akustik etkinin önemli bir bölümünü absorbe ettiğinden, sağlıklı görüş için güçlü bir etki gerekebilir. Yumuşak toprak, killi toprak, kablonun altındaki bir kırık ve kablo kılıfının delinmemiş olması sesin yayılmasını büyük ölçüde engelleyebilir. Atlamaların ürettiği ses sinyali, bir metre çapındaki bir alana yayılır. Bu nedenle kablonun yolu kesin olarak bilinmelidir.

Modern yer mikrofonları ayrıca bir arama bobini ile donatılmıştır, böylece kablo güzergahı hakkında doğru bilgi verildiğinde bu işlem kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir. Yönlendirme için ses üretici, darbe geriliminin sağlandığı kabloya paralel bağlanır. Bu iletişim, kabloya yüksek gerilim uygulandığında endüktif bir kelepçe veya dörtgen anten ile sağlanır. Bu ses frekans girişi ve mikrofondaki arama bobini kullanılarak pop sesi duyulur ve eş zamanlı olarak kablo yolu belirlenir. Bu iki sinyali almak için diğer işlemlerde kullanılan bir yükseltici kullanılır.

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi darbe gerilimi kullanılırken tüm uçlar birlikte topraklanır ve kablonun diğer ucunda sıçrama olmaması için güvenlik önlemleri alınır.

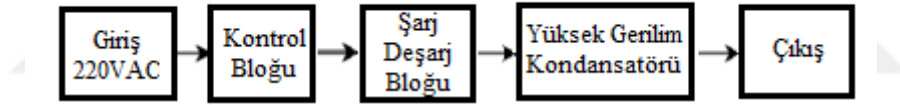
Tasarımı yapılmış olan yüksek gerilim darbe üreticinin ana kısımları ise,

- Yüksek gerilim kondansatör bloğu
- Yüksek gerilim üretim bloğu
- Şarj ve deşarj bloğu
- Kontrol bloğu
- Haberleşme bloğu
- Anahtarlama

3.1 Yüksek Gerilim Darbe Üretici

Akustik method kapsamında arızalı bölgenin tespiti için gerekli olan yüksek gerilim darbe üretici bu çalışma kapsamında tasarlanacaktır. Yüksek gerilim darbe üreticinin çalışma mantığı ve basit devresi şekil 3.2’de verilmiştir. Bu şematik bu tez kapsamında tasarlanmış olup üretimi yapılmıştır.

Giriş 220VAC’ den veya batarya ile beslenen piyasadan alınacak olan eviriciler ile yapılmaktadır. 220VAC olarak giriş yapılan sistemde bulunan 220VAC/380VAC transformatör beslenecektir. Bu transformatörünün çıkışı ise gerilim katlama devresini beslemektedir. Gerilim katlama devresi ise sistemi kontrol eden mikrodnetleyici tarafından kontrol edilen kontaktör ile yüksek gerilim kapasitörlerini şarj eder. Şarjlı kondansatördeki enerji ise yüksek gerilim selenoid kontaktör ile arızalı kablo üzerine verilir.



Şekil 3.2 Yeraltı kablolarının arıza tespit cihazının şeması.

Genel olarak şekil 3.2 ile şeması gösterilen darbe üreticinin elektronik ve elektromekanik bileşenleri vardır. Bu bileşenler;

- Yüksek gerilim üretimi
- Darbe üretimi
- Kontrol ünitesi
- Şarj ve deşarj ünitesi

3.1.1 Yüksek Gerilim Üretimi

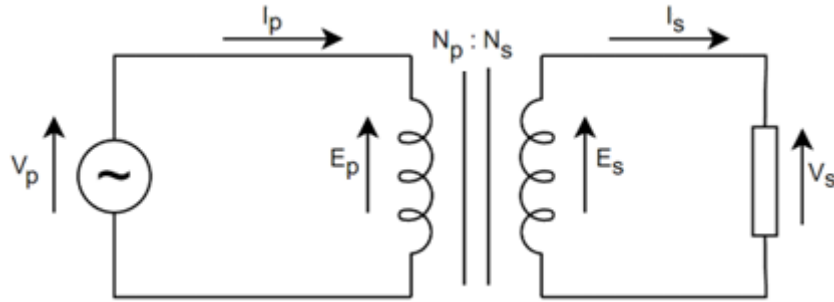
Yeraltı kablolarında meydana gelen arızaların bulunması için kullanılacak olan akustik yöntem kapsamında tasarlayacağımız cihaz yüksek gerilim ve enerji çıkışına sahip

olacaktır. Çıkış gerilim seviyesini yükseltebilecek birden çok yöntem vardır. Bunlardan bazıları yükseltici tip transformatör kullanımı, yüksek gerilim uygulamalarında sıkça karşımıza çıkan marx jeneratörü mantığı ve gerilim katlama devresi olarak incelenecektir.

Mobil olacak olan cihaz içerisine yerleştirilecek olan bu kısım enerji seviyesi, frekans, gerilim seviyesi, maliyet, ağırlık gibi birçok etmen göz önünde bulundurularak seçilmektedir.

3.1.1.1 Yükseltici Tip Transformatör

Elektromanyetik bir alan aracılığıyla bir elektrik devresinden diğer bir devreye enerji enerjisi aktarır. Transformatörler belli miktarda elektrik enerjisi ile istenilen gerilim ve akım değerlerini değiştiren makinelerdir. Herhangi bir transformatörün bobininde değişen bir akım, transformatör çekirdeğinde değişen bir manyetik akı üretir. Ortaya çıkan akım, aynı çekirdeğin etrafındaki diğer sargılarda değişken bir elektromotor kuvveti indükler. Elektrik enerjisi, iki devre arasında iletken bir bağlantı olmadan bobinler ve nüve yardımıyla aktarım sağlar.



Şekil 3.3 Basit transformatör şeması.

Şekil 3.3'te devre şekli verilmektedir. Buradaki şekilde gösterildiği ve anlatıldığı üzere transformatörlerin kullanılabilmesi için değişken bir kaynak olmalıdır. Böylelikle transfer oranı olarak gösterilen “ N_p ” ve “ N_s ” sarım sayılarının orana göre çıkış gerilim ve akım değerleri elde edilmektedir.

$$N_p = \frac{V_p * 10^8}{4,44 * B * S_n * f} \quad (3.3)$$

Formülde görüldüğü gibi N_p değerimiz birincil taraftaki sarım sayımız, bu değere etki eden değişkenler olarak saç kalitesine bağlı olarak B değerimiz mevcut, frekansa değişkeni ve nüve kesitine göre değişmektedir. Tabi bunların haricinde kullanılacak olan tel ve onun kalınlığı da etkilidir. Bu değerde yine güç, gerilim ve akım değerlerine göre hesaplanmaktadır. Belirtilen özellikler göz önüne alındığında piyasadan örnek teşkil edilecek bir transformatör incelendiğinde;

Çizelge 3.1 Piyasada bulunan örnek transformatör özellik tablosu.

	Gerilim	Güç	Ağırlık	Boyut
EG-12	12kV	100VA	25 kg	15cm*22cm*28cm
VTM-10	12kV	150VA	30kg	17cm*26.5cm*34cm

Mobil bir ürün için ağırlık kritik öneme sahiptir. Örnek ürünler incelendiğinde güç değeri düşüktür bu da belirli süre içinde gerilimin istenilen seviyeye ulaşmasını zorlaştırır.

Çizelge 3.2 Transformatör için gereken denklemler ve tanımları (İnt. Kyn. 4).

Açıklama	Denklem	Birimi
Manyetik nüve kesiti	$S_n = C * \sqrt{s_2} \quad S_n = a * b$	cm ²
Birincil taraf gücü	$S_1 = \frac{S_2}{\eta}$	VA
Manyetik akı	$\phi = B * S_n$	Maxwell
Birincil taraf sarım sayısı	$N_p = \frac{V_p * 10^8}{4.44 * B * S_n * f}$	-
İkincil taraf sarım sayısı	$N_s = \frac{V_s * 10^8}{4.44 * B * S_n * f}$	-
Taraf akımı	$I_1 = \frac{S_1}{V_1}$	A
Kablo kesit alanı	$s_n = \frac{I_1}{J}$	mm ²
İletken çapı	$d_n = \sqrt{(4 * S_1)/\pi}$	mm
Sargının içten içe yüksekliği	$h_m = h - (\text{hava aralığı} + \text{bant kalınlığı})$	mm

Çizelge 3.2’de verilen denklemler ile sıfırdan bir tasarım yapılabilir ancak çizelge 3.1’de görüldüğü üzere ağırlık ve boyut olarak dezavantajlı durum iyileşmeyecektir. Çizelge 3.2’de verilen denklemlerdeki değişkenler ise çizelge 3.3’te verilmektedir.

Çizelge 3.3 Denklemlerde kullanılan sembollerin ifadeleri ve birimleri (İnt. Kyn. 4).

Anlamı	Sembol	Birimi
Nüve kesiti	S_n	cm^2
Birincil taraf gücü	S_1	VA
İkincil taraf gücü	S_2	VA
Birincil taraf gerilimi	V_p	V
İkincil taraf gerilimi	V_s	V
Taraf gerilimi	V_1	V
Taraf akımı	I_1	A
Birincil taraf sarım sayısı	N_p	-
İkincil taraf sarım sayısı	N_s	-
İletken kesiti	s_n	mm^2
İletken çapı	d_n	mm
Verim	η	
Frekans	f	Hz
Manyetik akı yoğunluğu	B	Gauss
Manyetik akı	ϕ	Maxwell
Sac kalite faktörü	C	-
Akım yoğunluğu	J	A/mm^2

Manyetik akı yoğunluğu değeri sacın kalitesine göre değişmektedir ancak normal bir sac için 10000 gauss olarak denklemlerde kullanılır. Bu değer ise yine sacın B-H dediğimiz karakteristik eğrisinden faydalanılarak alınır. Bu eğrinin bize sacın doyum değerini gösterir. Bundan dolayı yanlış veya gereksiz seçilen bir değer transformatörün doyuma gidip gereksiz ısınmasına sebebiyet vermektedir.

Sac kalite faktörü ise genel anlamda 0,7 ile 1,5 aralığında seçilmektedir. Sacın kalitesi iyi ise düşük, kötü ise yüksek alınmaktadır ancak bu değer standart olarak 1 kabul

edilmektedir. Akım yoğunluğu değeri ise bir birimlik kesit alana sahip kablodan geçen akım değeri olarak tanımlanabilmektedir. Hava yoluyla soğuma yapabilen transformatörlerde bu değer 1,8 ile 2,5 A/mm^2 olarak değerlendirilir.

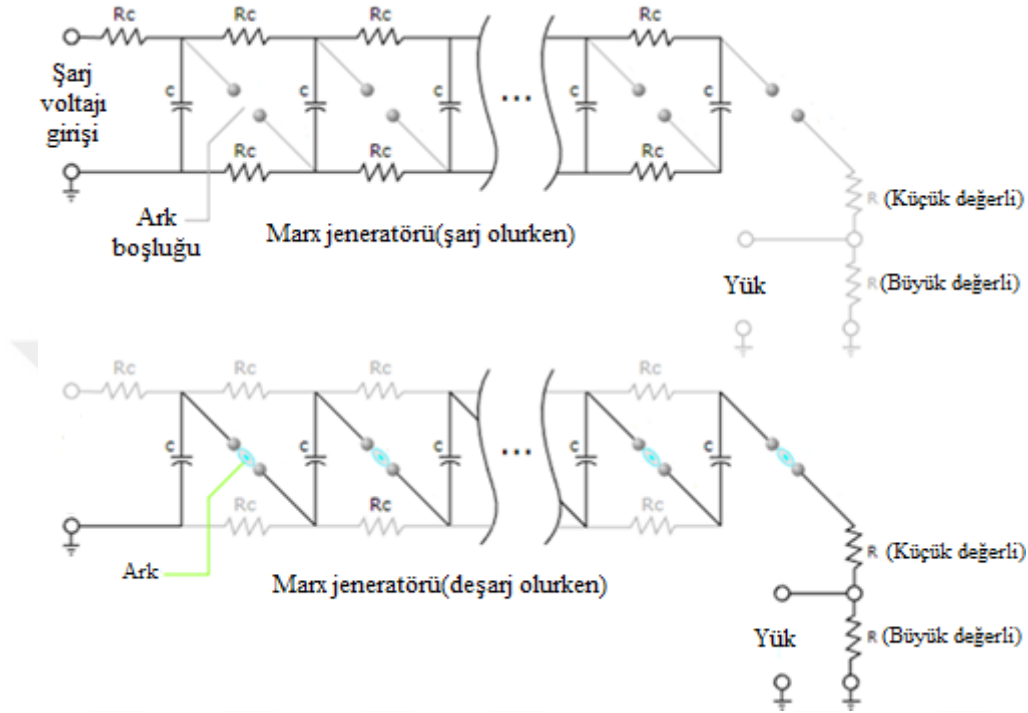
3.1.1.2 Marx Jeneratörü

Yüksek gerilimi elde edebileceğimiz diğer bir yöntem ise marx jeneratörüdür. Bu devre ile hem yüksek gerilim elde edilebilir hem de çıkış kısmında “pulse” olacak bir sinyal şeklinde anahtarlama yapılabilir.

Bir Marx jeneratörü, öncelikle 1924'te Erwin Otto Marx tarafınca tanımlanan bir elektrik devresidir. Amacı, düşük gerilimli bir DC kaynağından yüksek gerilimli bir darbe üretmektir. Marx jeneratörleri, yüksek enerji fiziği deneylerinde ve yıldırımın elektrik hattı teçhizatı ve havacılık ekipmanı üstündeki etkilerini simüle etmek için kullanılır.

Çalışma mantığı, bir takım kondansatörü paralel olarak şarj ederek ve arkasından bu tarz şeyleri ansızın seri olarak bağlayarak yüksek gerilim darbesi üretir. Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, ilk başta n kapasitör (C), dirençler (RC) vesilesiyle bir DC güç deposu tarafınca bir VC gerilimine paralel olarak şarj edilir. Anahtar olarak kullanılan kıvılcım boşlukları, aralarında VC gerilimine sahiptir, sadece boşlukların VC'den daha büyük bir kırılma gerilimi vardır, bundan dolayı, kapasitörler şarj olurken tüm bunlar aleni dönem benzer biçimde davranır. Son boşluk, jeneratörün çıkışını yükten yalıtır; bu boşluk olmadan yük, kapasitörlerin şarj olmasını engeller. Çıkış darbesini kurmak için, ilk kıvılcım aralığının bozulması (tetiklenmesi) sağlanır; arıza, ilk iki kondansatörü seri olarak yerleştirerek, ikinci kıvılcım aralığı süresince ortalama 2VC'lik bir gerilim uygulayarak boşluğu müessir bir biçimde kısa dönem yapar. Sonuç olarak, ikinci boşluk, üçüncü kondansatörü "yığına" eklemek için bozulur ve süreç, bütün boşlukları sırası ile kırmaya devam eder. Kıvılcım boşluklarının kondansatörleri seri bağlayarak yüksek gerilim oluşturma işlemine ereksiyon denir. Son boşluk, kapasitörlerin "yığın" serisinin çıkışını yüke bağlar. İdeal olarak, çıkış gerilimi, kapasitör sayısı ile şarj geriliminin çarpımı olan nVC olacaktır, sadece pratikte bu kıymet daha azdır. Kondansatörler kurulduğunda bile Rc şarj dirençlerinin hiçbirinin şarj geriliminden daha fazlasına maruz kalmadığına dikkat edin.

Mevcut şarj, kapasitörler üstündeki şarjla sınırlıdır, bundan dolayı kapasitörler yükü boşaltırken çıkış kısa bir darbedir. Bir noktada, kıvılcım boşlukları iletimi durdurur ve düşük gerilim deposu, kapasitörleri yine şarj etmeye başlar.



Şekil 3.4 Marx jeneratörünün şarj ve deşarj devre şeması.

Kondansatörlerin paralel olarak yüklenip seri olarak boşaltılarak gerilimin çarpılması prensibi, lazer yazıcılar ve katod ışın tüplü televizyonlar için yüksek tansiyon üretmekte kullanılan tansiyon çarpan devresinde de bu devreye benzerlikler göstermektedir. Marx jeneratörü, kondansatörü dirençlerle şarj eder, bu da uzun vakit alır. Sonuç olarak, şarj süresi artar. Güç kaynağına en yakın olan kapasitör öbürlerinden daha süratli şarj olur. Bunun nedeni, artan direncin bir kararı olarak kapasitör ile güç deposu arasındaki artan mesafedir. Bu, Marx jeneratörünün dezavantajlarından biridir.

- Verimlilik kaybı: Aynı nedenden ötürü akım dirençlerden geçerken Marx üreteç devresinin verimliliği azalır.
- Kısa ömür: Zaman vakit değiştirilmesi ihtiyaç duyulan bir kıvılcım aralığının elektrotları, kıvılcım aralığı yöntemiyle tekrarlayan boşalım döngüsü sebebiyle kısa bir ömre sahiptir.

- Şarj ve boşalım döngüsü yeniden süresi: Darbe üreticinin yeniden süresi, uzun şarj süresi sebebiyle fazlaca yavaştır. Bu, Marx üreten devredeki bir başka mühim kusurdur.

