



**FLYBACK TOPOLOJİSİ TABANLI
YÜKSEK GERİLİM ÜRETEN OZON JENERATÖRÜ
TASARIMI VE UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET MELİK KILIÇARSLAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi TOLGA ÖZER

İkinci Danışman

Prof. Dr. YÜKSEL OĞUZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FLYBACK TOPOLOJİSİ TABANLI
YÜKSEK GERİLİM ÜRETEN OZON JENERATÖRÜ
TASARIMI VE UYGULAMASI

AHMET MELİK KILIÇARSLAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi TOLGA ÖZER

İkinci Danışman

Prof. Dr. YÜKSEL OĞUZ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAYIS 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet Melik Kılıçarslan tarafından hazırlanan “Flyback Topolojisi Tabanlı Yüksek Gerilim Üreten Ozon Jeneratörü Tasarımı ve Uygulaması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 16 / 05 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Tolga ÖZER

İkinci Danışman : Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

Başkan : Prof. Dr. Sinan KIVRAK
Ostim Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

..... İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet KAYSAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

..... İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Tolga ÖZER
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

..... İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

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.

16 / 05 / 2024

İmza

Ahmet Melik KILIÇARSLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FLYBACK TOPOLOJİSİ TABANLI YÜKSEK GERİLİM ÜRETEN OZON JENERATÖRÜ TASARIMI VE UYGULAMASI

Ahmet Melik KILIÇARSLAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Tolga ÖZER

İkinci Danışman: Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

Modern bilim, düşük sıcaklıklarda gazlarda, sıvılarda ve canlıların yüzeyindeki biyolojik olarak zararlı bileşenleri yok etmek için etkili yöntemler geliştirmede zorlukla karşı karşıyadır. Çeşitli endüstriyel malzemelerin, makinelerin ve elektronik cihazların biyokorozyona ve biyolojik bozulmaya karşı korunması, sterilizasyonun tamamlayıcı bir başka uygulamasıdır. Bir nesneyi veya ortamı sterilize etmek için bitkisel hücreler, sporlar, virüsler vb. mikroorganizmaların yok edilmesi gerekir. Örneğin plastik ambalaj malzemelerinin sterilize edilmesinde sıklıkla peroksit bazlı kimyasal sterilizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, malzemeler üzerinde sterilizasyon kimyasal kalıntıları sorunu ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla kimyasal maddeler kullanılmadan sterilizasyon işlemi yapılması gerekmektedir. Atmosferik soğuk plazma (ASP) yöntemleri, çeşitli çevre ve yüzey işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. ASP, çoğunlukla hücre öldürücü reaktif türler üreterek çeşitli mikropları etkisiz hale getirme yeteneğine sahiptir. Son zamanlarda plazma yöntemi tarımsal ürünlerin, tıbbi cihazların, ekipmanların yüzeyindeki ve havadaki mikropları etkisiz hale getirmede etkilidir. Plazma teknolojisi şu anda terapötik tıbbi cihazların sterilizasyonu, artan mahsul verimi ve gıda muhafazası dahil olmak üzere çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır.

Bu tezin amacı, özellikle sterilizasyon ve dezenfeksiyon uygulamalarına katkı sağlamak ve plazma teknolojisi kullanılarak bu işlemin gerçekleşmesini sağlayabilecek bir test cihaz tasarımı yapmaktır.

Temel olarak yüksek gerilim üreterek havayı iyonize eden ve plazma üreten cihazın donanım, yazılım, sistem tasarımı yapılacak ve sistemdeki sıcaklık akım gerilim değerlerinin kaydı ve bunların kontrolünün sağlanması gerçekleştirilecektir. Tasarlanan cihazda flyback kontrol metodu ile EHT trafoları sürülmüştür. EHT trafolarının çıkışında ayarlanabilir ve kontrol edilebilir gerilim elde edilmiştir. Üretilen yüksek gerilim miktarı 3 uç kullanılıp her uçta ayarlanabilmektedir. 5-30 kV' arasında ayarlanabilen stabil gerilim elde edilmiştir. Gerçek zamanlı olarak gerilim, akım ve sıcaklık kontrolü sağlanmaktadır. Sistemde yüksek akım, sıcaklık, gerilim değerlerinde sistem kendisini korumaya alıp enerjiyi kesmiştir. Kullanıcı bilgilendirmesi seri haberleşme ile sağlanmaktadır ve kullanıcı anlık olarak bu değerleri görmektedir.

2024, xv + 110 sayfa

Anahtar Kelimeler: Plazma, Sterilizasyon, Ozon, Ark, Yüksek Gerilim, Flyback

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

BASED ON FLYBACK TOPOLOGY OZONE GENERATOR PRODUCING HIGH VOLTAGE DESIGN AND APPLICATION

Ahmet Melik KILIÇARSLAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric-Electronic Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Tolga ÖZER

Co-Supervisor: Prof. Yüksel OĞUZ

Modern science is faced with the challenge of developing effective methods for destroying biologically harmful components in gases, liquids and the surface of living things at low temperatures. Protection of various industrial materials, machinery and electronic devices against biocorrosion and biodegradation is another complementary application of sterilization. Vegetative cells, spores, viruses, etc., to sterilize an object or environment. Microorganisms must be destroyed. For example, peroxide-based chemical sterilization methods are often used to sterilize plastic packaging materials. However, the problem of sterilization chemical residues on materials arises. Therefore, sterilization process should be done without using chemicals. Atmospheric cold plasma (ASP) methods are frequently used in various environmental and surface treatments. ASP is capable of inactivating a variety of microbes, mostly by producing reactive species that are cell-killing. Recently, the plasma method has been effective in neutralizing microbes on the surface of agricultural products, medical devices, equipment and in the air. Plasma technology is currently used for a variety of purposes, including sterilization of therapeutic medical devices, increased crop yields and food preservation.

The aim of this thesis is to contribute especially to sterilization and disinfection applications and to design a test device that can enable this process to be realized by using plasma technology.

Basically, the hardware, software and system design of the device that ionizes the air and produces plasma by generating high voltage will be designed and the temperature current voltage values in the system will be recorded and their control will be realized. In the designed device, EHT transformers are driven with the flyback control method. Adjustable and controllable voltage is obtained at the output of EHT transformers. The amount of high voltage produced can be adjusted at each end by using 3 ends. A stable voltage that can be adjusted between 5-30 kV has been obtained. Real-time voltage, current and temperature control is provided. In high current, temperature, voltage values in the system, the system protects itself and cuts the energy. User information is provided by serial communication and the user sees these values instantly.

2024, xv + 110 pages

Keywords: Plasma, Sterilization, Ozone, Arc, High Voltage, Flyback

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tolga ÖZER’e ve eş danışmanım Prof. Dr. Yüksel OĞUZ’a araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Sinan KIVRAK’a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim. Sistem üretimi ve test konusunda Prof. Dr. Sinan KIVRAK’ın müdür olduğu “GAYDA Enerji” firmasına desteklerinden dolayı teşekkür ederim ve son olarak bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ahmet Melik KILIÇARSLAN

Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	6
2.1. Plazma Nedir?	6
2.1.1. Plazma Kimyası	8
2.2. Yüksek Sıcaklık Plazma Teknolojisi	9
2.3. Termal Plazma Teknolojisi	9
2.3. Soğuk Plazma Teknolojisi	11
2.3.1. Soğuk Plazma Tipleri	13
2.3.1.1. Dielektrik Bariyer Deşarj Plazma (DBD)	14
2.3.1.2. Korona Deşarjı Plazma (CDP)	16
2.3.1.3. Mikrodalga Soğuk Plazma	21
2.3.1.4. Radyo-Frekans (RF) Soğuk Plazma	22
2.3.1.5. Işıma Deşarjı:	23
2.4. Plazma Teknolojisinin Kullanım Alanları	25
2.4.1. Tıp	26
2.4.2. Tarım	27
2.4.3. Gıda	28
2.4.4. Endüstri	29
2.5 Güç Topolojileri.....	30
2.5.1 İzolesiz Anahtarlama Güç Kaynakları	31
2.5.2 İzoleli Anahtarlama Güç Kaynakları	34
2.6 Ozon Jeneratörü	54
2.6.1 Flyback Topolojisi İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri.....	55
2.6.2 Dielektrik Bariyer Deşarjı İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri	58
2.6.3 Full-Bridge Topolojisi İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri.....	60

2.6.4 Yüksek Gerilim Trafosu İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri.....	63
3. MATERYAL ve METOT	65
3.1 Ozon ve Plazma Üretici	65
3.1.2. Flyback Transformatör.....	66
3.1.3 Plazma Sistemine Ait Kontrol Devresi	68
3.1.3.1 Buck Converter.....	71
3.1.3.2 Gerilim Regulator.....	72
3.1.3.3 Gate Sürücü	73
3.1.3.4 MOSFET Devresi.....	75
3.1.4 Kontrol	76
3.1.4.1 Gerilim Kontrolü	79
3.1.4.2 Akım Kontrolü	81
3.1.4.3 Sıcaklık Kontrolü	83
3.1.5 MCU.....	85
3.1.6 Algoritma	87
4. BULGULAR	89
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	101
6. KAYNAKLAR.....	105

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

K	Kelvin
°C	Santigrat
O ₂	Oksijen
N ₂	Nitrojen
CO ₂	Karbon dioksit
CO	Karbon monoksit
He	Helyum
Ar	Argon
H	Hidrojen
V	Volt
kV	Kilovolt
A	Amper
W	Watt
mg	Miligram
nm	Nanometre
GaN	Galyüm nitrür
SiC	Silisyum karbür

Kısaltmalar

TP	Termal plazma
RF	Radyo frekansı
DBD	Dielektrik bariyer deşarjı
CD	Korona deşarjı
MW	Mikrodalga
AAPJ	Atmosferik basınç
AC	Doğru akım
DC	Alternatif akım
ESP	Elektrostatik çökeltici
ROS	Oksijen reaktif türleri
RNS	Nitrojen reaktif türleri
Duty	Görev döngüsü
PWM	Darbe genişliği modülasyonu
CCM	Sürekli iletim modu
DCM	Sürekli iletim modu
FET	Alan etkili transistör
MOSFET	Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
IGBT	Yalıtımlı kapılı bipolar transistör
MCU	Mikro denetleyici
UART	Evrensel Asenkron Alıcı / Verici

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Maddenin halleri diyagramı	1
Şekil 2.1 Plazma	6
Şekil 2.2 Su temizleme için kullanılan termal plazma örnek şeması.	10
Şekil 2.3 Soğuk plazma işlemi.	13
Şekil 2.4 Dielektrik bariyer deşarj plazma örnek şeması.....	15
Şekil 2.5 Korona deşarj plazma şeması.....	17
Şekil 2.6 Korona deşarj plazma örneği	17
Şekil 2.7 Mikrodalga atmosferik basınçlı plazma sisteminin örnek şeması.....	22
Şekil 2.8 RF plazma sisteminin örnek şeması.....	23
Şekil 2.9 Işıma deşarjı örneği.	24
Şekil 2.10 DC ışıma deşarj plazma durum şeması.	24
Şekil 2.11 Alçaltıcı dönüştürücü örnek devre şeması.	32
Şekil 2.12 Yükseltici dönüştürücü örnek devre şeması.....	33
Şekil 2.13 Alçaltıcı-Yükseltici dönüştürücü örnek devre şeması.....	34
Şekil 2.14 Yarım köprü dönüştürücü örnek devre şeması.....	35
Şekil 2.15 Yarım Köprü – CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) gerilim dalga formları.....	37
Şekil 2.16 Yarım Köprü – CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) akım dalga formları.....	37
Şekil 2.17 Tam köprü dönüştürücü örnek devre şeması.	38
Şekil 2.18 Tam Köprü–CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) gerilim dalga formları.....	40

Şekil 2.19 Tam Köprü–CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) akım dalga formları.	40
Şekil 2.20 Push-pull dönüştürücü örnek devre şeması.....	41
Şekil 2.21 Push-pull CCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) gerilim dalga formları.....	43
Şekil 2.22 Push-pull CCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) akım dalga formları.	43
Şekil 2.23 Push-pull DCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) gerilim dalga formları.....	44
Şekil 2.24 Push-pull DCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) akım dalga formları.	44
Şekil 2.25 Flyback dönüştürücü örnek devre şeması.	44
Şekil 2.26 Flyback CCM dalga formu örneği.	46
Şekil 2.27 Flyback DCM dalga formu örneği.	47
Şekil 2.28 Flyback - CCM, DCM ve Geçiş modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) gerilim dalga formları.....	49
Şekil 2.29 Flyback - CCM, DCM ve Geçiş modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) akım dalga formları.....	49
Şekil 2.30 Flyback kesintili çalışma durumu zaman periyodu.....	51
Şekil 2.31 Tipik flyback dönüştürücü devre şeması.	56
Şekil 2.32 Frekansa bağlı ozon üretim miktarı.....	56
Şekil 2.33 Gerilime bağlı ozon üretim miktarı.....	57
Şekil 2.34 Tipik DBD şeması.....	59
Şekil 2.35 Ozon konsantrasyon eğrisi.	60

Şekil 2.36 LC yüksek gerilim rezonans dönüştürücü şeması.....	61
Şekil 2.37 Full bridge anahtarlama frekansına ve gerilime bağlı ozon üretimi sonuçları.	62
Şekil 2.38 Tipik yüksek gerilim trafosu şeması.	63
Şekil 3.1 Ozon üretim sistemi blok şeması.	65
Şekil 3.2 Flyback trafo.	67
Şekil 3.3 EHT trafo.	67
Şekil 3.4 Plazma sistemine ait kontrol devresi besleme katı şeması.....	68
Şekil 3.5 Plazma sistemine ait kontrol devresi gerilim okuması.....	68
Şekil 3.6 Plazma sistemine ait kontrol devresi akım okuması.	69
Şekil 3.7 Sıcaklık okuması.	69
Şekil 3.8 Sistem kontrol birimi.....	70
Şekil 3.9 Trafo sürme birimi.	70
Şekil 3.10 Kullanıcı kontrol birimi.	71
Şekil 3.11 Buck converter tasarımı.	71
Şekil 3.12 Gerilim regülatörleri.....	72
Şekil 3.13 Gerilim kontrol led devresi.	73
Şekil 3.14 Gate driver devresi.	74
Şekil 3.15 Mosfet kontrol devresi.	76
Şekil 3.16 Kontrol pinleri.....	77
Şekil 3.17 Kontrol butonları ve ayar potu.	77
Şekil 3.18 Bluetooth devre şeması.	78