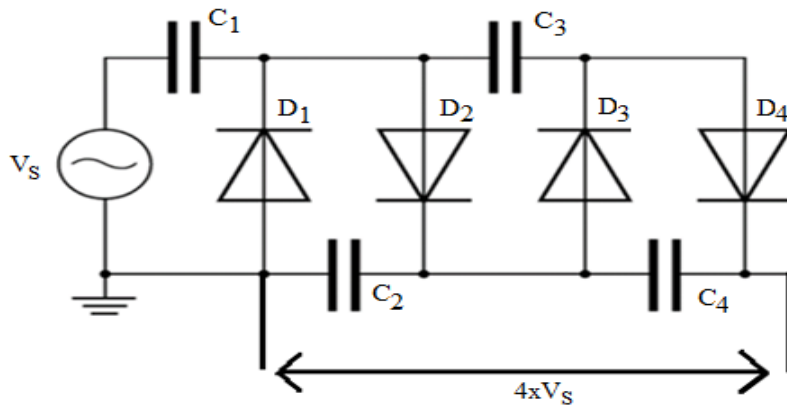
•

Marx jeneratörü daha çok düşük enerji uygulamalarında kullanılmaktadır. Enerji seviyesi düşük olduğu durumlarda boyutları küçük olmaktadır ancak yeraltı kablolarındaki arıza bulma metotlarından olan akustik metot için istenilen enerji seviyesi için boyutlar göz önüne alındığında kullanıma pek de uygun değildir.

3.1.1.3 Gerilim Katlama Devresi

Gerilim katlama devreleri de yüksek gerilim üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Gerilim katlama devresi ile yüksek gerilim yeraltı kabloları için ihtiyaç duyulan gerilim üretilmektedir. Gerilim katlayıcı girişlerine uygulanan gerilim, AC veya darbeli bir işaret olmalıdır. Gerilim katlayıcı çıkışından ise doğrultulmuş DC gerilim elde edilir.

Gerilim katlamada devresi kondansatör ve diyot ile kurulan bir devredir. Şekil 3.5'te görüldüğü üzere giriş gerilimi ile D_1 diyotu üzerinden C_1 kondansatörü dolmaya başlamaktadır. Bu kondansatör dolduktan sonra bir kaynak olarak davranır ve alternatif gerilim kaynağı ile D_2 diyotu üzerinden C_2 kondansatörünü doldurur. Bu süreçler devam ettikten sonra kabaca alt ve üst taraf diye adlandırabileceğimiz kondansatörlerin alt kısmında bulunan her bir kondansatör üzerine $2 \cdot V_s$ değerinin DC gerilim değeri görülür. Yani gerilim katlayıcı devresi kullanılarak dc yüksek gerilim elde edilir.



Şekil 3.5 Gerilim katlama devresi

Görüldüğü üzere kondansatör sayısını ve diyot sayısını arttırarak çıkış gerilim seviyemizi arttırabilmekteyiz. Yeraltı kablolarındaki arızalar için kullanılacak olan cihazda bu yöntem ağırlık, üretebileceği enerji seviyesi, kaplayacağı yer olarak diğer yöntemlerden ayrılmaktadır.

Örneğin piyasadan tedarik edilecek çizelge 3.4’te belirtilen şekil 3.6’de gösterilen “20F160” kodlu bir diyot ile 100 μ F 400V kondansatörlerden oluşan bir gerilim katlama devresini inceleyelim.

Çizelge 3.4 Solid State şirketinin 20F160 kodlu diyot.

Kısaltma	Tanım	Değer
I_F	En yüksek ortalama akım	20A
V_{FM}	En yüksek gerilim düşümü	1.2V
I_{FSM}	En yüksek anlık akım, 10ms	350A
I_{FRM}	En yüksek tekrarlanan akım	120A
T_{J-C}	Kılıftan ortama termal direnci	0.8°C/W
V_R	Ters gerilim seviyesi	1600V
\$	Adet fiyatı	1.8\$



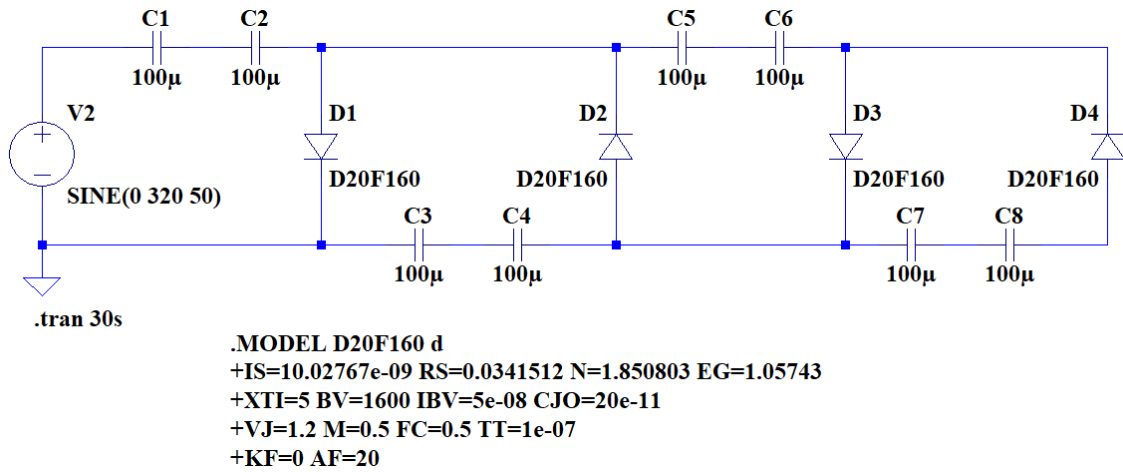
Şekil 3.6 20F160 kodlu diyonu görseli.

Görüldüğü üzere seçilen diyot hem boyut anlamında hem fiyat anlamında avantajlıdır. 1600V, 20A değeri her bir basamak için kullanılabilir bir değerdir.



Şekil 3.7 250VAC – 400VDC 100µF kondansatör.

Şekil 3.7’ de gösterilen kondansatör ise boyut anlamında 8cm uzunluğunda 5cm’lik bir silindir şeklindedir. Ağırlık olarak 160gr’dır. Kondansatör temsili olarak gösterilmiştir.

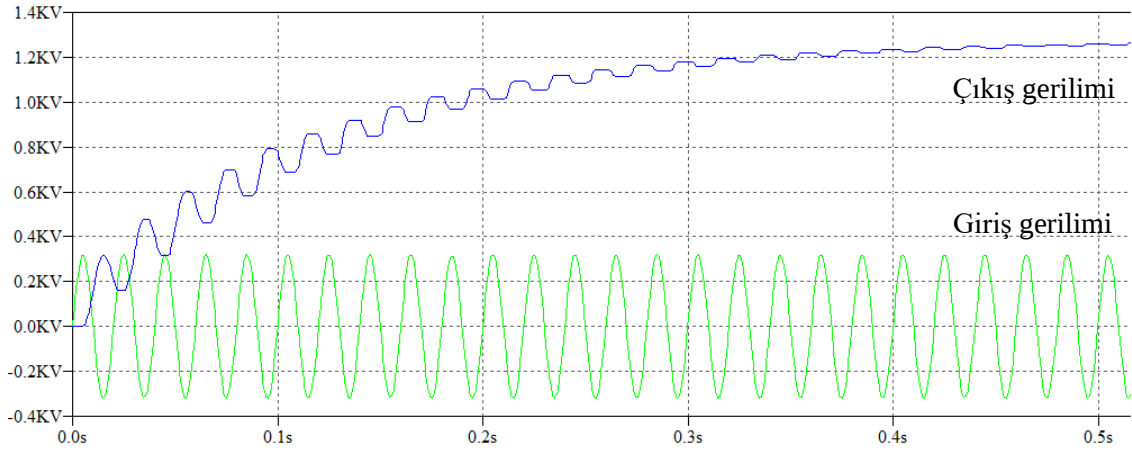


Şekil 3.8 Gerilim katlama devresinin örnek bir LTspice simülasyonu.

Şekil 3.8’de gösterilen şematik ile LTspice programında gerilim katlama devresinin analizi için giriş gerilimini 4 kat arttıran bir simülasyon yapılmıştır. Kütüphanede tanımlı olmayan diyot ve kondansatör değerleri işlenmiştir. Giriş gerilimi için;

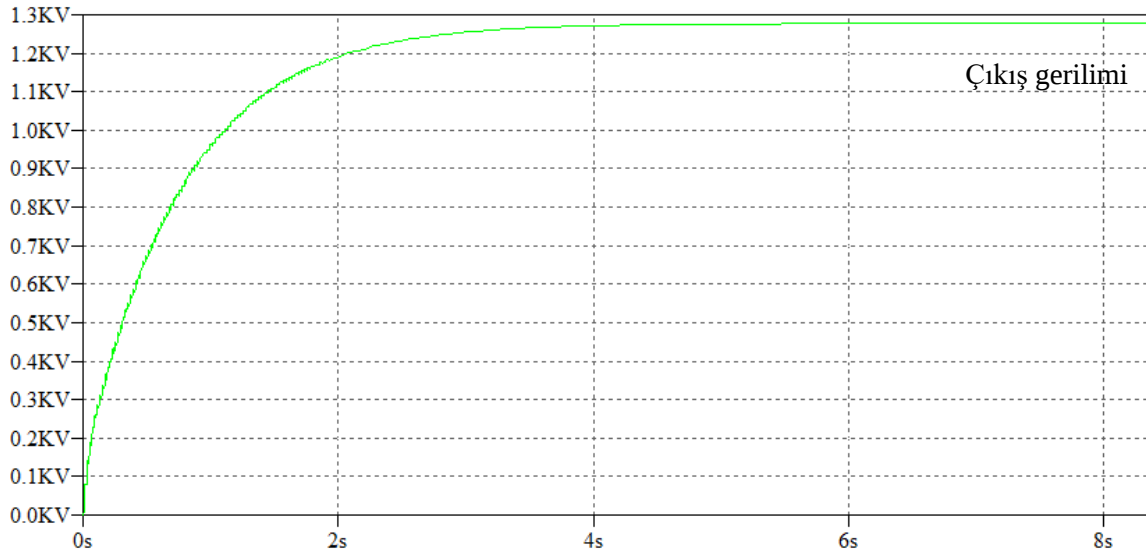
- Offset değeri 0V olarak girilmiştir.
- Genlik değeri 320V olarak girilmiştir. 220VAC rms değere sahip gerilim seviyesinin maksimum değeri 320V olduğundan bu şekilde tanımlanmıştır.
- Şebekeden beslenecek sistem için 50Hz frekans değeri girilmiştir.

Simülasyon 1 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Çıkış gerilim seviyesi yaklaşık 0,5 saniyede giriş geriliminin 4 katı seviyesine çıkmıştır. Şekil 3.9’da görüldüğü gibidir. Yeşil ile gösterilen grafik giriş gerilimini temsil etmektedir. Mavi ile gösterilen grafik ise çıkış gerilimini göstermektedir.

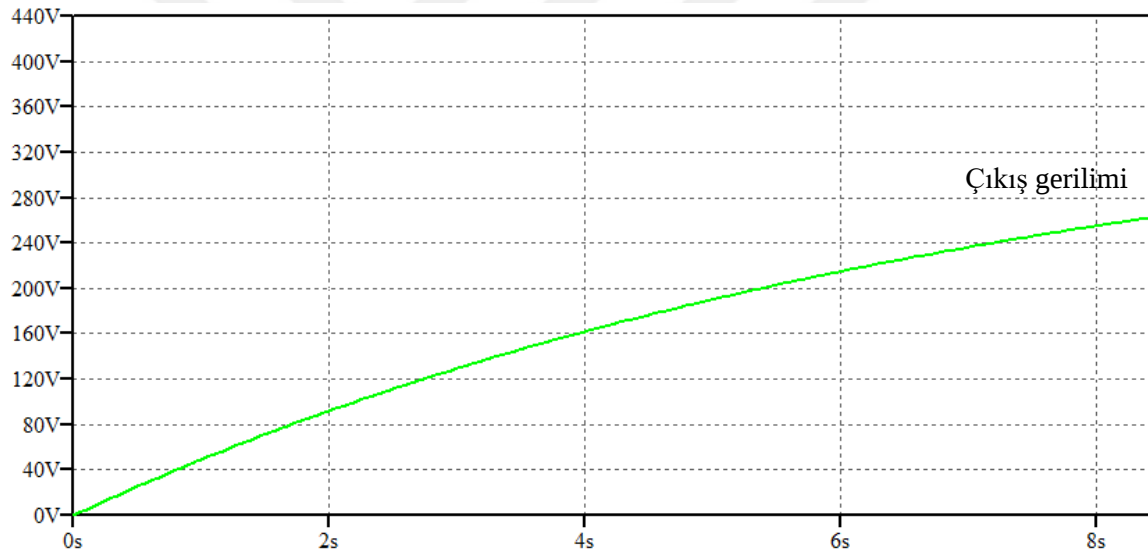


Şekil 3.9 Gerilim katlayıcı devrenin simülasyondaki gerilim (KV)-zaman(sn) grafiği.

Burada seçilen kondansatör değeri için 2 farklı simülasyon yapılmıştır. Bu simülasyon sonuçlarına göre 100 μ F kondansatör değeri bizim tasarımımız için uygunluğu görülmüştür. Yük altındaki grafikleri aşağıda verilmiştir. Bu simülasyon sonuçları şekil 3.10 ve şekil 3.11 olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.10 100µF kondansatör ile yapılmış olan simülasyonun grafiği.



Şekil 3.11 1µF kondansatör değeri ile yapılmış olan simülasyon grafiği.

Şekil 3.10 ve şekil 3.11’de görüldüğü gibi gerilim katlama devresindeki kondansatör değeri değiştiğinden aynı sürede elde edebileceğimiz çıkış gerilimi değişmektedir. 100µF kondansatör değeri kullanılarak yapılan simülasyonda 6 saniye içerisinde gerilim seviyesi giriş geriliminin 4 katı olan 1280V kademesine ulaşmışken, 1µF kondansatör değeri kullanılarak yapılan simülasyonda aynı sürede 220V kademesine ulaşabilmiştir. Bu durum yine denklem 3.1’den faydalanılarak aynı zaman süresi içerisinde 100µF kondansatör değerinin enerji seviyesi, 1µF kondansatörün enerji seviyesinden fazla olacağı hesaplanabilmektedir. Buradan alınan sonuç ile şarj edilecek olan yüksek gerilim

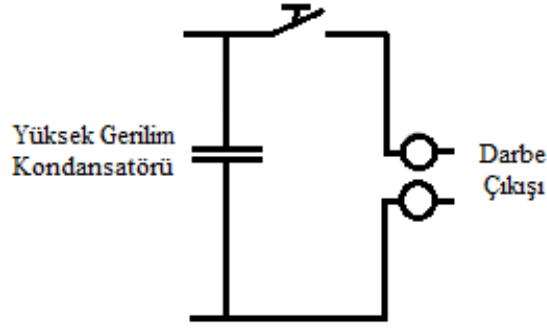
kondansatörünün şarj süresini etkileyen bir diğer faktörün gerilim katlayıcı devredeki kondansatör değeri olduğu anlaşılmaktadır. Bundan dolayı kondansatör değerimiz 100 μ F olarak seçilmektedir.

İstenilen gerilim değeri için 14 basamaklı bir gerilim katlama devresi tasarımı öngörülmektedir. Her bir basamakta gerilim seviyesini yakalamak adına bir diyot, iki adet kondansatör seri olarak bağlanacaktır. Böylelikle toplam olarak 14 adet diyot, 28 adet kondansatör kullanılacaktır. Öngörülen gerilim katlama devresi istenilen gerilim değeri birlikte yaklaşık olarak 45cm boyunda 12cm genişliğinde 12cm yüksekliğinde, yaklaşık 5kg ağırlığında olacaktır. Böylelikle mobil olacak cihaz için ağırlık kriteri, maliyet ve kolaylık anlamında avantaj sağlanmış olacaktır.

3.1.2 Darbe Üretimi

Yeraltındaki arızalı kabloya gönderilmek istenen yüksek gerilim ve yüksek enerji değeri anlık olarak gönderilecektir. Bu darbeyi oluşturmak için seçilen gerilim katlama devresine uyumlu bir yapı tasarımı gerçekleştirilmelidir. Gerilim üretimi bölümünde bahsedilen marx jeneratörü de darbe oluşturmak için kullanılabilir. Ancak istenilen gerilim ve enerji seviye için oluşturulacak olan marx jeneratörü boyut olarak çok büyük olacaktır. Buna ek olarak daha önce bahsedilen ömür, süreklilik gibi durumlar göz önüne alındığında hala dezavantajlı durumdadır.

Basit olarak değerlendirilecek olursa, oluşturulan yüksek gerilim değeri ile bir yüksek gerilim kondansatör yapısı şarj edilerek anlık enerji seviyesi istenilen değere çıkarmak için depolanacaktır. Burada kondansatör değeri ile gerilim seviye depolanabilecek enerji seviyesini belirlemektedir.