Şekil 3.19 Hata kontrol blok devresi.	79
Şekil 3.20 Giriş gerilim okuması.....	80
Şekil 3.21 EHT trafo gerilim okuması.	80
Şekil 3.22 Gerilim okuması işlemci koruma devresi.	81
Şekil 3.23 Çıkış gerilim okuması şematığı.....	81
Şekil 3.24 Giriş akımı okuma devresi.	82
Şekil 3.25 Giriş akımı karşılaştırma bloğu.....	83
Şekil 3.26 EHT trafo akım karşılaştırma bloğu.....	83
Şekil 3.27 Sıcaklık sensör bağlantı şeması.....	84
Şekil 3.28 PIC18F46K22 pin şeması.	85
Şekil 3.29 MCU bağlantı şeması.....	86
Şekil 3.30 Algoritma şeması.	88
Şekil 4.1 %5 Duty PWM sinyali.	89
Şekil 4.2 %10 Duty PWM sinyali.	89
Şekil 4.3 %20 Duty PWM sinyali.	90
Şekil 4.4 EHT trafosu ve sarım şekli.....	90
Şekil 4.5 EHT trafosu ve gerilim bölücü sistemi.	92
Şekil 4.6 EHT trafosu çıkış gerilimi ve gerilim bölücü çıkış gerilimi.	92
Şekil 4.7 Haberleşme verileri.	93
Şekil 4.8 Fazla akım acil durum bilgilendirmesi.....	93
Şekil 4.9 Fazla gerilim acil durum bilgilendirmesi.	94
Şekil 4.10 Kullanıcı arayüz programı.....	95

Şekil 4.11 EHT trafo kutusu.....	95
Şekil 4.12 Ark oluşumu.....	96
Şekil 4.13 Test ortamı.	97
Şekil 4.14 Ölçüm değerleri.....	99
Şekil 4.15 Ölçüm değerleri.....	99
Şekil 4.16 Referans ölçüm cihazı.	100



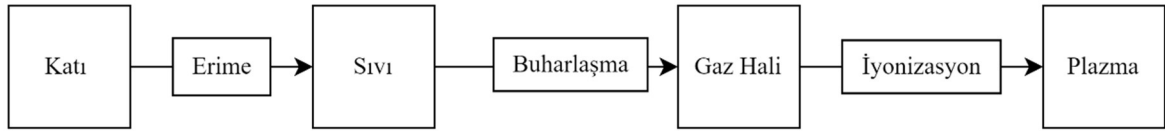
ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Plazma türlerinin sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.2 Plazma bileşenlerinin olası reaksiyonlarından bazıları.....	9
Çizelge 2.3 Soğuk plazma tipleri.....	14
Çizelge 2.4 Yarım Köprü - Sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.....	36
Çizelge 2.5 Yarım Köprü - Süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.....	37
Çizelge 2.6 Tam Köprü - Sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.....	39
Çizelge 2.7 Tam Köprü - Süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.....	40
Çizelge 2.8 Push-pull dönüştürücü sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.....	42
Çizelge 2.9 Push-pull dönüştürücü süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.....	43
Çizelge 2.10 Flyback - Sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.....	47
Çizelge 2.11 Flyback - Süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.....	48
Çizelge 2.12 Flyback - Geçiş modundaki denklemler.....	49
Çizelge 2.13 Frekansa bağlı gerilim jeneratör test sonuçları.....	57
Çizelge 2.14 Frekansa bağlı iyon yoğunluğu test sonuçları.....	58
Çizelge 2.15 Frekansa bağlı DBD gerilim test sonuçları.....	60
Çizelge 2.16 Orta frekans ve yüksek frekans ozon jeneratör sisteminin kıyaslanması..	64
Çizelge 3.1 TLP250 özellikleri.....	74
Çizelge 3.2 IRFP260NPBF MOSFET özellikleri.....	75
Çizelge 3.3 ACS712ELCTR-30A-T özellikleri.....	82
Çizelge 3.4 DS18B20 özellikleri.....	84
Çizelge 3.5 PIC18F46K22 özellikleri.....	85

Çizelge 4.1 EHT trafosunun karakteristiği.....	91
Çizelge 4.2 Hata kodları listesi.....	94
Çizelge 4.3 Ark üretiminden önce oluşan değerler	96
Çizelge 4.4 Ark üretim esnasında oluşan değerler	96
Çizelge 4.5 Frekansa göre oluşan değerler.....	98
Çizelge 4.6 Referans ölçüm cihazı özellikleri.....	100
Çizelge 5.1 Akademik topoloji karşılaştırma tablosu	102
Çizelge 5.2 Piyasa cihazların özelliklerinin karşılaştırma tablosu	103

1. GİRİŞ

Maddenin dört hali olduğunu biliyoruz: katı, sıvı, gaz ve plazma. Belirlenen sırayla, enerji verildiğinde maddenin bir durumu diğerine dönüşmektedir. Maddenin bu dört hali arasındaki temel farklardan birisi ise sahip oldukları enerjidir. Maddenin durumu, enerji arttıkça katıdan sıvıya, gazdan plazmaya, enerji azaldıkça plazmadan gaza, sıvıdan katıya dönüşebilmektedir (Tendero vd. 2006, Von vd. 2010). Gaza yeterli miktarda ilave enerji verilirse “plazma” ya da “iyonize gaz”a dönüşecektir. Bu reaksiyonlar daha yüksek enerjilerde devam ederse moleküler ve atom altı yapılar ayrılacaktır (Niemira ve Gutsol 2010, Niemira 2012). Bu ayrışma sonucunda plazmayı oluşturan elektronlar, pozitif ve negatif iyonlar, serbest radikaller, gaz halindeki atomlar, fotonlar ve uyarılmış moleküller oluşur (Baysal ve İçier 2012, Yüksel ve Karagözlü 2017, Zhang vd. 2017).



Şekil 1.1 Maddenin halleri diyagramı.

Herhangi bir gazda her zaman küçük bir iyonizasyon derecesi mevcut olsa da plazmanın daha katı tanımını "yarı nötr gaz"dır. "yarı-nötrlük", pozitif ve negatif uzay yüklerinin plazma ile dengeleneceği ve böylece genel olarak elektriksel olarak nötr kabul edileceği özelliğini ifade eder (Chen 1984). Yerel bir yük konsantrasyonu meydana gelirse, sterik yük tarafından üretilen elektrostatik kuvvet, yük nötrlüğünü yeniden sağlama etkisine sahip olacaktır. Plazmanın kolektif davranışı, uzun mesafelerde etkili olan, uzak bölgelerin birbiriyle etkileşime girmesine neden olan Coulomb kuvvetinin sonucudur. Bu özellikler plazma durumunu nötr ve diğer iyonize gazlardan ayırmada önemlidir.

Plazmaların bir diğer önemli özelliği ise elektronlar, pozitif ve negatif iyonlar, serbest radikaller, gaz halindeki atomlar ve topraktaki moleküller gibi çok sayıda farklı tür içeren kimyasal olarak reaktif ortam olmalarıdır. Bu nedenle plazma ortamı parçacıkları ve radyasyonu farklı özelliklerle birleştiren enerjik bir kimyasal ortamdır (Kumar ve Dwivedi 2008).

Plazma ile gaz hali arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Gazlar boş olan her şeyi yayma ve doldurma eğilimindedir; plazma ise toplanma eğilimindedir.
- Gaz halinde meydana gelen kimyasal reaksiyonların hızı, plazmaya göre daha yavaştır.
- İyonize bir gaz olan plazma, diğer gazlardan farklı olarak elektriği iyi iletir.
- Gaz molekülleri ile atomlar arasındaki Coulomb kuvveti zayıftır lakin plazmada moleküller arasında çok güçlüdür.

Plazmaya yönelik ilk çalışmalar tarihte Sir Humphry Davy tarafından 1808 yılında kararlı durum sürekli arkın geliştirilmesi, Michael Faraday ve ekibinin yüksek gerilim DC deşarj tüpleri üzerindeki çalışmaları ile atılmıştır (Akan 2006).

“Plazma” 1879'da Sir Crooke tarafından tanımlanmış ve Irving Langmuir ilk kez 1927'de iyonize bir gazı tanımlamak için "plazma" olarak adlandırılmıştır. Plazma yapısı birçok iyon, elektron ve kimyasal içerir. Plazma da diğer maddeler gibi kendiliğinden oluşur. Görünen evrenin %99'dan fazlasının plazma halinde olduğu tahmin edilmektedir. Evrenin plazma olmayan %1'lik kısmı ise yaşadığımız uzay bölgesini oluşturmaktadır (Türeci 2001).

Güneş dahil olmak üzere, tüm yüksek sıcaklıktaki yıldızlar, yıldızlar arası gazlar ve şimşekler doğal plazma kaynaklarının en iyi örnekleridir. Ancak laboratuvarda yapay olarak plazmalar üretilebilirken, pratikte bunu uygulamak çok daha zordur. Laboratuvar koşullarında plazma üretimi de gerçekleştirilebilmektedir (Baboo 2018).

Plazmanın yapısını ve devamını sağlamak için sürekli enerji ihtiyacı vardır. İnsanlar tarafından yapılan plazmalar genellikle elektrik enerjisi kullanılarak üretilir. Bu işlem, farklı gazların düşük basınçlı bir odada hapsedilmesi ve ardından elektrik akımı uygulanmasıyla gerçekleştirilir başka bir deyişle havadaki boşluk gazı iyonize olana kadar iki elektroda yüksek gerilim uygulanarak üretilir. Bu plazmalar genellikle "deşarjlar" olarak adlandırılır.

Gaz deşarjı, elektrik akımının bir gaz ortamından akışıdır. Bunu yapmak için gazın bazı atom ve moleküllerini iyonize etmemiz gerekir. Ayrıca bu akımın oluşabilmesi için bir elektrik alanının mevcut olması gerekir. Elektrik alanıyla hızlandırılan yük taşıyıcıları, enerjilerini diğer parçacıklarla çarpışma yoluyla plazmaya aktarır. Elektronlar, küçük kütleleri nedeniyle enerjilerinin çoğunu atomlar ve moleküllerle elastik çarpışmalarda korurlar. Enerjiyi öncelikle esnek olmayan çarpışmalarda aktarırlar. Sürekli elektrik alanının zaman içerisindeki davranışına göre deşarjlar DC deşarjlar, AC deşarjlar veya darbeleri deşarjlar olarak sınıflandırılır.

DC deşarjı temel ve yüksek oranda tekrarlanabilir bir plazma kaynağıdır. Genellikle bir ucunda katot, diğer ucunda anot bulunan ve aralarında gazla dolu bir boşluk bulunan bir yapıdadır. Plazma, iki elektrot arasındaki gazla dolu boşluğa DC gerilimi uygulanarak üretilir. Çoğu plazma sistemi DC plazma teknolojisine dayanmaktadır.

Son 30 yılda plazmanın çeşitli uygulamalarına yönelik birçok patent ve bilimsel makale bulunmaktadır. Plazma araştırmaları biyomedikal, çevre, havacılık, tarım, tıp ve askeri alanlara doğru genişlemiştir. Plazma yöntemiyle malzeme yüzeyinin aşındırılması sağlanmıştır. Plazma yöntemiyle geliştirilen bu uygulamalar sanayi sektörü için büyük kolaylıklar sağlamıştır (Aktan 2011). Plazma yönteminin aynı zamanda medikal alandaki uygulamalara da katkı sağladığı görülmektedir. Medikal alanda ise başlıca biyolojik dezenfeksiyon, yüzey modifikasyonu ve tedavi etme amaçlarıyla yapılmaktadır (Weltman 2008, Aktan 2011). Pratik uygulamalarda birçok araştırmacı, bakterileri öldürmek için etkili plazma jeneratörleri tasarlamıştır. Birçok araştırmacı da plazmanın tedavi üzerindeki etkilerinde çalışmıştır.

İlk deneyler, yüzeyler ve sıvılar üzerindeki bakterileri etkisiz hale getirmek için dielektrik bariyer deşarjın kullanılmasını ve ayrıca cerrahi uygulamalar için plazma darbeleri üretilmesini içeriyordu. Yara sterilizasyonu, hücre ayrımı için soğuk plazmanın kullanımına ilişkin çalışmalar kısa sürede gerçekleştirildi. Daha sonra yara iyileşmesi, diş hekimliği, kanser tedavisi vb. Bu alanlardaki uygulamalar dünya çapında çeşitli laboratuvar ve araştırma merkezlerinde gerçekleştirilmiştir.

Ozon jeneratörü, güçlü bir oksitleyici madde olan ozon gazını üretmek üzere tasarlanmış bir cihazdır. Oksijen moleküllerini ozon moleküllerine dönüştürmek için elektrik enerjisi kullanarak çalışır. Bu süreç ozon üretimi olarak bilinir. Ozon jeneratörleri hava temizleme, su arıtma ve koku kontrolü gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava kalitesini iyileştirmek ve zararlı kirleticileri ortadan kaldırmak için sıklıkla endüstrilerde, ticari binalarda ve hatta konut ortamlarında kullanılırlar.

Ozon jeneratörlerinin tasarımı ve gerçekleştirilmesinde çeşitli elektronik devre topolojileri kullanılmaktadır. Bu devre topolojileri, su arıtma, hava temizleme ve tıbbi sterilizasyon gibi endüstrilerde çok sayıda uygulamaya sahip güçlü bir oksitleyici madde olan ozonun verimli bir şekilde üretilmesini sağlamada çok önemli bir rol oynar. Devre topolojisinin seçimi, istenen ozon çıkışı, güç gereksinimleri ve özel uygulama gereksinimleri gibi faktörlere bağlıdır.

Ozon jeneratörleri için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri korona deşarj yöntemidir. Bu yöntem, tipik olarak bir dielektrik bariyer kullanılarak, gazla dolu bir boşlukta bir korona deşarjı oluşturmak için yüksek voltajın kullanılmasını içerir. Korona deşarjı oksijen moleküllerini parçalayarak ozon oluşumuna yol açar. Korona deşarj yöntemi, yüksek ozon üretim verimliliği, kompakt boyut ve kontrol kolaylığı gibi avantajlar sunmaktadır. Ancak güvenlik ve güvenilirliği sağlamak için dikkatli tasarım hususları gerekir. Sonuç olarak ozon jeneratörlerinin tasarımı, uygun elektronik devre topolojilerinin seçimini içerir. Flyback elektronik topolojisi, yaygın olarak kullanılan bir devre konfigürasyonudur. Özellikle yüksek voltaj çıkışı gerektiren uygulamalarda elektrik enerjisini verimli bir şekilde dönüştürmek ve düzenlemek için tasarlanmıştır. Bu topoloji, açma periyodu sırasında enerjiyi bir indüktörde depolayabilmesi ve kapatma periyodunda onu yüke bırakabilmesi ile karakterize edilir. Giriş ve çıkış arasında galvanik izolasyon sağlayarak güvenliği ve elektrik çarpmalarına karşı korumayı sağlar. Genel olarak, yüksek voltaj yetenekleriyle geri dönüş elektronik topolojisi, çeşitli güç kaynağı uygulamaları için çok yönlü ve verimli bir çözümdür.