Şekil 3.12 Darbe üretimi için tasarlanmış olan şematik gösterimi.

Şekil 3.12 ile gösterilen basit bir darbe üretim şeklidir. Doldurulmuş olan yüksek gerilim kondansatörü bir anahtar yardımıyla arızalı hat üzerine gönderilir. Böylelikle arızalı noktada oluşması beklenen ark için kaynak oluşturulmuştur.

Tasarım yapılırken istenilen gerilim seviye ve enerji miktarı için bir yüksek gerilim kondansatörü yapısı oluşturulmalıdır. Bu yapı ile depolanacak olan enerji arızalı hat için kullanılacaktır.

3.1.2.1 Yüksek Gerilim Kondansatörü

İstenilen yüksek gerilimin depolanabilmesi ve yüksek enerji ihtiyacının karşılanması için sistemimizde 4000V 600µF kondansatör kullanılmıştır. Şekil 3.13'te gösterildiği gibi kullanarak yaklaşık 8000V 300µF kondansatör bloğu elde edilmiştir.

Sistem üzerinde biriken enerji formülü;

$$E = \frac{1}{2} * C * V^2 \quad (3.4)$$



Şekil 3.13 Darbe jeneratörünün yüksek gerilim kondansatörü.

Denklem 3.4 kullanılarak istenilen gerilim seviyesinde istenilen enerji miktarını verebilecek olan sistem için kondansatör değeri hesaplanmıştır ve 4500 V gerilim seviyesine yaklaştığında üzerinde biriken enerji yaklaşık 3000 joule seviyesindedir. Anahtarlama devreye girdiğinden yeraltı kablosu üzerinde bu enerji aktarılır.

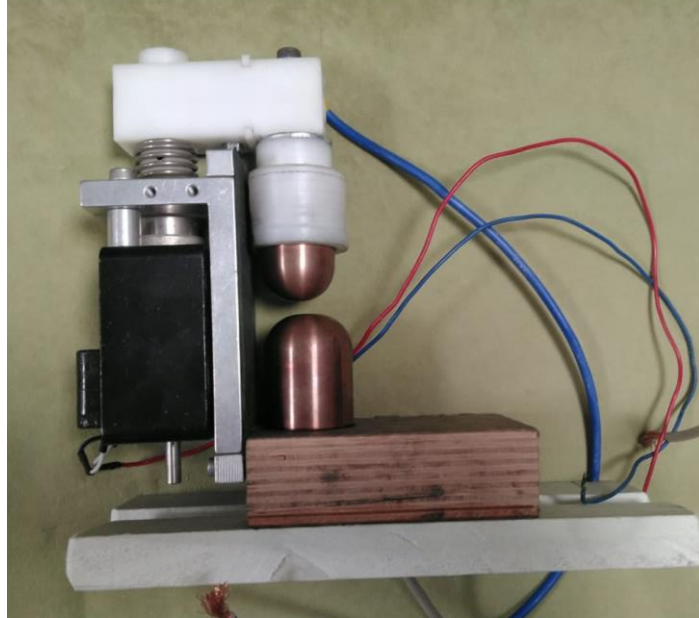
3.1.2.2 Selenoid Tip ve Normal Tip Kontaktör

Kontaktörler endüstride kullanılan yüksek akımı kontrol etmemize olanak sağlayan elektronik veya elektromekanik elemanlardır. Şekil 3.14’te örnek bir kontaktör gösterilmektedir. Bobinin ürettiği elektromanyetik kuvvetle kapalı kontakları açan veya açık kontakları kapatan ve yay kuvvetiyle kontakları önceki konumlarına döndüren elektronik anahtarlama cihazına kontaktör denir. Kontaktör bir elektromıknatıs, bir palet ve bir kontakten oluşur.



Şekil 3.14 Kontaktör.

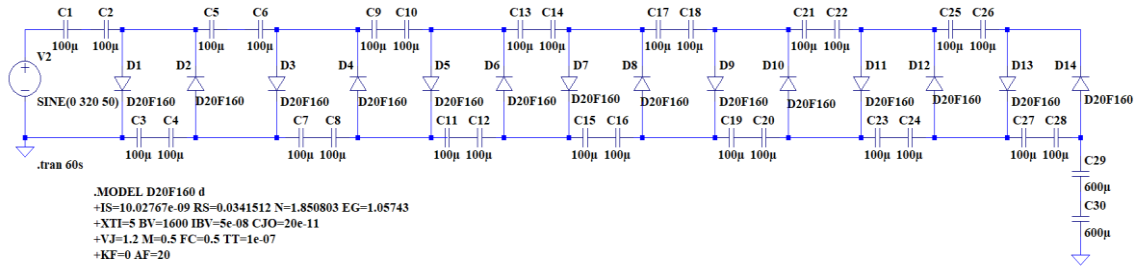
Şekil 3.14 ile gösterilen kontaktör yüksek gerilimi şarj ederken kullanılmıştır. Şekil 3.15'te gösterilen kontaktör ile yüksek gerilimin oluşturduğu enerjiyi kablo üzerine verebilmek için kullanılmıştır. Bu kontaktör ise yine elektromekanik bir elemandır. Ancak ömrü biraz daha fazladır. Çalışma gerilim seviyesi 24VDC'dir. Enerji verildiğinde şekil 3.15'te görüldüğü gibi kontak uçları birbirinden ayrır. Kontrol algoritması buna göre düzenlenmiştir.



Şekil 3.15 Selenoid kontaktör.

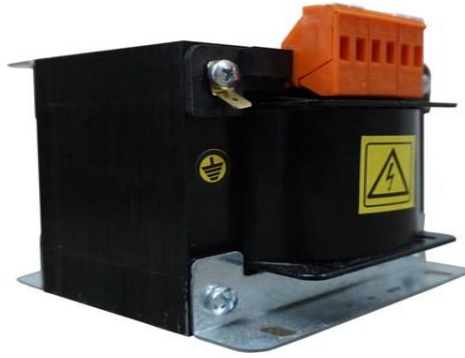
3.1.3 Şarj – Deşarj

Gerilim katlama devresi yardımıyla üretilmiş olan yüksek gerilim değeri istenilen enerji seviyesine çıkabilmek için bir yüksek gerilim kondansatöründe depolanmaktadır. Yüksek gerilim kondansatöründe depolanacak bu enerji öncelikli olarak şarj olmalıdır.



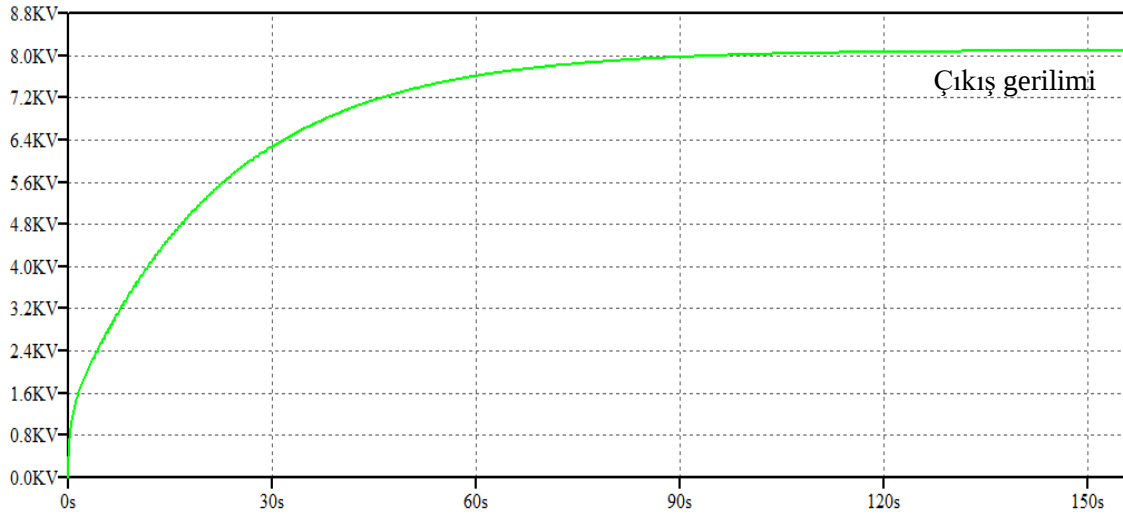
Şekil 3.16 Giriş gerilimin 14 katını verecek olan gerilim katlama devresi

Şekil 3.16 ile yapılan simülasyon ile şarj süresinin uzun olduğu görülmektedir. Bundan dolayı şarj süresini kısaltmak amacıyla giriş gerilim değerini biraz yükseltmek için piyasada bulunan izolasyon transformatörü kullanılması değerlendirilmiştir. Bu transformatör şekil 3.17’de gösterilmektedir.



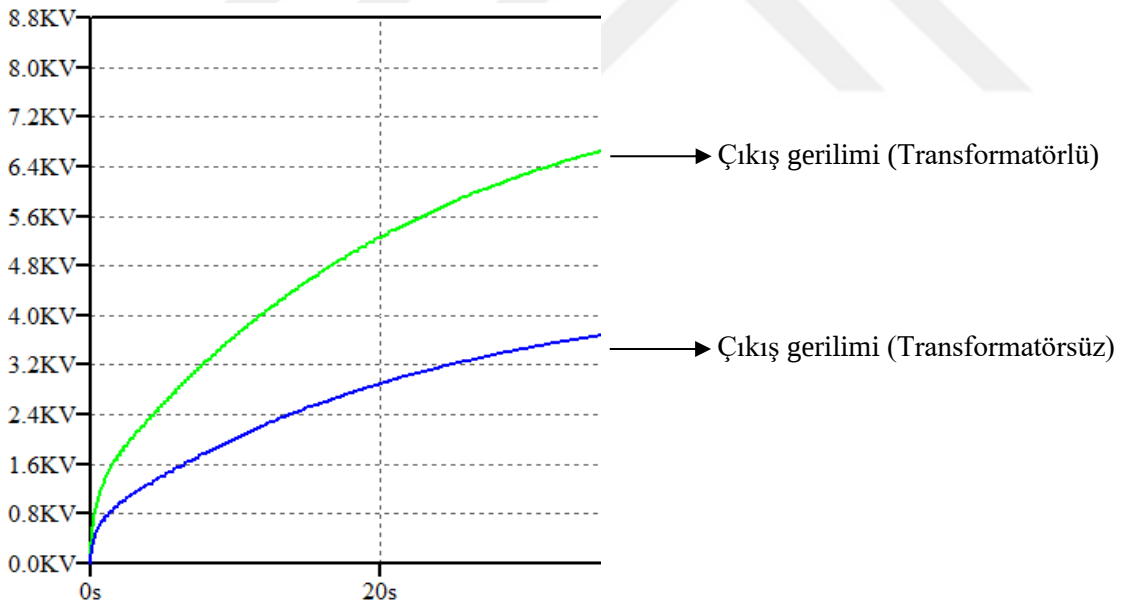
Şekil 3.15 İzolasyon transformatörü.

Bu transformatör ile gerilim seviyesi 220VAC kademesinden 380VAC kademesine geçmiştir. Transformatörün güç değeri ise 750VA olarak seçilmiştir. Transformatör eklemesi ile yapılan simülasyon sonucu istenilen en yüksek gerilim seviyesine yaklaşık olarak 2 dakika içerisinde ulaştığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.16 İzolasyon transformatörü ile yapılan simülasyon sonucu.

Şekil 3.19’de yapılan simülasyon ile transformatörlü ve transformatör olmayan şemanın şarj süresi gösterilmiştir. Gerilim seviyesini arttırmamız bize zaman olarak kazanç sağlamaktadır. Süre neredeyse 2 kat azalmıştır.



Şekil 3.19 Transformatör kullanılan ve kullanılmayan devre şemasının simülasyonu.

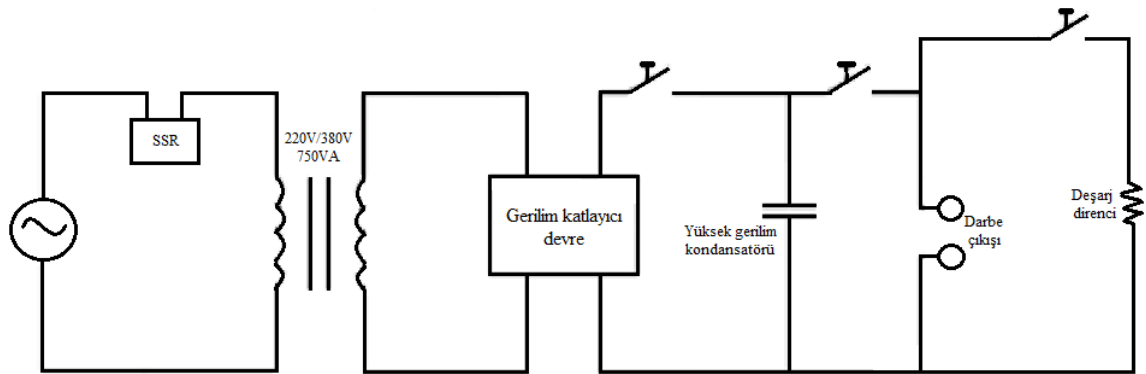
Şarj işleminin kontrolü ve acil durumlarda sistemi kapatabilmek adına piyasadan hazır olarak alınan 25 amper değerinde “Solid state relay (SSR)” yani elektronik röle olarak bilinen malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.20 Aç kapa özelliği için kullanılan elektronik röle

SSR için giriş gerilimi 3-32VDC arasında olabilir. Çıkış için kontrol edilebilen gerilimi ise 24-380VAC olarak kullanılabilir. SSR'ın 10A,25A,40A,75A gibi akım seviyelerine göre çeşitleri vardır. SSR, alternatif akımın sıfır geçiş noktalarında anahtarlandığı için sistemin geri kalanının yüksek gerilimden dolayı anlık yüksek akım çekme durumunun önüne geçilmiştir.

SSR eklenmesi ile cihazın şeması şekil 3.21'de olduğu hale gelmiştir. Şemanın netleşmesinin ardından, sıra bu şemanın kontrolünü sağlayacak olan kontrol biriminin tasarlamaya gelmiştir.



Şekil 3.17 Yüksek gerilim üretecek olan cihazın şeması.

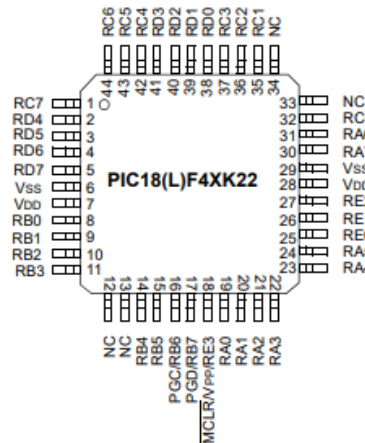
Cihaz yapısı şundaki hali ile SSR, kontaktör, transformatör, gerilim katlama, yüksek gerilim kondansatörü, kontrol ünitesi bileşenleri ile tasarlanmıştır.

Cihaz daha önce belirtilen kontaktörler vasıtasıyla yüksek gerilim üretip, yüksek gerilim kondansatörünü şarj edecektir. Şarj edilmiş olan yüksek gerilim kondansatörü selenoid kontaktör vasıtasıyla darbe enerjisi arızalı hatta iletilecektir. Eğer ki darbe yapılmasına rağmen enerji hala kondansatör üzerinde ise ve kullanıcı bu enerjiyi kablo üzerine göndermek istemezse diğer kontaktör vasıtasıyla direnç üzerine gönderip deşarj işlemini yapacak altyapı hazırlanmıştır.

3.1.4 Darbe Jeneratörünün Kontrol Ünitesi

Cihazın kontrolünü sağlayacak olan bu birim işlemci tabanlı olup yazılım ile bu kontrolü sağlanması amaçlanmıştır. Kontrol biriminin tasarımı için öncelikli olarak hangi özelliklerin kontrolü gerekli ve hangi özelliklere sahip olacağı belirlenmelidir. Bu soruya cevap verecek olursak;

- Cihaz yüksek gerilimi açıp kapatacak olan SSR yi kontrol etmesi gerekmektedir.
- Şarj, deşarj ve darbe özelliklerini kontrol etmesi gerekmektedir.
- Çıkış gerilimini okuyup bilgi vermesi veya korumaları aktif etmesi gerekmektedir.
- Bilgi ekranına sahip olması gerekmektedir.
- Uzaktan kontrol için haberleşme birimine sahip olması gerekmektedir.
- Kendi çalışmasını sağlayabilmek için güç kaynağı gerekmektedir.
- Manuel kontrol için gerekli butonlara sahip olması gerekmektedir.



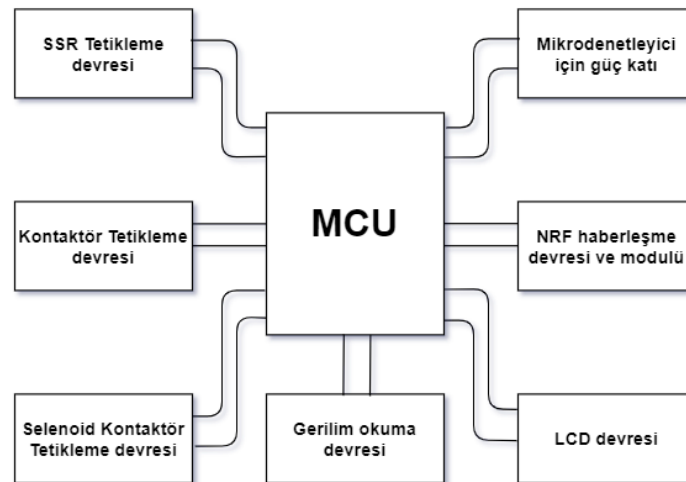
Şekil 3.18 Mikrodenetleyici (MCU).

Bu özellikler için bir işlemci gerekmektedir. Şekil 3.18’te gösterilen işlemci daha önceden de kullandığımız bir işlemcidir.

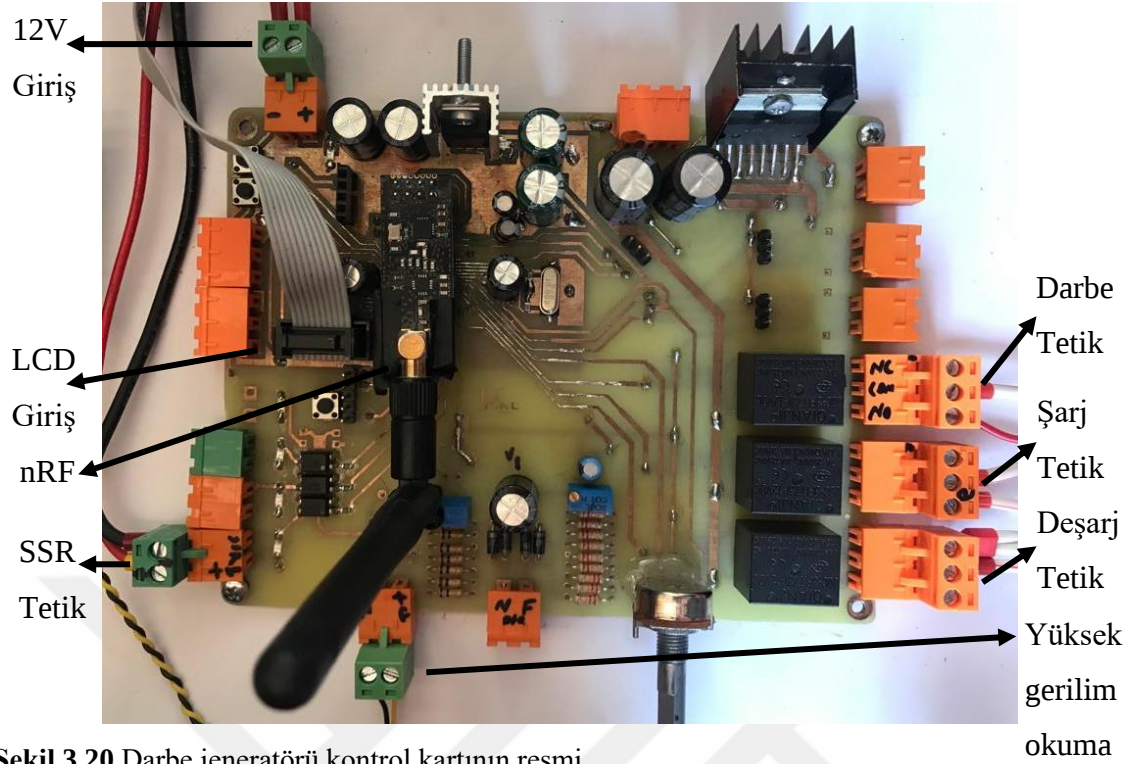
Çizelge 3.5 İşlemcinin özellikleri

Teknik özellikler	İşlemci
Mikrodenetleyici	PIC18F45K22
Çalışma gerilimi	5V
Dijital pin sayısı	36
Analog pin sayısı	28
Çıkış akımı (pin başına)	20mA
Flash hafıza	64 KB
SRAM	4KB
EEPROM	1024 bayt
Frekans	64Mhz
Çözünürlük	8bit

Çizelge 3.5’te kullanacağımız işlemcinin teknik özellikleri verilmiştir. Bu işlemci kullanılarak tasarlanacak olan kontrol kartı cihazın tüm özelliklerini destekleyecektir. Şekil 3.23’te ise kontrol kartının şeması verilmiştir.



Şekil 3.19 Mikrodenetleyici kartı blok şeması.



Şekil 3.20 Darbe jeneratörü kontrol kartının resmi.

Şekil 3.24’te gösterildiği gibi devre taraşımı gerçekleştirilip üretilmiştir. Cihaz denemesi için kutu üzerine yerleştirilip uygun yerlerden delikler delinerek bağlantıları yapılmıştır. Haberleşme modülünün alt kısmında işlemci bölümü mevcuttur. Kart kenara yerleştirilmiş butonlar kutu üzerine çıkarılarak manuel kontrol için kullanılabilir. Kart üzerinde bulunan potansiyometre de gerilim ayarı gibi özellik için kutu üzerine taşınabilir.

Elektronik devre 220VAC’den veya batarya ile beslenen inverter çıkışından enerjilenebilmektedir. Bundan dolayı piyasada kullanılan 220VAC gerilim seviyesinden 12VDC seviyesine çeviren bir modül kullanılmıştır. Ardından devre içerisinde kullanılmak üzere 5V, 3.3V gibi gerekli gerilim değerleri elde edilip devrenin çalışması için gerilim seviyeleri oluşturulmuştur.

Acil durum veya aç-kapa özellikte kullanılması öngörülen SSR için tetik devresi tasarlanıp devre üzerine yerleştirilmiştir. Şarj, deşarj gibi özellikler amacıyla kullanılan kontaktörlerin tetiklenebilmesi için yine tetik devreleri elektronik kart üzerine yerleştirilmiştir.

Yüksek gerilim kondansatörünün gerilim seviyesini okuyabilmek amacıyla gerilim okuma devresi yerleştirilip en optimum değerler göz önüne alınarak gerilim bölücüdeki direnç değerleri seçilmiştir.

Uzaktan kontrol ve haberleşme için 2.4GHz ile haberleşen “nRF modülü” kullanılmıştır. Şekil 3.25’te gösterilmiştir. Bu modül ile 2km çapındaki daire içerisindeki herhangi bir mesafeden alınan bilgi ile sistemin çıkacağı gerilim, kondansatördeki gerilim değeri, anahtarlamamanın yapılması ve yapıp yapılmadığı gibi birçok verinin uzakta olan kullanıcı tarafından bilinerek kontrol edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.21 nRF24L01+ modülü.

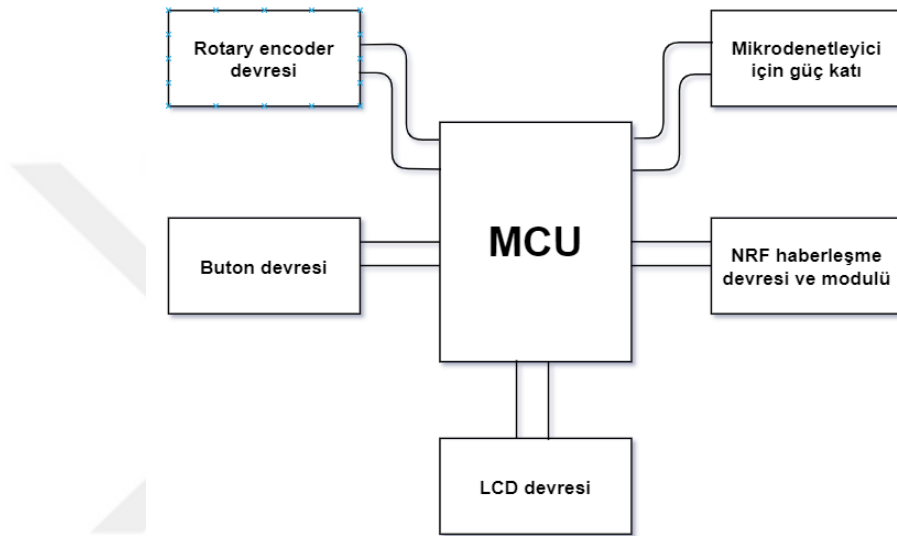
Kart üzerine yerleştirilecek bir RS422, RS485 ve RS232 gibi bir arayüz ile cihazın kontrolü bilgisayar arayüzü ile de yapılabilir. Bu özellik kullanıcıların isteğine bağlı olarak ekleyip çıkartılabilir. Bu uygulamada sistemin kontrolünü uzaktan yaparak belirli bir yere bağlı kalmayı ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

3.2 Darbe Jeneratörünün Kontrol Kumandası

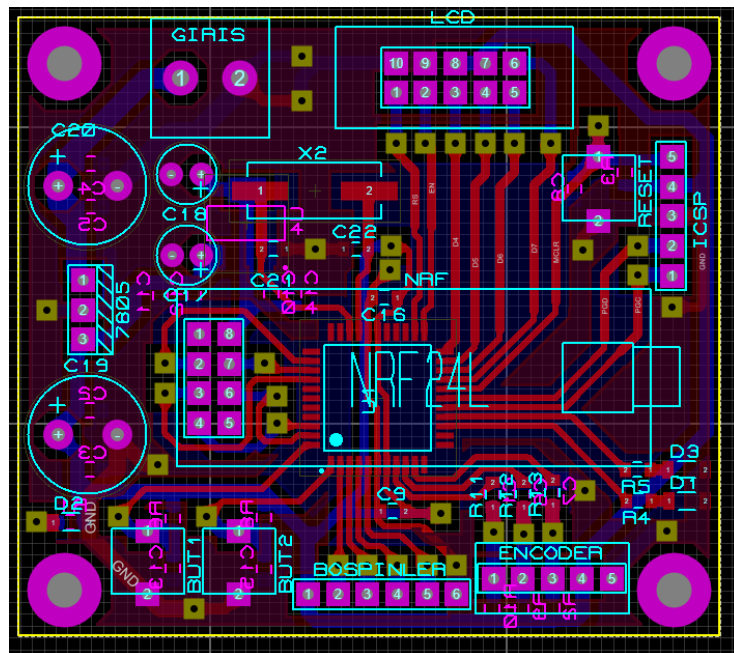
Sistemin anlık olarak şarj durumunun, tetikleme durumunu, şarjlı kalıp kalmadığı durumunu ve isteğe göre şekillenecek olan diğer durumların bilgileri kumanda tarafından kullanıcıya iletilmektedir.

Kumanda üzerinde bulunan döner kodlayıcı ile istenilen gerilim değeri seçiliyor. Seçilen gerilim değeri nrf modülü ile cihaza gönderiliyor. Gönderilen değer ile şarj işlemini başlatan cihaz anlık olarak kondansatör gerilim değerini kumandaya gönderiyor.

Kullanıcı isterse istediği gerilim değeri oluşmadan sistemin tetiklenmesini buton ile diğer kart ileterek enerjinin arızalı kablo üzerine verilmesini komut edebilir. Gerilim değeri istenilen seviyeye geldiğinde sistem tetikleme komutunun gelmesini bekler ve kondansatör yapısındaki paralel direnç sebebiyle düşen gerilim değerine göre sistemin istenilen gerilim değerinde tutmaya devam eder. Komut geldiğinde ise enerji arızalı kablo üzerine aktarılır.



Şekil 3.22 Darbe jeneratörü kontrol kumandasının şeması.



Şekil 3.23 Kontrol kumandası kartının PCB çizimi.

Şekil 3.27’te görüldüğü üzere kumanda kartında kullanılacak olan kart da yine kendi tasarımıımız olup üretim ve test süreçleri kontrol kartı gibi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.26 ile gösterilen şemada belirtilen özellikler doğrultusunda tasarladığımız kart, pic18f45k22 serisi bir işlemci ile çalışmaktadır. Yazılımı c tabanlıdır. Yaklaşık olarak 6cmx6.5cm boyutlarındadır.



Şekil 3.24 Darbe jeneratörünün kontrol kumandasının görüntüsü.

Şekil 3.28 ile gösterilen kumada da bulunan yeşil buton gerilim değerinin gönderilmesini komut eden butondur. Kırmızı buton ise enerjinin kablo üzerine aktarılması izin veren komutun butonudur. Sistem bir sefer enerjiyi kablo üzerine verdiğinde deşarj olduktan sonra tekrar kendini şarj ederek zamandan kazanç sağlamaktadır. İstenildiği taktirde şarj etmemesi de sağlanabilir.

Gerilim değerinin ayarlanmasında ise döner kodlayıcı kullanılmıştır. Yazılım ile kullanımı kolaylaştırılmıştır. Çevirme hızına bağlı olarak artış ve azalış miktarı değişmektedir. Böylelikle istenen yüksek gerilim seviyesini ayarlama esnasında zaman kaybı olmamaktadır.

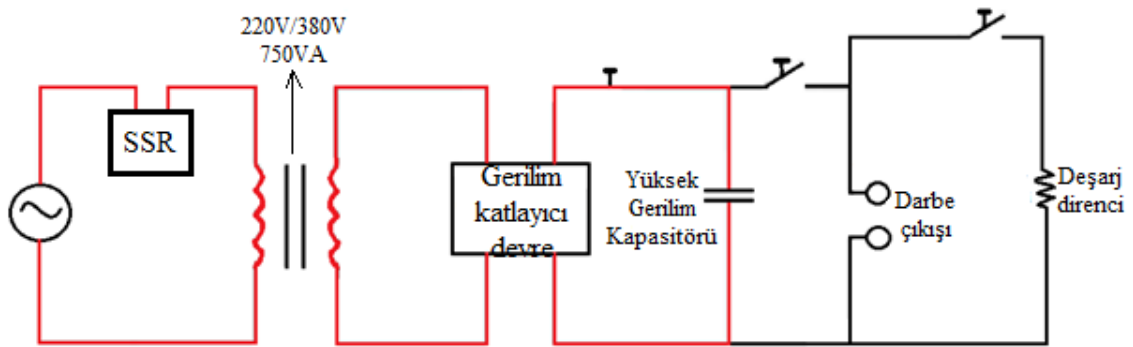
3.3 Algoritma

Yüksek gerilim darbe üreticinin kontrolcüsü ve haberleşme kullanarak kontrol edecek kumandanın kontrol ve haberleşme algoritması hazırlanacaktır.

3.3.1 Darbe Jeneratörünün Algoritması

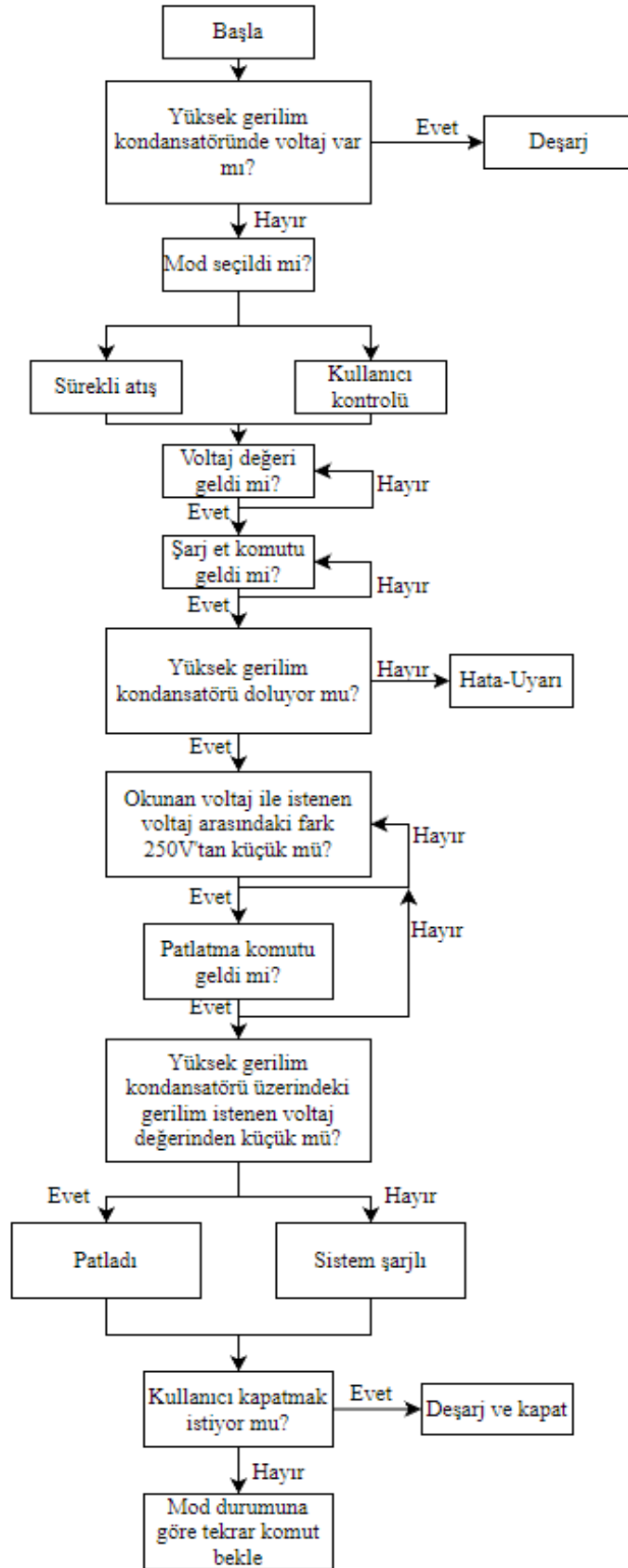
Sistemin çalışma mantığı ve yazılım algoritması Şekil 3.31’te verilmiştir. Buna göre cihaz ilk enerjilendiğinde kondansatör üzerindeki gerilim seviyesini okumaktadır. Böylelikle eğer kondansatör üzerinde belirli bir gerilim seviyesinin üzerinde gerilim varsa onun deşarjını sağlamaktadır. Daha sonra cihaz kullanıcıdan mod seçimi yapmasını beklemektedir. Kullanıcı kendi kullanmak isterse kullanıcı kontrolü seçeneğini seçerek istediği zaman şarj edip istediği zaman patlatma komutu gönderebilecektir. Ancak sürekli mod seçeneğini seçerse kullanıcı tarafından belirlenecek olan süre zarfında sürekli olarak şarj-patlat komutları arasında akış gerçekleşecektir. Bu süreç gerçekleşirken her iki modda da hata durumunda cihaz uyarı verip kendini kapatacaktır.