Bu çalışmada sterilizasyon amacı ile bir ozon jeneratörü üretilmesi hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada flyback topolojisi ve flyback transformatörü kullanılmıştır. %0 – %50 arasında ayarlanabilen duty miktarı, trafonun çeşitli sarım sayısı ve çeşitli frekans

değerleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda optimum aralık olarak test parametrelerinin, 24V DC giriş gerilimi, %10 duty ve 20 kHz frekans olduğu gözlemlenmiştir. Bu parametreler ile yapılan testlerde sistemin 24kV gerilim ürettiğini ve 0,44A akım çektiği gözlemlenmiştir. Sistemde bulunan kablosuz haberleşme özelliği ile anlık olarak akım, gerilim ve sıcaklık bilgilerine ulaşılabilir. Tasarlanan sistemde uygun materyaller ile gerilim uygulanarak ozon üretimi gerçekleştirilmiştir. Her bir trafodan 11 ppm değerinde ozon üretildiği gözlemlenmiştir.

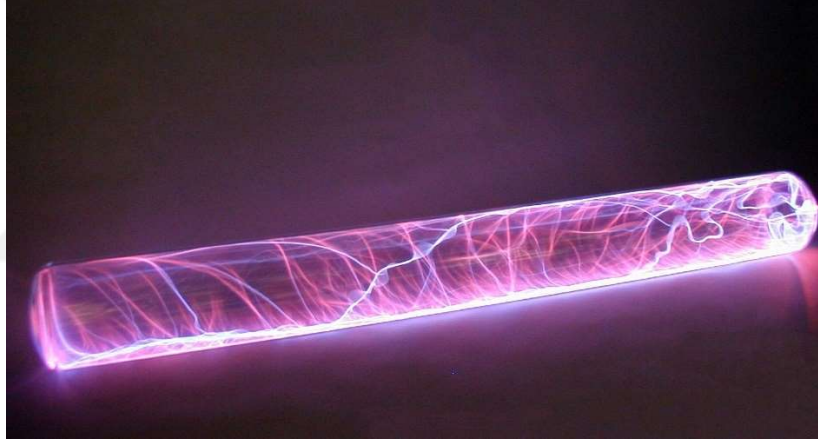
Tasarlanan bu sistem özellikle sterilizasyon, tarım ve yara tedavisi gibi alanlar için revize edilip hızlıca uygulanabilir ve çözüm oluşturabilir.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1. Plazma Nedir?

"Plazma" terimi, elektronlar, iyonlar ve nötrler içeren kısmen veya tamamen iyonize olmuş bir gazı tanımlamak için kullanılır. Her zaman düşük iyonizasyon derecesine sahip olmasına rağmen, plazmanın daha farklı bir tanımı "hacimli davranışa sahip yüklü ve nötr parçacıklardan oluşan yarı nötr gazdır". Yarı nötrlük, pozitif ve negatif boşluk yüklerinin plazma ile dengeleneceği özelliğini ifade eder, dolayısıyla plazma genellikle elektriksel olarak nötr kabul edilir (Chen 1984). Plazma, maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinden çok farklı özelliklere sahiptir. Bu nedenle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılmaktadır (Akman 1993, Li vd. 1997).



Şekil 2.1 Plazma.

Plazma, çeşitli sıcaklık ve basınçlarda enerji kullanılarak üretilebilir. Bu enerji, gaz moleküllerini ayırmaya yetecek kadar verimli elektriksel, mekanik, termal veya nükleer enerji olabilir. Bu amaçla kullanılan enerji kaynağının türüne ve miktarına bağlı olarak plazma elektronların yoğunluğu ve sıcaklığı değişir. Laboratuvar plazması kimyasal olarak homojen olabilir ve yoğunluğu bir katınıninkiyle karşılaştırılabilir.

Plazma teknolojisi temel olarak sistemin çıkışındaki sıcaklığa, iyonların, elektronların ve nötrlerin bağlı sıcaklıklarına bağlı olarak "termal" veya "termal olmayan" plazmalar olarak sınıflandırılır. En önemli fark, termal plazmada elektronlar arasındaki enerji aktarımı nedeniyle sıcaklığın binlerce dereceye kadar artması, termal olmayan plazmada

ise yüksüz moleküller ve iyonların daha büyük rol oynamasıdır (Bogaerts vd. 2002).

Termal plazma, elektronların ve iyonların termodinamik dengede olması koşuluyla bir gazın yüksek sıcaklığa ısıtılmasıyla üretilir. Plazma işlemi sırasında yüksek sıcaklıklara çıktığından dolayı sıcak plazmalar sadece sıcaklığa dayanıklı malzemelerde kullanılır. Örnek olarak metal, metal oksit gibi inorganik malzemeler (Friedrich 2011, Güleç 2012). Öte yandan termal olmayan plazma, düşük sıcaklıkta yüksek enerjili hareketli iyonların ve moleküllerin varlığıyla karakterize edilir ve termodinamik olarak kararsızdır (Bourke vd. 2018). Isıya duyarlı tıbbi cihazların sterilizasyonu, yara iyileşmesi ve gıdada bulunan mikroorganizmaların inaktivasyonu amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Niemira 2012, Jiang vd. 2012)

Termal olmayan plazma; yüksek sıcaklıklarda elektron içerebilirler ancak nötr, iyonik ve radikal parçacıklar oda sıcaklığına yakın kalır (Sarangapani vd. 2018). Termal olmayan bir plazmada, yüksek enerjili elektronlar, plazmadaki kimyasal reaksiyonların başlatılmasında en önemli rolü oynar.

Çizelge 2.1 Plazma türlerinin sınıflandırılması.

Plazma	Durum	Örnek
Yüksek sıcaklık plazması (Denge plazması)	$T_e \approx T_i \approx T_g, T_g = 10^6 - 10^8 \text{ K}$	Lazer füzyon plazması
Termal plazma (Yarı denge plazma)	$T_e \approx T_i \approx T_g \leq 2 \times 10^4 \text{ K}$	Ark plazması, plazma torçları
Termal olmayan plazma (Denge olmayan plazma)	$T_e \gg T_i \approx T_g = 300 \dots 10^3 \text{ K}$	Parıltı, korona

Soğuk plazmada gazın sıcaklığı çok yüksek değildir ancak elektronların sıcaklığı gaz moleküllerini parçalayacak kadar yüksektir. Bu pek çok farklı şey için yararlı olabilir çünkü farklı amaçlar için kullanılabilecek farklı türde soğuk plazma ve gazlar vardır. Soğuk plazma bu özel niteliklerinden dolayı birçok kullanım alanına sahiptir (Zhang vd. 2017).