Gerilim değeri geldikten sonra şarj komutu ile gerilim değerinin istenen değere gelmesi için anahtarlama kısmı şarja başlamaktadır. Şekil 3.29’da görüldüğü üzere şarj komutu geldikten sonra SSR ve kontaktör tetiklemesi yapılarak şarj başlatılmıştır.



Şekil 3.29 Yüksek gerilimin şarjı esnasında enerjinin izlediği yol.

İstenilen gerilim ile kondansatör üzerindeki gerilim değeri arasındaki fark 250V değeri ile sınırlandırılmış olup, fark kapanana kadar şarj etmektedir. Eğer şarj et durumundayken şarj olmuyorsa sistem uyarı verip deşarj moduna geçmektedir. Şarj değeri istenen



Şekil 3.31 Arıza tespitinde kullanılan darbe jeneratörü cihazının akış diagramı.

3.3.2 Darbe jeneratörünün kontrol kumandasının algoritması

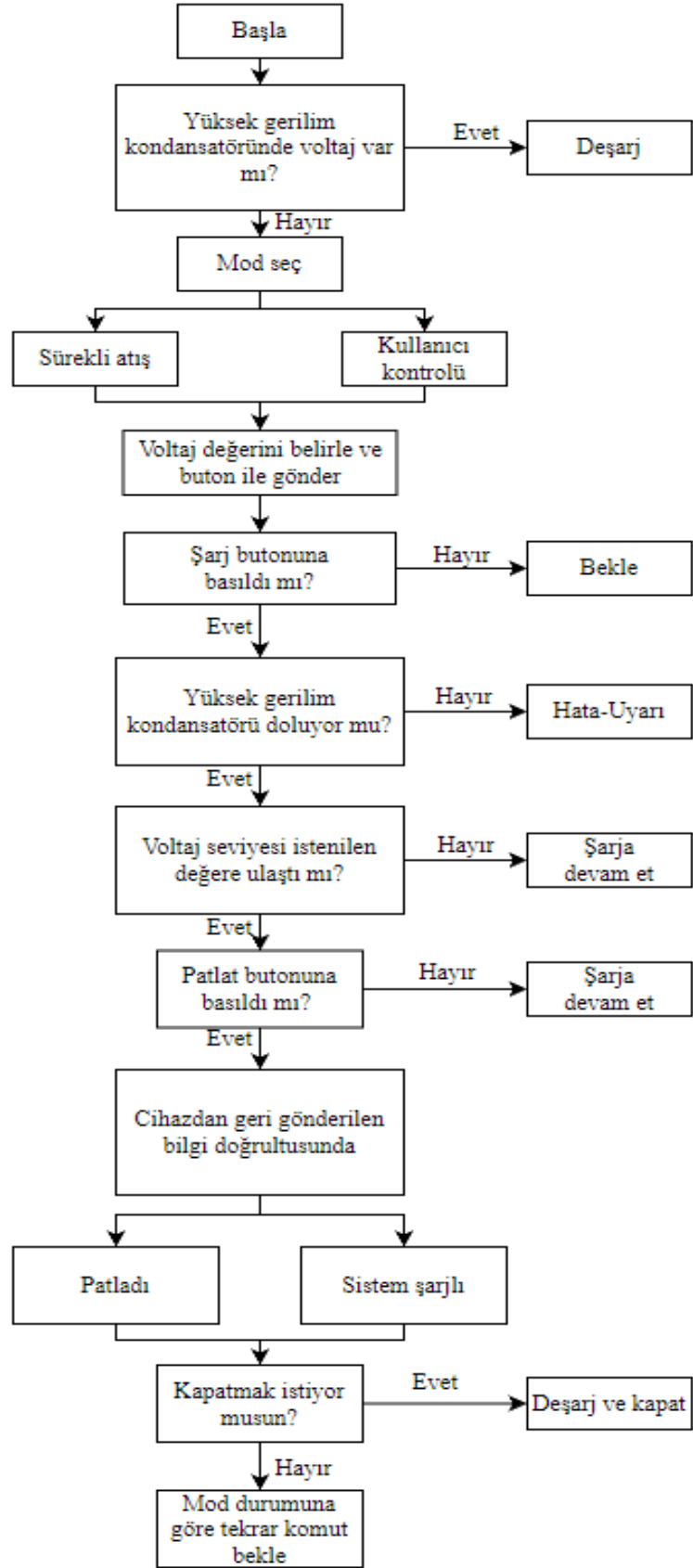
Kumandanın çalışma mantığı ve algoritma diyagramı Şekil 3.32’de verilmiştir. Kumanda üç hücreli bir lityum polimer batarya ile çalışmaktadır. Kumada çalıştırıldığında yüksek gerilim darbe jeneratörü ile eşleşme beklemektedir. Eşleşme gerçekleştikten sonra darbe üretici yüksek gerilim kondansatörü üzerinden gerilim okuyup kumandaya bilgi olarak gönderir. Ardında isterseniz komut göndererek deşarj etme moduna manuel olarak geçirebilirsiniz isterseniz bekleyip cihazın hazır duruma geçmesi ile mod seçerek akış başlatılabilir. Mod seçimi ardında şekil 3.28 ile gösterilen kumanda üzerindeki döner kodlayıcı ile gerilim seviyesi belirlenir. Ardından şarj et butonu ile şarj etme komutu gönderilir.

Döner kodlayıcı için az döndürüldüğünde yavaş artış veya azalış, çok döndürüldüğünde ise hızlı artış ve azalış gösteren yazılım ile yüksek gerilim seviyesini ayarlarken zamandan kazanma amaçlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

Cihaz istenilen gerilim değeri için şarj işlemine başlamaktadır. Darbe üreticinde bulunan yüksek gerilim kondansatörü istenilen gerilim değerine ulaştığında ise cihaz, kullanıcının elinde bulunan kumandaya kondansatörün dolduğuna dair bilgi göndermektedir. Böylelikle kullanıcı istediği zaman patlat komutu ile arızalı kabloya enerjiyi aktarabilmektedir.

Patlat butonu ile yüksek gerilim darbe üretici cihazına komut gönderilir ve cihaz gerekli tetiklemeleri yaparak kablo üzerine enerji aktarımını gerçekleştirmektedir. Ardında yüksek gerilim kondansatörü üzerindeki enerjinin durumuna göre gerekli olan bilgilendirme kumandaya gönderilir ve kumanda üzerindeki ekranda kullanıcı bu durumu görebilmektedir.

Ardından kullanıcının daha önce seçtiği moda göre cihaz bu işlemleri tekrarlayabilir veya kullanıcıdan komut bekleyebilir.



Şekil 3.25 Darbe jeneratörüne ait kontrol kumandasının akış diagramı.

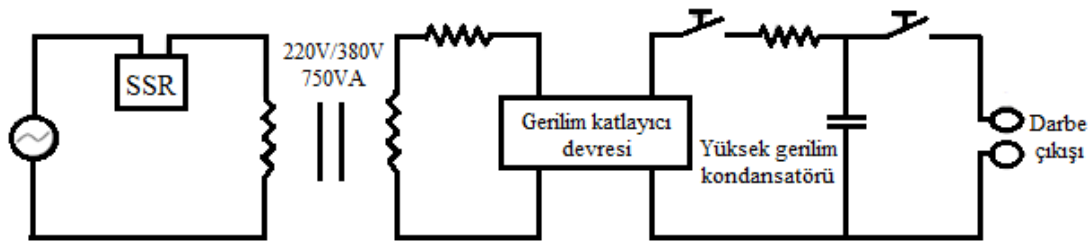
4. BULGULAR

Cihaz simülasyonlar ve tasarım ışığında üretilmiş ve denenmiştir. Denemelerde simülasyonda görünen şekliyle gerilim katlama devresi çalışmaktadır. Cihaz ile kumanda arasındaki iletişim sağlanıp kontrol ve istenilen değerlerin transferi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan denemelerde şarj kısmına başlandığı zaman “t=0” anında kondansatörlerin kısa devre gibi çalışması sebebiyle simülasyonda görülmeyen anlık yüksek akımlar sebebiyle bazı diyotlarda yanma durumu gözlemlenmiştir.

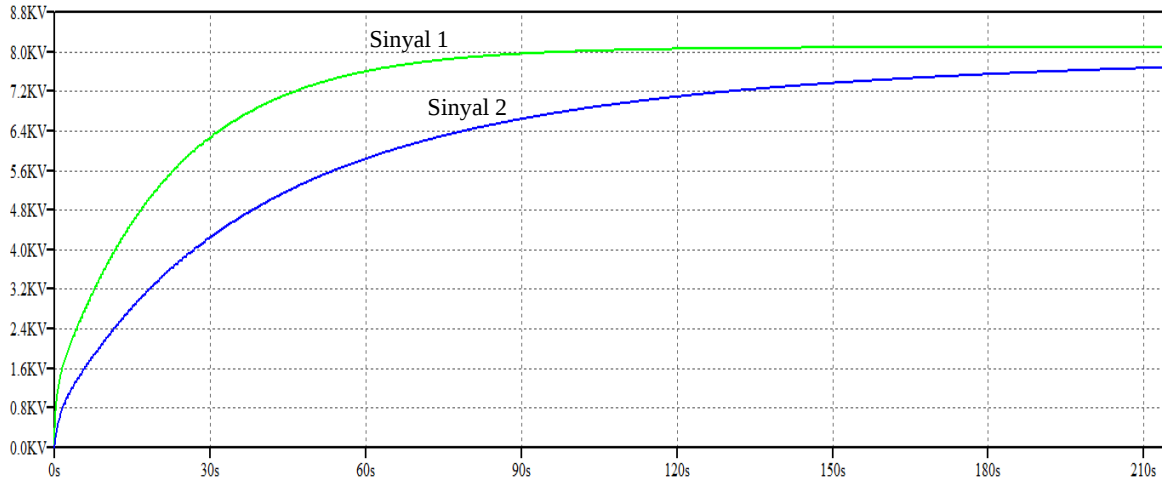
Bu durum sebebiyle açma kapama için kullanılan SSR, şarj için kullanılması değerlendirilmiştir. Bunun için belli aralıklarla tetikleme yapıp şarjın kontrollü olarak yapılması amaçlanmıştır. Bu yazılım tasarımı yapıp denenmiştir. Ancak diyotlarda bir yarı iletken olduğundan değişen karakteristikleri sebebiyle stabil bir sonuç elde edilmemiştir. Kullanım süresi uzamıştır ancak sonuca pek etki etmemiştir.

Bundan dolayı şarj için de direnç kullanımı göz önüne alınmıştır. Şekil 4.1 ile gösterildiği gibi eklemeler yapılmıştır. Bu eklemeler ve yazılımdaki kontrollü şarj algoritması ile yanma durumunun önüne geçileceği öngörülmüştür.



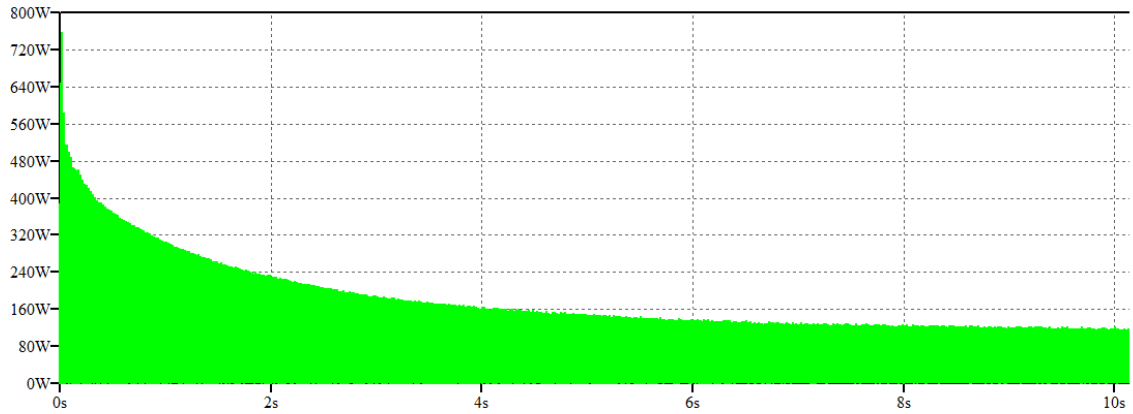
Şekil 4.1 Darbe jeneratörünün nihai devre şeması.

Yapılan bu değişiklikler ile beklenen bir diğer sonuç ise şarj süresinin uzamış olmasıdır. Bunun ne kadar uzadığını anlayabilmek için simülasyona yapılmıştır. Görülmüştür ki direnç atılmadan önce yaklaşık 2 dakika içerisinde istenilen yüksek gerilim seviyesine çıkan cihaz yapılan güncellemeler ile 5 dakika seviyesinde istenilen gerilim seviyesine çıktığı görülmektedir. Şekil 4.2 ile gösterilen simülasyon sonucunda görülmektedir.



Şekil 4.2 Şarj direnci eklenmiş ve eklenmemiş devrelerin simülasyonu

Şekil 4.2'de sinyal 1 olarak ifade edilen grafik şarj direnci olmayan, sinyal 2 olarak ifade edilen grafik ise şarj direnci olan devrenin simülasyon sonuçlarıdır. Bu direnci devre üzerine dahil edebilmek için simülasyondaki güç değerine bakılması gerekmektedir. 30 saniye aralıklarla yatay eksende zaman değerleri verilmiştir. Dikey eksen ise her adım 0.8kV'dur. Görüldüğü üzere devre üzerine direnç eklenmesi şarj süresini uzatmaktadır. Simülasyon süresi 300 saniye olarak belirlenmiştir ve 300 saniye sonunda gerilim seviyeleri fark yaklaşık 200V seviyesindedir.



Şekil 4.3 En yüksek gerilim değerine şarj esnasındaki direnç üzerindeki güç değeri

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere şarj direncinin güç değeri başlangıçta yüksektir, yaklaşık 800W mertebesinde. Simülasyonda kullanılan direnç değerimiz 200 ohmdur. Şarj süresi de uzun olduğundan yüksek güç değerine sahip bir direnç kullanılmasına karar verilmiştir.

Simülasyonun başlangıç anında itibaren azalarak giden güç grafiği 300 saniye olarak belirlenen simülasyon süresini tamamladığında neredeyse 5W seviyesine kadar düşmüştür. Bu yüzden ilk anda yanmayacak güç değerine sahip bir direnç seçilmiştir. Simülasyon kullanılarak bulunan 60 saniyelik simülasyon grafiğinin ortalama güç değeri ise yaklaşık 50W'tır.

Aynı zamanda şarj durumu izolasyon transformatörü üzerinden gerçekleşeceğinden şarj için üzerinden geçecek olan akım değeri transformatör gücü ile orantılıdır.

$$S = U * I \quad (4.1)$$

Transformatörünün çıkış gerilimi 380VAC, gücü ise 750VA'dır. Denklem 4.1 ile çıkan akım değeri ise yaklaşık olarak 2 amper seviyelerindedir. Tepe değeri ise 2.8 amper seviyelerindedir.

$$V = I * R \quad (4.2)$$

2 amper akım seviyesinde sınırlama yapabilmek için denklem 4.2 kullanılarak direnç değeri yaklaşık 200ohm olarak hesaplanmıştır.

$$P = I^2 * R \quad (4.3)$$

Denklem 4.3 ile yaklaşık 800W'lık direnç atmamız gerekmektedir. Yapılan hesaplama ve simülasyonlar birbirleri ile örtüşmektedir. Buna göre şekil 4.4'te gösterilen tip bir direnç ile üretime ve denemelere devam edilmiştir.



Şekil 4.4 Kondansatörü şarj direnci.

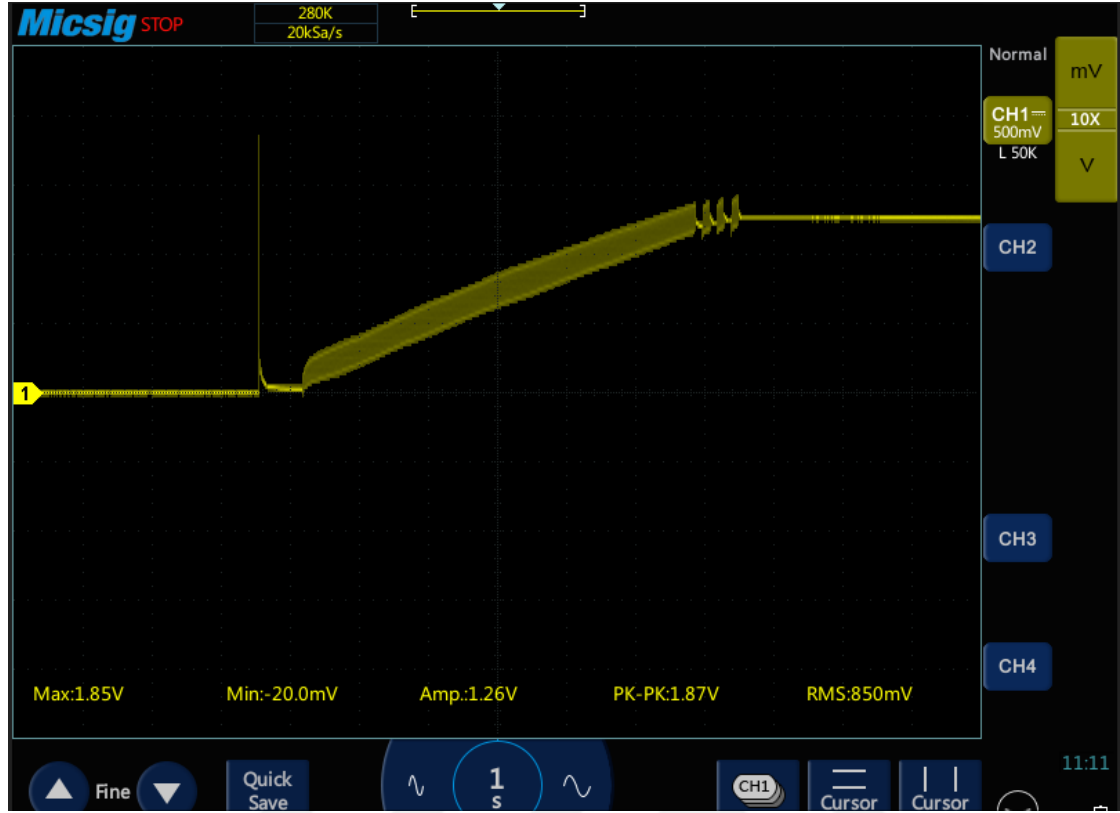
Yapılan güncellemeler ile cihaz tekrardan hazırlanıp test süreci başlatılmıştır. Test işleminde grafiği almak için kullanılan osiloskop “Micsig” markasının TO1104 modelidir. Model özellikleri;

- 100Mhz dalga boyu
- 4 kanal
- Dalga boyu limiti 20Mhz(megahertz), yüksek geçiren veya alçak geçiren mod
- Dokunmatik ekran
- 7500mAh(miliamper-saat) batarya ile kablosuz kullanım
- Örnekleme 1G Sa/s



Şekil 4.5 Güncellemelerden sonraki gerilim testi

Şekil 4.5 ile gösterilen kumandadan belirli bir gerilim gönderilmektedir. Bu gerilim yaklaşık 2100V kademesindedir. Osiloskop görüntüsü ile görülen grafik yüksek gerilim kondansatöründeki gerilim grafiğidir. Grafiğin biraz değişimli olmasının sebebi SSR kontrolü ile gelen kontrol algoritmasıdır. Devre yapısı ve direnç toleranslarının giderilmesi amacıyla koyulmuş olan 250V tolerans değeri sağlanıp yaklaşık 8 saniyede şarj işlemi tamamlanmıştır. Şarjlanan gerilim değeri yaklaşık 2000V'dur.



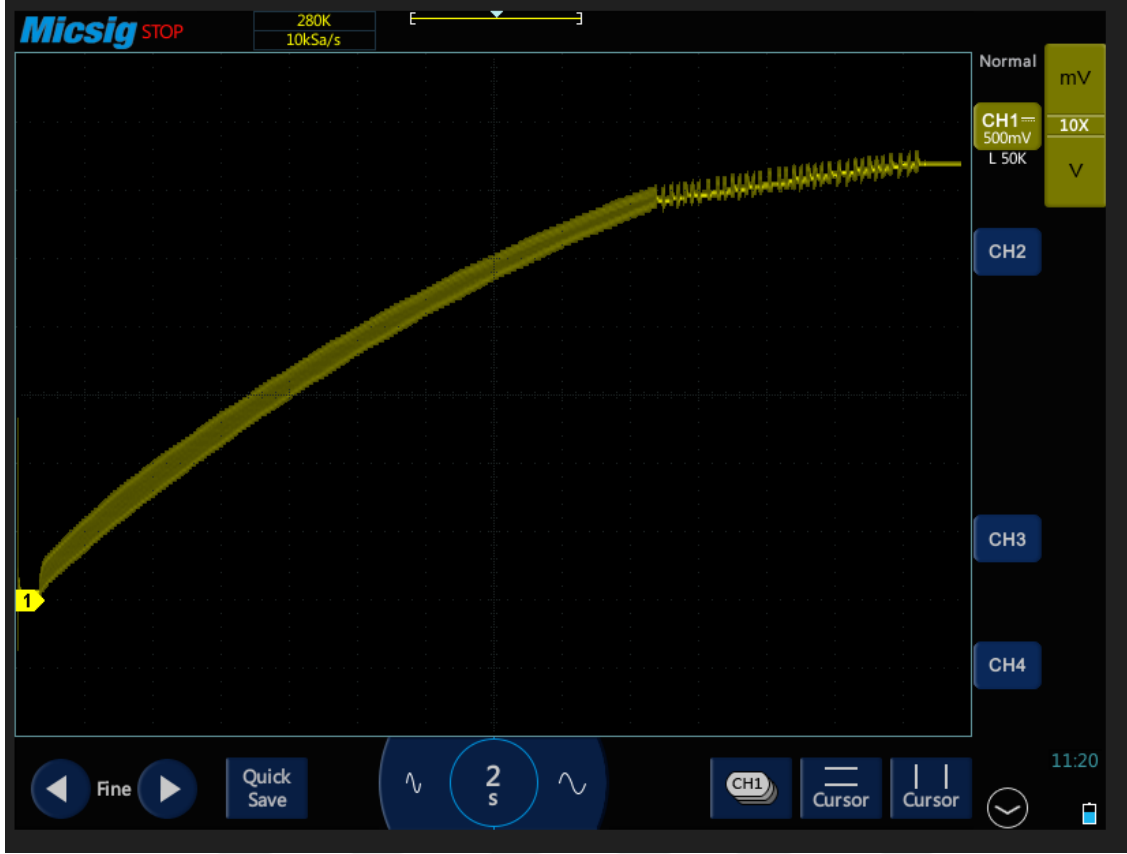
Şekil 4.6 İstenen gerilim değeri 1900V, şarjlanan gerilim 1700V.

Ancak bu osiloskopun girişi maksimum 1000VDC olarak belirtildiği için maksimum 40kV değerini ölçebilen gerilim bölücü uç kullanılmıştır. Bu ürün 1kV değerini 1V olarak çıkış verebilmektedir. Osiloskop ucuna bu ürünün çıkışı bağlanmıştır. Böylelikle yüksek gerilim değeri okunabilmektedir. Osiloskop görüntüsünde her bir kare yatay kare 1saniye, her bir dikey kare 750mV mertebesindedir. Şekil 4.6 ile gösterilen şarj grafiği osiloskoptan alınmıştır. Yaklaşık 7 saniye mertebesinde gerilim seviyesi istenilen gerilim seviyesine çıkmıştır. Şarj işlemi bittikten sonra patlat komutunu beklemeye başlamıştır. Bu bekleme esnasında gerilim seviyesi belirlenen fark aralığından çıkarsa sistem bunu algılayıp tekrardan şarj işlemine başlamaktadır.



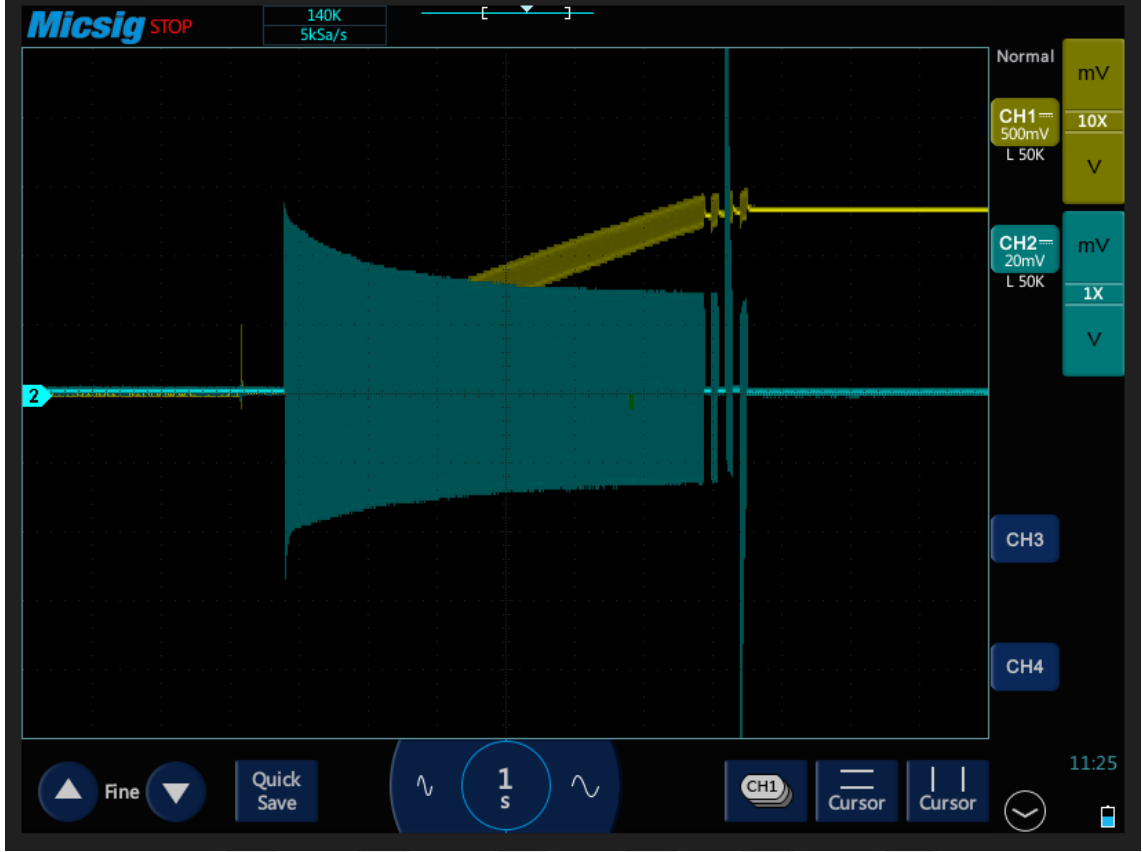
Şekil 4.7 İstenilen gerilim değeri 2500V, şarjlanan gerilim yaklaşık 2250V.

Şekil 4.7’de gösterilen grafikte ise istenilen gerilim kademesi 2500 olup şarj edilmiş olan gerilim değeri yaklaşık 2250V değerindedir. Şarj işlemi yaklaşık 12 saniye kadar sürmüştür ve ardından patlat komutu beklenilmeye başlamıştır. Gerilim kademesi belirli bir seviyenin altına düştüğünde tekrardan şarj işleminin başlanılacağı söylenmişti ve bu durumu şekil 4.8’de görmekteyiz. Şarjlanmış gerilim zaten belirlenmiş aralığın sınırında olduğundan sistem şarj işlemi bittikten sonra yaklaşık 4 saniye sonra tekrardan şarj modunu aktif etmiştir ve grafikte ufak bir yükselmek gözlemlenmiştir.



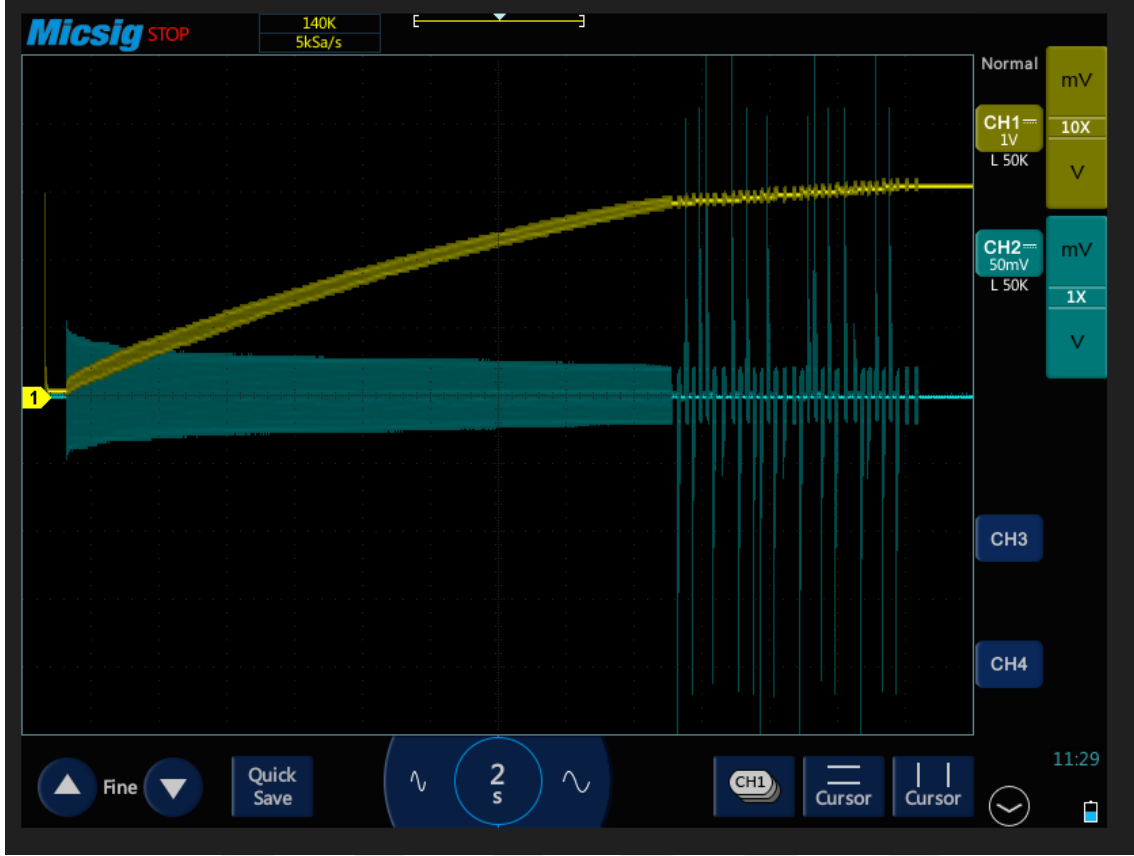
Şekil 4.8 İstenilen gerilim değeri 3350V, şarjlanan gerilim değeri 3200V.

Şekil 4.8’da gösterilen şarj grafiğinde istenilen gerilim değeri yaklaşık olarak 3350V’dur. Şarjlanmış olan gerilim ise 3200V seviyesindedir. Sistem belirli bir gerilim değerine kadar şarj işlemini gerçekleştirmiş olup ardından kontrol algoritması ile istenilen gerilim seviyesine oturması sağlanmıştır. Grafikte bu da görülmektedir. Şarj süresi yaklaşık olarak 27 saniye kadar sürmüştür.



Şekil 4.6 Şarj grafiğinde gerilim ve akım grafiği.