2.1.1. Plazma Kimyası

Plazma kimyası, maddenin yüksek oranda iyonize gazlardan oluşan bir hali olan plazmada meydana gelen kimyasal reaksiyonların ve süreçlerin incelenmesine odaklanan bir bilim dalıdır. Bu araştırma alanı, reaktif türler üretme yeteneği ve çeşitli endüstriyel uygulamalardaki rolü gibi plazmanın benzersiz özelliklerini ve davranışını araştırıyor. Bilim insanları, plazma kimyasının altında yatan temel prensipleri ve mekanizmaları araştırarak, plazmanın potansiyelini çeşitli amaçlar için kullanan yeni teknolojiler ve uygulamalar geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Plazma, moleküllerin ayrışması sonucu oluşan iyon, nötr, elektron, serbest radikal gibi farklı türde bileşenler içerir. Enerji kaynağına, gazlı ortama, basınca ve deşarj tipine bağlı olarak plazma ortamında tür oranı değişmektedir. Çoğu gazın ayrışma enerjileri iyonizasyon enerjilerinden daha düşük olduğundan, gazların ayrışması her zaman plazmada meydana gelir. Fazladan bir elektronun yerleşmesiyle, bazı atomlar ve moleküller negatif iyonlar oluşturur, bu iyonların stabilitesi elektron afinitelerine bağlıdır.

Bazı atomlar veya moleküller, bir elektron çarpışmasından sonra geçici olarak en düşük konfigürasyonlarından (temel durum) daha yüksek bir seviyeye kadar uyarılabilir. Daha sonra, atomlar orijinal temel durumlarına geri dönerken, ek enerji onlarca saniye veya daha kısa bir süre içinde ışığın yayılmasıyla serbest bırakılır (Dinçmen 2017).

Işığın emisyonu ultraviyoleten kızılötesine kadar değişir; bu olay aynı zamanda alt tabakanın yüzeyinde kimyasal değişikliklere de neden olur. Bazen bu uyarılmış atomlar veya moleküller birkaç saniye sonra enerji açığa çıkarırlar, bunlara yarı kararlı denir ve plazma oluşumunda ve kimyada önemlidir.

Molekülünü oluşturan atomlar sabit değildir, sürekli olarak molekülün merkezi etrafında dönmekte veya ortak eksenleri boyunca salınmaktadır. Molekülün titreşim ve dönme hareketinin enerji seviyeleri çok düşüktür ve çarpışma sırasında enerji transferi ile arttırılabilir (Dinçmen 2017).

Çizelge 2.2 Plazma bileşenlerinin olası reaksiyonlarından bazıları. (Graham 2007)

Reaksiyon tipi	İsim	Reaksiyon
Elektron etkisi	İyonlaşma	$e + A \rightarrow 2e + A^+$
	Ayrışma	$e + AB \rightarrow e + A + B$
	Ayrışmalı iyonizasyon	$e + AB \rightarrow 2e + A + B^+$
	Dissosiyatif bağlanma	$e + AB \rightarrow A^- + B$
	Elektronik uyarım	$e + A \rightarrow e + A^*$
	Ro-titreşimli uyarım	$e + AB \rightarrow e + AB (v, j \geq 1)$
	Momentum transferi	$e + A \rightarrow e + A$
Doğal	Ayrışma	$AB + M \rightarrow A + B + M$
	Atom transferi	$A + BC \rightarrow AB + C$
	Yeniden düzenleme	$AB + CD \rightarrow AC + BD$
	Rekombinasyon	$A + B + M \rightarrow AB + M$
	Enerji aktarımı	$A^* + B \rightarrow A + B^*$
	Gevşeme	$A^* + B \rightarrow A + B$
	Momentum transferi	$A + B \rightarrow A + B$
İyon	Nötralizasyon	$A^- + BC^+ \rightarrow AB + C$
		$A^- + B^+ \rightarrow A + B$
	İlişkisel ayrılma	$A^- + B \rightarrow AB + e$
	Yük aktarımı	$A^+ + B \rightarrow A + B^+$
		$A^- + B \rightarrow A + B^-$
	Dissosiyatif yük aktarımı	$A^+ + BC \rightarrow A + B + C^+$
	Momentum transferi	$A^+ + B \rightarrow A^+ + B$

2.2. Yüksek Sıcaklık Plazma Teknolojisi

Denge plazması olarak da bilinen yüksek sıcaklık plazması, tüm türlerin (elektronlar, iyonlar ve nötr türler) termal dengede olmasıyla karakterize edilir (Chen 1984).

Yüksek gaz sıcaklıklarına sahiptirler (genellikle > 10.000 K). Yüksek sıcaklık tipik olarak sıcaklıkları 4.000 K ila 20.000 K arasında değişen bu denge plazmalarının oluşumu için gereklidir. Örneğin, yıldızlarda ve füzyon plazmalarında bulunur (Gijbels ve Mullen 2002).

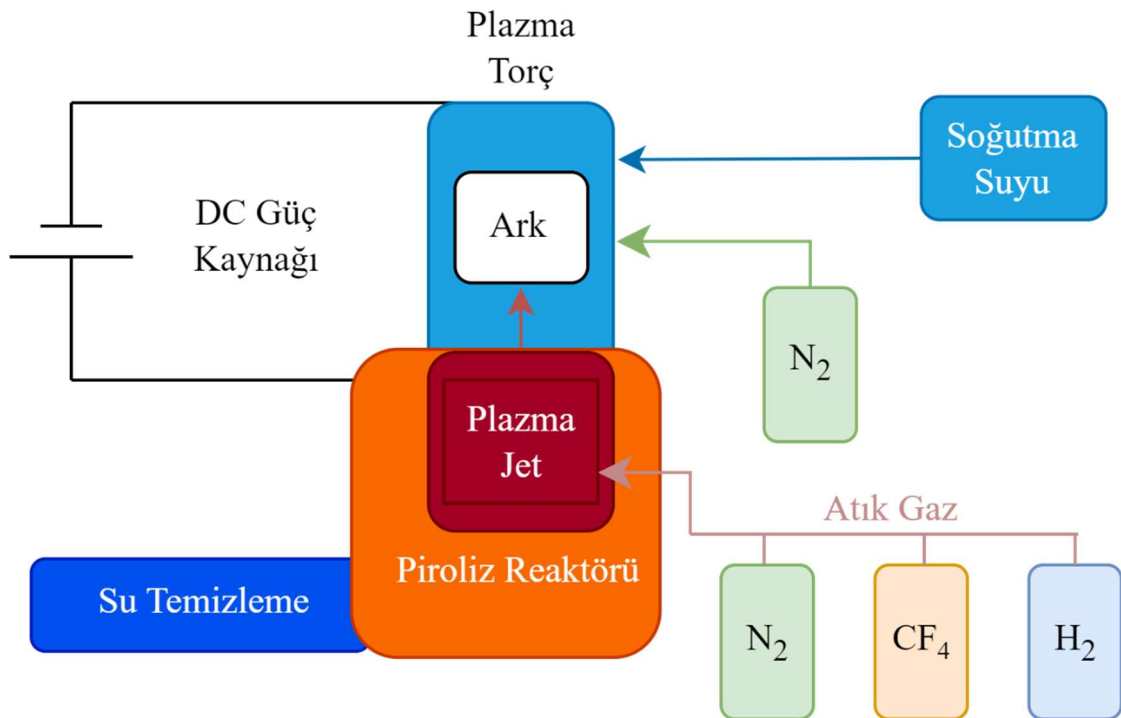
2.3. Termal Plazma Teknolojisi

Yarı denge plazması olarak da bilinen termal plazma (TP), yerel termal dengede olup tüm plazmaların sıcaklığını korur ve plazmanın lokalize bölgelerinde aynıdır (Bogaerts vd. 2002).

Sıcak plazmanın ortamında çok sayıda iyon bulunur ve yüksek enerji düzeyine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı sıcak plazma yüksek derecede iyonizasyon sergiler (Friedrich 2011, Güleç 2012). Sıcak plazmadaki gaz sıcaklığı 1000 K'nin üzerindedir. Normal koşullar altında gaz sıcaklığı yaklaşık 10^4 K'dir.