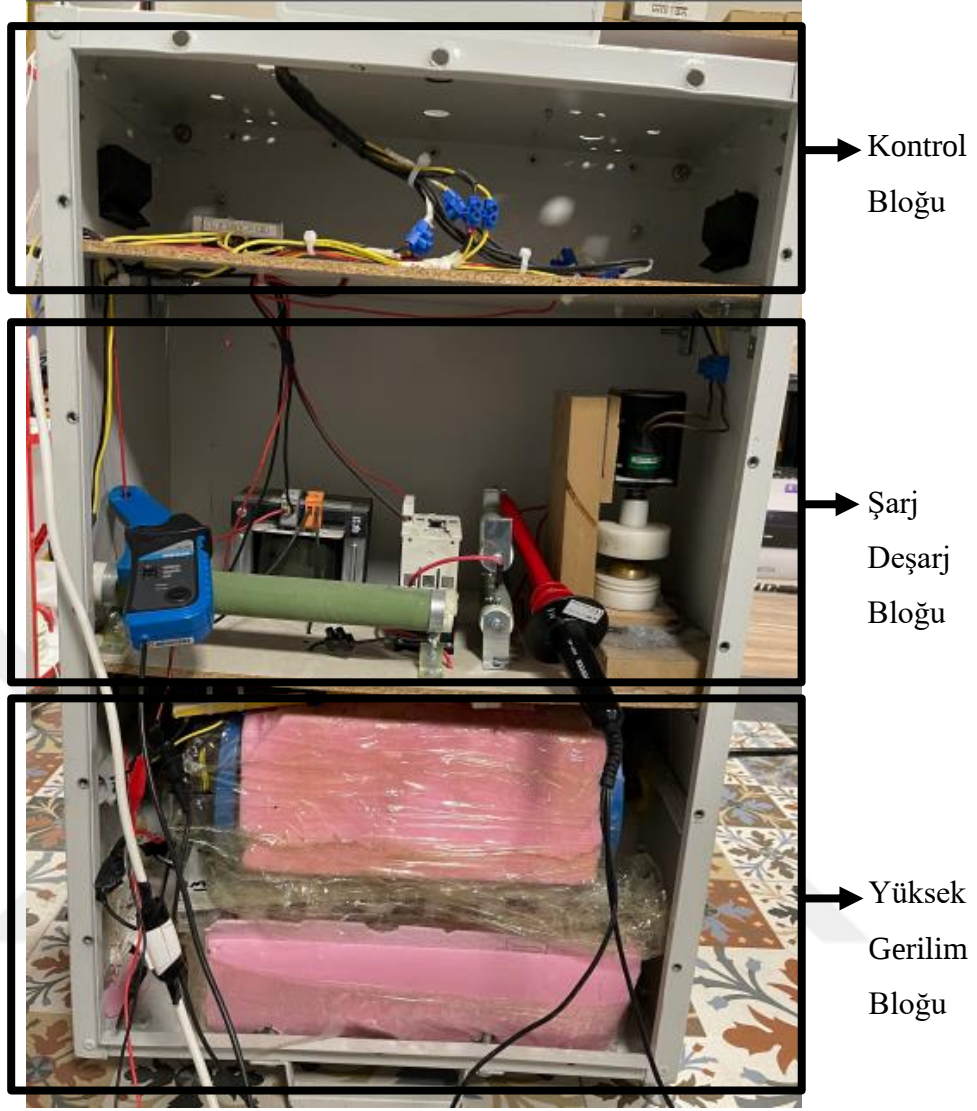
Şekil 4.9’da gösterilen ise şarj esnasındaki gerilim ve akım grafiğidir. İstenilen gerilim değeri 2000V seviyesinde olup şarjlanmış olan gerilim yaklaşık 1800V değerindedir. Anlık akım değeri ise 10mV/1A olacak şekilde ölçüm yapan bir akım okuma ürünü ile osiloskopa bağlantı yapılarak ölçülmüştür. Böylelikle şarj akım seviyesinin de 2A mertebesinde olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.7 Yüksek gerilim şarj esnasındaki akım ve gerilim grafiği.

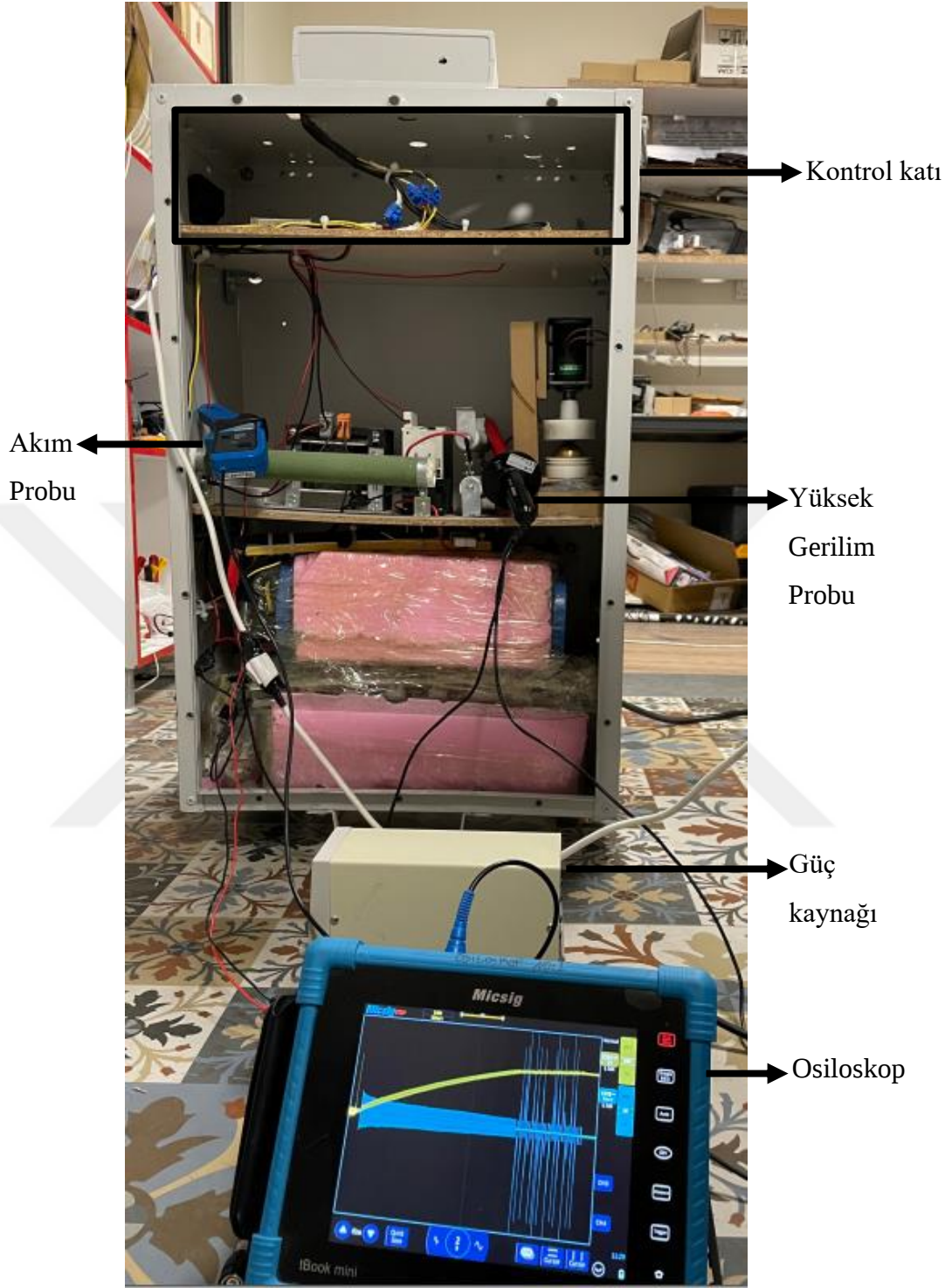
Şekil 4.10’de gösterilen grafikte istenilen gerilim kademesi 3100V olup şarj edilmiş olan gerilim ise 3000V kademesindedir. Şarj akımı 2,5A seviyesinde seyretmiştir. Belirli bir gerilim seviyesinin üzerinde kontrol algoritmasının devreye girmesiyle şarj gerilimi istenilen gerilim seviyesine oturtulmuştur. Burada akım grafiği diğer bölgeye göre farklılık göstermektedir.

Cihazın son hali şekil 4.12’de gösterilmiştir. Raf mantığı ile tasarlanan cihazımız, yüksek gerilim bölümü, şarj deşarj bölümü, kontrol ve güç bölümü olarak 3 ayrılmıştır. Test düzeneği ise şekil 4.13’te gösterilmektedir.



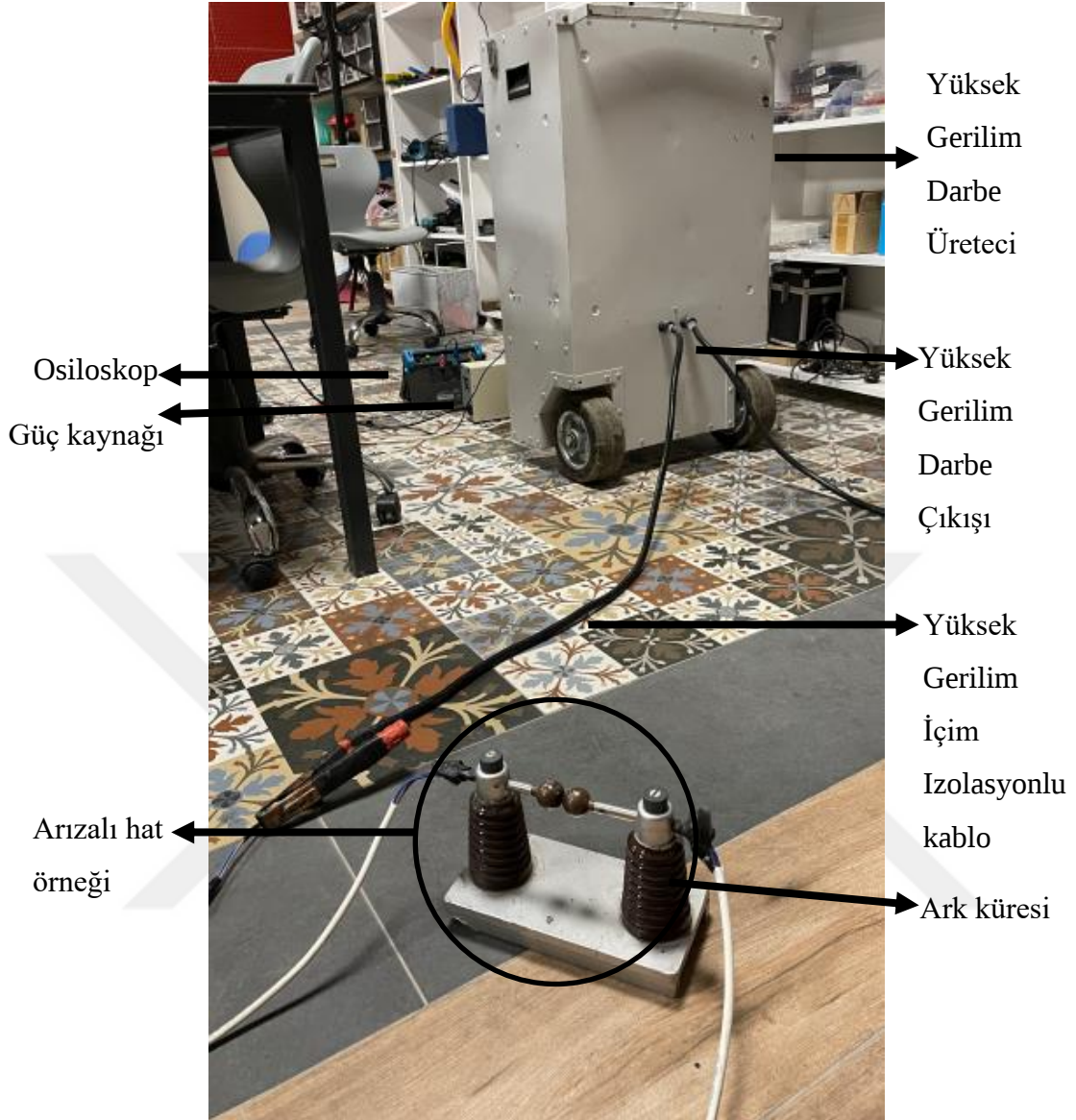
Şekil 4.8 Arıza tespitinde kullanılacak olan darbe jeneratörünü cihazı

Cihazın test prototipi resim de görüldüğü üzere hazırlanıp test edilmiştir. Laboratuvar ortamında kullanılan standart anteni ile 1km menzili ile kullanıcı uzakta olsa dahi tüm istenilen bilgiler kendisine gönderilerek cihazın uzaktan kontrolü sağlanmıştır. Şekil 4.11 ile gösterilen cihaz tasarımının ilk denemelerinden olup gerilim katlayıcı kondansatörler için şarj direnci küçük dirençler kullanılarak denenmiştir. Ardından daha büyük güç değerine sahip direnç piyasadan tedarik edilip yerleştirilmiştir.



Şekil 4.9 Darbe jeneratörünün test düzeneği

Cihazın test işlemi için osiloskop bağlantısı yapılmıştır. İstenilen gerilim değeri 4350V seviyesindedir. Şarjlanmış olan gerilim seviyesi ise 4250V seviyesindedir. Şarj akımımız yaklaşık olarak 3A seviyesindedir.



Şekil 4.10 Darbe jeneratörünün test düzeneği ve ark küresi.

Şekil 4.13'te ise cihazın çıkış ark küresi olarak adlandırılan edilen ürüne bağlanmıştır. Cihaz ile depolanan enerji ark küresine iletilerek enerjinin ark oluşturarak deşarj olması amaçlanmıştır. Ürün üzerindeki vidalar ile küreler arasındaki mesafe ayarlanabilir olmuştur. Böylelikle çeşitli gerilim seviyelerinde durum gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1 Gerilim ve enerji tablosu

İstenilen Gerilim (V)	Şarj Edilen Gerilim (V)	Depolanan Enerji (Joule)	Şarj Süresi(saniye)
500	350	18,3	0,5
750	650	63,3	0,75
1000	825	102	2
1250	1050	165,3	5
1500	1300	253,5	8
2000	1900	541,5	11,5
2500	2350	828,3	12,5
3000	2875	1240	21
3500	3350	1683,3	28
4000	3900	2281,5	33
4500	4300	2773,5	40
5000	4850	3528,3	52
6000	5800	5046	65
7000	6850	7038	105
7750	7600	8664	220

Çizelge 4.1 ile gösterilen tabloda, istenilen gerilim değerlerine göre, önerilen cihazın şarj olabildiği gerilim değeri, depoladığı enerji miktarı ve süresi takriben belirtilmiştir. Görüldüğü üzere yüksek gerilim kondansatöründe depolanan gerilim, kondansatörü besleyen gerilim katlayıcı devrenin çıkış gerilimi yani besleme gerilimine yaklaştıkça şarj süresi logaritmik uzamaktadır. Bu da kondansatör şarj eğrisindeki formülден anlaşılmaktadır.

Görüldüğü üzere kondansatörde depolanan gerilim değeri büyüdükçe üzerinde biriktirdiği enerji miktarı da kondansatör geriliminin karesi ile büyümektedir. Bundan dolayı gerilim seviyesinin belirli bir seviyede sınırlandırılabilmesi tartışmaya açılmıştır.

Çizelge 4.2 İstenilen enerji ve depolanan enerji arasındaki fark tablosu

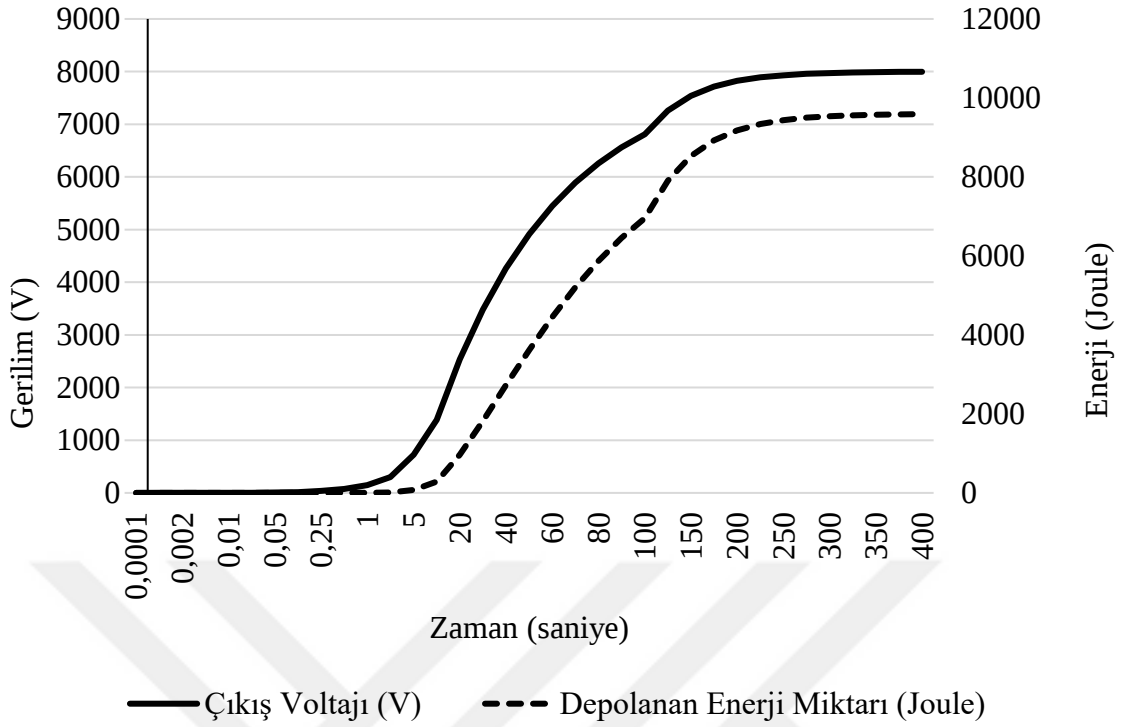
Şarj edilen gerilim (V)	İstenilen (Joule)	enerji Depolanan (Joule)	Enerji Fark (Joule)
500	37,5	18,3	19,5
750	84,3	63,3	21
1000	150	102	48
1250	234,3	165,3	69
1500	337,5	253,5	84
2000	600	541,5	58,5
2500	937	828,3	108,7
3000	1350	1240	110
3500	1837,5	1683,3	154,2
4000	2400	2281,5	118,5
4500	3037,5	2773,5	264
5000	3750	3528,3	221,7
6000	5400	5046	354
7000	7350	7038	312
7750	9000	8664	336

Çizelge 4.2’de istenilen gerilim değerinde olması gereken enerji seviyesi hesaplanarak eklenmiştir. Bununla beraber çizelge 4.1 ile belirtilen tabloda şarj edilen gerilim değeri ile depolanan enerji miktarı çizelge 4.2’de belirtilmiş ve aralarındaki fark incelenmiştir.