Plazma fenerleri gibi termal plazma kaynakları, yüksek ısı akışı üretir ve çoğunlukla kesme, püskürtme, hurda kaynaklama, plazma malzeme taşıma ve plazma işleme gibi ısının gerekli olduğu alanlarda kullanılır (Venkatramani 2002).

Yüksek sıcaklıkta uygulanan sıcak plazma malzemenin yüzeyinde oluşan organik polimer yapısına zarar verdiği için sıcak plazmalar yalnızca sıcaklığa dayanıklı inorganik malzemelerin (seramik, metal, paslanmaz çelik vb.) yüzey özelliklerini değiştirmek için kullanılır (Friedrich 2011, Güleç 2012). Termal plazmanın yüksek sıcaklığı, belediye katı atıkları, tehlikeli – tıbbi biyolojik atıklar, endüstriyel ve nükleer atıklar dahil olmak üzere en inatçı atıkları bile temel formlarında işleyebilir ve çevre kirliliğini azaltır (Heberlein 2002).



Şekil 2.2 Su temizleme için kullanılan termal plazma örnek şeması.

Ancak bazı teknolojik uygulamalar için termal plazmanın yüksek sıcaklık özelliği ne gerekli ne de arzu edilen bir özelliktir ve hatta bazı durumlarda sınırlayıcı hale gelir. Bu tür uygulama alanlarında soğuk plazma daha uygun hale gelmektedir (Kumar ve Dwivedi 2008).

Termal plazmanın özel özellikleri ve birçok avantajı vardır bunlardan bazıları:

- Termal plazma en yüksek enerji yoğunluğuna sahip proses ortamıdır; Sonuç, yüksek işlem hızı, yüksek serbest radikal akışı, daha düşük hazırlama kapasitesi, geniş reaktif aralığı ve yüksek söndürme hızıdır.
- Elektriğin ana enerji kaynağı olarak kullanılması, ortamın oksijen potansiyelinden bağımsız olmasını ve dolayısıyla ortamın kontrol edilmesini sağlar. Ayrıca hava akış hızı azalır, enerji akışının kontrolü daha kolay olur ve tepki süresi kısalmır.

Bu avantajları sağlamanın yanı sıra bazı zorlukları da vardır bunlardan bazıları:

- Yüksek enerji yoğunluğu, süreçte dik eğimlere ve sıklıkla anormalliklere yol açar.
- Kararsızlık süreç verimliliğini azaltır ve birçok bağımsız süreç parametresi süreç kontrolünü karmaşıktırabilir.
- Elektrik en pahalı enerji türlerinden biridir ve süreç ve tesislerin ekonomisi genellikle elverişsizdir.

Açıkça görülüyor ki termal plazmayı diğer proses ortamlarına göre kullanmanın ana cazibesi, yüksek hızı ve kompakt konfigürasyonudur. Daha yüksek işlem maliyetleri ve daha düşük verimler kabul edilebileceğinden, işlem ürüne yüksek bir değer sağladığından termal plazma işleminin dezavantajları göz ardı edilebilir. Bununla birlikte, plazma ısı işlemine yönelik eğilim, düşük katma değerli ürün uygulamalarına doğru genişlemiş ve proses kontrolü ve kararsızlık yoluyla güvenilirliğin artırılması önemli bir sorun haline gelmiştir.

2.3. Soğuk Plazma Teknolojisi

Soğuk plazmada önemli miktarda elektronlara göre daha düşük sıcaklıkta parçacıklar ve atomlar bulunur. Soğuk plazma iyonizasyon derecesi 10^{-4} ile 10^{-1} arasında değişmektedir (Friedrich 2011, Güleç 2012, Bozkurt 2014).

Düşük basınçta soğuk plazma elde edilir, Elektronlar ve ağır maddeler arasındaki termodinamik eşitsizliklerle karakterize edilir (Misra vd. 2011). Soğuk plazmada gaz sıcaklığı 1000 K'den azdır. Normal koşullarda gaz sıcaklığı yaklaşık 10^2 K'dir.

Soğuk plazma teknolojisi, bir gazın gerçekten enerjilendirilmesiyle yaratılır. Gazın bazı kısımları aynı kalırken diğer kısımları serbest elektronlar, radikaller, pozitif ve negatif iyonlar, ısı ve elektromanyetik radyasyon gibi farklı parçalara ayrılır (Misra vd. 2014).

Plazma üretmek için gereken enerjiyi sağlamanın lazer ışınları, alevler gibi çeşitli yolları vardır. Bununla birlikte, bir elektrik alanının kullanılması, plazma ateşlemesinin açık ara en yaygın yöntemidir. Doğru akım (DC), DC darbe deşarjı, radyo frekansı (RF) deşarjı ve mikrodalga deşarjı, elektrikli ekipmana dayalı plazma sınıflandırmalarıdır.

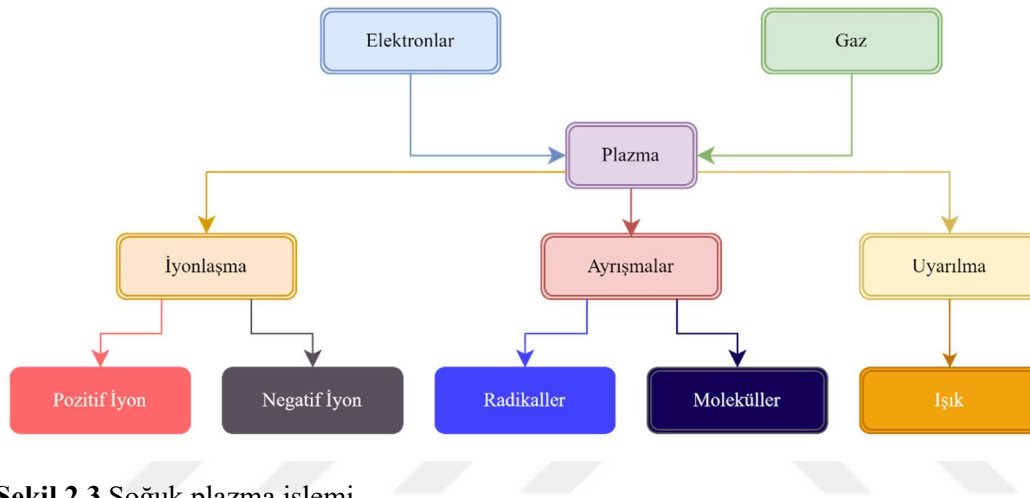
Mühendislik uygulamalarında bu tür güç kaynakları düşük sıcaklıkta plazma üretebilir. Farklı deşarj türlerinin ana özelliği, gaz akışının tamamını ısıtmak yerine, elektrik enerjisinin çoğunun enerji taşıyan elektronların üretimine dönüştürüldüğü bir plazma üretmeleridir (Chen ve Porter 1994). Bu enerji taşıyan elektronlar, uyarılmış türler, serbest radikaller ve iyonlar üretmek için arka plandaki gaz moleküllerinin iyonlaşma, uyarılma ve moleküler bozunma sürecini başlatır.

Ek elektronlarla birlikte, "kimyasal açıdan zengin" aktif türlerin karmaşık bir karışımını üretir. Temel rollerinden dolayı elektronlar plazmadaki "birincil ajanlar" olarak kabul edilir. Soğuk plazma, uygulama noktasında sıcaklığı 315,15 K'nin (40°C) altında olan özel bir plazma türüdür. Düşük veya atmosferik basınçta düşük derecede iyonizasyon ile karakterize edilir. Soğuk bir plazma oluşturmak üzere gazı iyonize etmek için gaza uygulanan enerji kaynağı, doğru veya alternatif akım, radyasyon veya lazer ışığı formunda olabilir (Singh vd. 2014).