Bu fark;

- Kontrol algoritmasındaki tolerans
- Gerilim okumada kullanılan dirençlerin toleransı
- Yüksek gerilim okumasından kaynaklanan işlemcinin çözünürlük skalası

gibi sebeplerden ötürü oluşmaktadır. Bu toleranslar ve işlemci çözünürlüğü arttırılırsa daha yakın gerilim değerleri elde edilebilmektedir.



Şekil 4.11 Şarj edilen gerilim ve depolanan enerji miktarını gösteren grafik.

Şekil 4.14'te ise çizelge 4.1 ile ifade edilen değerlerin grafik hali verilmektedir. Görüldüğü üzere enerji seviyesi kondansatörde depolanan gerilim değerine bağlıdır. Yüksek gerilim kondansatöründeki gerilim değeri yükseldikçe depolanan enerji değeri de yükselmektedir. Gerilim katlayıcı devre ile elde edilen 8000 volt seviyesindeki kaynak ile beslenen yüksek gerilim kondansatörü, besleme gerilim seviyesine yaklaştıkça şarj süresi uzamaktadır. Görüldüğü üzere 8000 volt civarında bir gerilim seviyesi istenildiği takdirde yaklaşık 9000 Joule enerji seviyesi depolayabilmektedir. Ancak tam dolma seviyesi yaklaşık 4,5 dakika seviyelerindedir. Daha önce yapılan simülasyon sonuçlarıyla da paralellik içerisinde olup desteklenmektedir.

Yüksek gerilim seviyeleri yüksek enerji depoladığı için arızalı hattın durumuna göre kontrollü bir şekilde gerilim seviyesinin arttırılması gerekmektedir. Arızalı hattaki arıza direnci belirli bir seviyenin üzerinde ise yine önerilen cihaz ile arızalı noktanın bulunması kolaylaşmaktadır. Gerek gerilim seviyesi gerekse depolayabildiği ve aktarabildiği enerji seviyesi ile muadil ürünler ile rekabete hazırdır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Günümüzde üretici ile tüketici arasındaki arz talep güvenliği, enerji kalitesi ve sürekliliği, bakım, onarım ve işletme maliyetlerinin en aza indirilmesi ve rekabetçi gelişimin korunması üretici ve dağıtıcı şirketler için olmazsa olmaz kriterlerdir.

Türkiye’deki enerji piyasasının özelleşmesi ile sektörün durumunu düzenleyen ve kontrol eden Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) kararları oldukça önemli ve belirleyicidir. EPDK, alanında bağımsız bir düzenleyici ve denetleyici kuruluş olarak, elektrik piyasasında faaliyet gösteren tüzel kişilerin her türlü faaliyet, uygulama, işlem, hesap ve mali tablolarını ilgili mevzuata ve genel kabul görmüş muhasebe kurallarına uygunluk açısından kontrol etmektedir. Olası hata, eksiklik, usulsüzlük ve suiistimallerin tespiti ve kanunla öngörülen gerekli yaptırımların uygulanması; tüketiciler için yeterli, kaliteli, sürekli, ekonomik ve rekabetçi, çevreye zarar vermeyen elektriğin mevcudiyetini sağlamak ve ekonomik olarak güçlü, istikrarlı ve açık elektrik üretmek amacıyla 4628 ve 4646 sayılı kanunlarla kurulmuş bir kuruldur.

Konunun hukuki boyutu ve maliyetler dikkate alındığında, büyük bir arıza tespit edilse dahi uzun süreli elektrik kesintilerine tahammül etmek artık mümkün değildir. Bildirilen arızayı doğru bir şekilde ve en kısa sürede tespit etmek, arızayı anında gidermek için müdahale etmek ve en kısa sürede enerjiyi geri getirmek çok önemlidir.

Sonuç olarak, kabloların üretim, montaj, işletme hatlarından kaynaklı arızalar en aza indirgenmiş durumda olsalar da tamamen ortadan kaldırmak mümkün değildir. Bu arızalar meydana geldiğinde ise önemli olan kısa süre zarfında arızalı durumun iyileştirilip sorunu çözülmesidir.

Kabloların ilk kullanılmaya başlandığı yıllarda arıza tespiti için klasik ölçüm teknikleri olarak adlandırılan DC Köprü Ölçüm Teknikleri kullanılmaktaydı. 1940'larda etkin yansıma yönteminin (Time Domain Reflectometry/TDR) kullanılmaya başlanmasıyla birlikte klasik köprü ölçüm yöntemleri önemini kaybetmeye başladı. Teknoloji ilerledikçe en yaygın kullanılan yöntem olan etkili yansıma yönteminin daha verimli ve

gelişmiş uygulamaları kullanılmaktadır. Şu anda ikincil darbe yöntemi, karşılaştırma yöntemi, fark yöntemi, darbe akımı yöntemi gibi teorik olarak benzer yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır.

Piyasada bulunan ürünler incelendiğinde arıza yerinin tespitinde kullanılan darbe üreteçlerinden bazı muadiller görülmektedir.

Çizelge 5.1 Piyasa cihazların özelliklerinin karşılaştırma tablosu

Cihaz Özellik	SWG12	HZ4000T2	HV-CDS 2010UF	Önerilen cihaz
Gerilim	0-12kV	0-32kV	0-10kV	0-8kV
Enerji	1100J	1536J	1000J	9000J
Kontrol	Cihaz üzerinde	Cihaz üzerinde	Cihaz üzerinde	Uzaktan kontrol
Mod	Tek mod	Tek mod	Tek mod	Çift mod
Ağırlık	120kg	75kg	118kg	35kg
Çalışan sayısı	2	2	2	1
Yüksek gerilim yöntemi	Transformatör	Transformatör	Transformatör	Gerilim katlayıcı
Kablosuz Haberleşme	Yok	Yok	Yok	Var
Kontrollü şarj (SSR)	Yok	Yok	Yok	Var

Kullanım kolaylığı kapsamında, cihaz arıza bölgesinde kullanılırken çalışan sayısında bize avantaj sağlamaktadır. Diğer cihazlardaki gibi kontrol ve güvenlik durumları sadece cihaz üzerinde olmadığından, kumanda ile uzaktan kontrol edilebildiği için, arızayı arayacak olan kişi cihazı hem kontrol edip hem de mevcut kulaklığı ile ses takibi yapabilmektedir.

Maliyet kapsamında, cihaz tasarımı ve üretimi yerli sermaye ve saniye ile yapıldığından üretim değeri seriye girildiği takdirde neredeyse yarı yarıya düşecek olup, hali hazırda

muadilleri ile karşılaştırıldığında da yaklaşık yarı yarıya olarak gözlenmektedir. Bu bağlamda değerlendirildiğinde, hem iç ekonomiye katacağı katma değer, hem üretim maliyetleri düşünüldüğünde oldukça yüksek bir avantaj getirmektedir.

Yerlilik ve servis imkânı kapsamında bakıldığında, piyasada olan cihazların çoğunluğu Çin menşeli olup arıza durumlarında servis maliyetleri oldukça yüksektir. Teknolojisi Türkiye’de olmadığından müdahale edilebilme imkânı oldukça zordur. Tez kapsamında tasarladığımız cihazımız yerlilik ve servis imkânı olarak oldukça avantajlıdır. Cihaz yerli olarak araştırılıp üretilmesi ile daha farklı konfigürasyonlar ve özellikler eklenerek ürün yelpazesi arttırılabilir. Müşterinin istediği özellikler eklenerek kişiye özel ürünler de tasarlanabilmenin önü açılmıştır.

Muadil ürünler incelendiğinde ağırlık olarak da oldukça avantajlıdır. Muadil ürünler genellikle transformatör tabanlı trafolar yaptıklarından dolayı ağırlık olarak oldukça yüksektirler. 75kg+ olan cihazlar yerine ağırlığı 30kg civarı olan cihazımız bu özellik bakımından da avantajlıdır.

Yüksek gerilim elde etme yöntemi muadil ürünler göz önüne alındığında farklılık göstermektedir. Kullanılan yöntem ile ağırlıktan kazanç sağlanmaktadır. Kontrollü şarj algoritması ve SSR kullanımı ile istenilen gerilim seviyesine çıkarken gerilimin dengesizliğinin önüne geçilmektedir. Gerilim seviyesi istenilen seviyeye yaklaştığında sürekli olarak anahtarlama yapılmaktadır. Bundan dolayı röle gibi elektromekanik çözümler kullanılması uygun değildir. SSR kullanımının bir diğer avantajı ise içerisinde bulunan sıfır geçiş noktasında iletme geçen entegre sayesinde anahtarlama yapıldığında sistem yüksek gerilimden dolayı kontrolsüz anlık yüksek akım çekme durumunun önüne geçilmiştir.

Kablosuz haberleşme için nRF modülü kullanılarak cihazın kontrol mesafesi 2km çapına çıkarılmıştır. Böylelikle cihaz kullanılırken çalışan sayısı düşürülmüştür. Kontrol kolaylığı sağlanmıştır. Muadil cihazlarda ise kablosuz haberleşme özelliği yoktur.

Sonuç olarak, cihazın üretilmesi için yapmış olduğumuz araştırma geliştirme çalışmaları neticesinde ortaya çıkan ürün arızalarının tespiti için gerekli şartları sağlayarak muadillerine göre ömrü daha uzun, kullanıcı için daha kolay, uzaktan kumanda ile kontrol, istenildiği zaman tetikleme işlemi gibi özellikleriyle farkını ortaya koyarak piyasada yerini almaktadır.

Günümüzde kullanımı ve yapımı yaygınlaşan gelecekte havai hatların yerini alacak yeraltı kablolarında oluşan arızaların tespiti için birçok uygulama ve araştırma yapılmıştır. Bu araştırma bu soruna çözüm getirmek amacıyla yapılmıştır. Yurt dışından gelen maliyet yüksek ve ömrü kısa olan ürünlerin yerini alabilecek kalite ve performansta olan cihazın laboratuvar test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uzaktan kontrol ile sadece kullanıcı patlat komutunu verirse patlatma işlemi gerçekleştirecek olan cihazın ömrü rakiplerine göre en az 10 kat uzundur. Kullanıcıya kondansatörün şarjlı olup olmadığı gibi bilgilerin verilmesiyle de oluşabilecek herhangi bir hayati tehlikenin gerçekleşmemesi sağlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda yapılabilecek iyileştirme ve eklemeler;

- Cihaz içerisine konumlandırılacak TDR cihazı ile arızanın tam tespiti daha da kolay sağlanabilir.
- Gerilim seviyesi yukarıya çıkartılıp hitap ettiği kablo çeşitleri arttırılabilir.
- Haberleşme mesafesi arttırılarak arama tarama alanı arttırılabilir.
- Yakma, DC çıkış gibi özellikler eklenerek arızalı bölgenin direnç değerine göre kullanılacak method özellikleri eklenebilir.
- Kademe oluşturarak 8kV-16kV-32kV mertebelerinde de aynı enerji seviyesi sağlanabilir.
- Topraklama kontrol devresi eklenerek cihazın çıkışlarının hatta bağlanıp bağlanmadığı kontrol edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Aihua D, Liuhan H, Liang L, Qingxuan W, 2010, Research on the Practical Detection for a Power Cable Fault Point, 2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, 12-13 August, Chengdu.
- Altın, B, Alboyacı, B, Tekin, H, 2022, Alçak Gerilim Şebekelerinde Ek ve Arıza Noktası Yeri Tespiti için Yeni Bir Ekipman Geliştirilmesi, ELECO 2022 Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, 24-26 Kasım, Bursa.
- Asif R M, Hassan S R, Rehman A U, Masood B, Sher Z A, 2020, Smart Underground Wireless Cable Fault Detection and Monitoring System, 2020 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), 22-23 February, Lohare.
- Beyer M, Kanmm W, Fesser K, 1982, A New Method for Detection and Location of Distributed Partial (Cable Fault) in High Voltage Cable Under External Interference, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 9, 3431-3438.
- Bungay E, Macllister D, 1990, Electric Cable Handbook, BSP Professional Books, 1101p, UK.
- Clegg B, 1993, Underground Cable Fault Location, Barry Hardback Book, 369p, New York.
- Dada E G, Alkali H A, Joseph S B, Sanda U A, 2019, Design and Implementation of Underground Cable Fault Detector, International Journal of Science and Engineering Investigations, 8, 46-52.
- Gilany M, Ibrahim D K, Eldin E S T, 2007, Traveling-Wave-Based Fault-Location Scheme for Multiend-Aged Underground Cable System, IEEE Transactions On Power Delivery, 22, 82-89.
- Gürelli D, 1979, Kablo Testi, Kablo Arızalarında Modern Tespit Yöntemleri, Yağ İzolasyon Testi, Nurettin Uycan Basımevi, 450s, İstanbul.

- Hans M R, Kor S C, Patil A S, 2017, Identification Of Underground Cable Fault Location And Development, 2017 International Conference on Data Management Analytics and Innovation (ICDMAI), 24-26 February, Pune.
- Ho C M, Lee W K, Hung Y S, 1993, Signature Representation of Underground Cables And Its Applications To Cable Fault Diagnosis, 1993 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 7-10 December, Hong Kong.
- Islam M F, Amanullah M T O, Salahuddin A A, 2012, Locating Underground Cable Faults: A Review and Guideline for New Development, 22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 26-29 September, Bali.
- Komodo M, Kawashiwa T, Arakane M, Aihara M, Fujiwara Y, Shinagawa J, 1991, Development of a Current Detection Type Cable Fault Locator, IEEE Transactions on Power Delivery, 2, 541-545.
- Moshtagh J, Aggrawal R K, 2004, A new approach to fault location in single core underground cable system using combined fuzzy logic and wavelet analysis, 2004 Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 5-8 April, Amsterdam.
- Pandey A, Younan N H, 2010, Underground Cable Fault Detection and Identification via Fourier Analysis, 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application, 11-14 October, New Orleans.
- Potivejkul S, Kerdonfag P, Jamnian S, Kinnares V, 2000, Design of Low Voltage Cable Fault Detector, 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Conference Proceedings, 23-27 January, Singapore.
- Powers W F, 1994, The Basics of Power Cable, IEEE Transactions on Industry Applications, 3, 506-509.
- Salim R, Resener M, Filomena A, Oliveira K, Bretas A, 2009, Extended fault-location formulation for power distribution systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 2, 508-516.
- Saner Y, 1998, Güç (Enerji) Dağıtımı, Birsen Yayınevi, 830s, İstanbul.

- Shim I, Soraghan J J, Siew W H, McPherson F, Gale P F, 1999, Partial Discharge Location On High Voltage Cables, 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 23-27 August, London.
- Siew W H, 2003, Automatic fault location for underground distribution network, 17th International Conference on Electricity Distribution, 12-15 May, Barcelona.
- Song Y H, Chen W R, Zhao W, 2001, Improved GPS Travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 5, 403-411.
- Song Y H, Zhao W, Min Y, 2000, Wavelet analysis based scheme for fault detection and classification in underground power cable systems, Electric power system research, 1, 23-30.
- Tekin M, 2006, Yeraltı Kablolarında Arıza Yeri Tespiti, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, İstanbul.
- Wang M, Hou Y, 2004, Modelling of Cable Fault System, Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 26-29 August, Shanghai.
- Wang M, Hou Y, 2005, Neural Network Model Based on Anti-Error Data Fusion, 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 18-21 August, Guangzhou.
- Weeks W L, Steiner J P, 1982, Instrumentation for the Detection and Location of Incipient Fault on Power Cable, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 7, 2328-2335.
- Zhang X, Jiang X, Xie H, 2000, The Application of Fiber Optic Distributed Temperature Sensor to Fault Detection of XLPE Insulated Underground Cable, Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 21-26 June, Xi'an.
- Zhang W, Xiao X, Zhou K, Xu W, Jing Y, 2017, Multicycle Incipient Fault Detection and Location for Medium Voltage Underground Cable, IEEE Transactions on power delivery, 3, 1450-1459.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://em.erciyes.edu.tr/sbahceci/Dosya/Iletim%20Hatleri.pdf>, 31.03.2023
- 2- https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Yeralt%C4%B1%20Enerji%20Hatlar%C4%B1.pdf%3C, 03.04.2023
- 3- https://embed.widencdn.net/pdf/plus/megger/vt7gezv1pu/PrelocationICEMethod_en_001.pdf%3C,03.04.2023
- 4- http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Bir%20Fazl%C4%B1%20Transformat%C3%B6r%20Sar%C4%B1m%C4%B1.pdf%3C, 05.04.2023
- 5- <https://www.hvtechnologies.com/cable-fault-location-measuring-methods/%3C>, 10.04.2023