Kullanılan gaz karışımı, oksijen (O_2), nitrojen (N_2), hidrojen (H) ve karbon dioksit (CO_2) gibi yaygın atmosferik gazların yanı sıra helyum (He) ve argon (Ar) gibi soy gazları da içerebilir (Han vd. 2019). Reaktif oksijen türlerinden ozon, atomik oksijen, süperoksit, peroksit ve hidroksil radikalının bakteriyel inaktivasyona katıldığı düşünülmektedir.

Aktif gaz olarak hava kullanılarak yüklü parçacıklar, enerjik iyonlar, reaktif oksijen türleri ve reaktif nitrojen türleri gibi reaktanlar üretilirken aynı zamanda ultraviyole (UV) radyasyon da üretilmektedir (Patil vd. 2014, Han vd. 2019).

Soğuk plazmanın termodinamik olarak kararsız güçlü yapısı, düşük gaz sıcaklığı, reaktif kimyasalların varlığı ve yüksek seçicilik gibi üstün özellikleri kullanımları için büyük bir potansiyel sunar. Bu soğuk plazma kaynakları birçok uygulamada kullanılmaktadır.



Şekil 2.3 Soğuk plazma işlemi.

2.3.1. Soğuk Plazma Tipleri

Soğuk plazma sistemi; Mekanizma, basınç uygulaması ve elektrot geometrisine bağlı olarak çeşitli kalitelerde üretilbilirler (Petitpas vd. 2007). Soğuk plazma jeneratörlerinin çok yönlülüğü, bu yaklaşımlarla uyumlu benzersiz tasarımlar sunmaktadır (Pankaj vd. 2018).

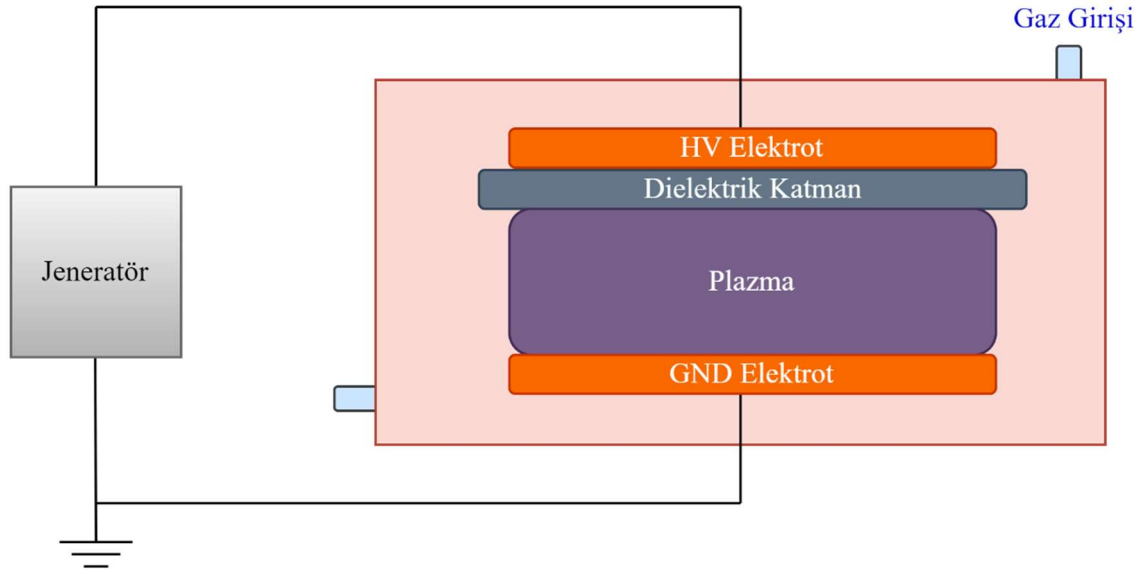
Soğuk plazma sistemi termodinamik dengede değildir; Düşük enerji tüketimleri ve gazlarda nispeten düşük sıcaklıklarda fiziksel ve kimyasal reaksiyonların başlatılması nedeniyle organik sentez için çok umut verici kabul edilirler. Son 20 yılda dielektrik bariyer deşarjı (DBD), korona deşarjı (CD), radyo frekansı (RF), mikrodalga (MW) ve atmosferik basınç (APPJ) plazması gibi soğuk plazmalar farklı teknikler kullanılarak üretilmiştir. Üretilen tüm soğuk plazmalar endüstriyel uygulamalar için oldukça verimlidir (Hati vd. 2018).

Çizelge 2.3 Soğuk plazma tipleri.

Plazma Türü	Avantaj	Metot	Kaynak
Dielektrik bariyer deşarj plazma (DBD)	Atmosferik veya daha yüksek basınçlarda çalışabilir. Farklı elektrot geometrileriyle üretilebilir. Geniş alanlı uygulamalar için idealdir.	Dielektrik materyalle kaplı iki paralel elektrot	Han vd. 2019; Tolouie vd. 2018
Korona Deşarj Plazma (CDP)	Atmosferik veya daha yüksek basınçlardaki düşük sıcaklıklarda, gazlara uygulanabilir. İyonize gaz uzun süre stabil ve sabit kalabilir	Korona deşarjı	Han vd., 2019; Tolouie vd. 2018
Mikrodalga soğuk plazma (MCP)	Elektrotsuz olduğu için üretilmesi kolaydır. Kullanımı pratiktir. Su buharında ve havayla kolayca oluşturulabilir	Elektronların kullanılmadığı mikrodalga frekansı	Niemira, 2012; Tolouie vd. 2018
Radyo-frekans (RF) soğuk plazma	Frekans aralığı Hz'den MHz'e kadar ulaşabilir.	Değişik güç ve gerilim değerlerinde elektriksel impulslar	Han vd., 2019; Hoffman vd. 2013; Niemira, 2012.

2.3.1.1. Dielektrik Bariyer Deşarj Plazma (DBD)

Dielektrik bariyer deşarjı veya basitçe bariyer deşarjı bir yüzyıldan fazla süredir bilinmektedir. İlk deneysel çalışma Siemens tarafından yayımlanmıştır. Siemens ozon üretimi üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu, bir oksijen veya hava akışının, iki eş eksenli cam tüp arasındaki dar bir halka şeklindeki boşlukta alternatif bir elektrik alanı tarafından tutulan bir dielektrik bariyer deşarjının (DBD) etkisine tabi tutulmasıyla elde edilir. Bu boşaltma cihazının yeniliği, elektrotların boşaltma odasının dışında yer alması ve plazma ile temas halinde olmamasıdır (Siemens 1857). DBD Simens tarafından su kaynaklarının dezenfekte edilmesi amacıyla ozon üretilerek geliştirilen sistemden faydalanmıştır. Aynı zamanda 1875 yılından bu yana ilk kez mikroorganizmaları etkisiz hale getirmek için kullanılmıştır (Laroussi vd. 1999).



Şekil 2.4 Dielektrik bariyer deşarj plazma örnek şeması.

DBD'de dielektrik kaplama bir kapasitör görevi görerek termal olmayan bir plazmanın oluşmasına izin verir ve korona plazmasından daha düzgün bir etki üretir. Ancak bu boşalmanın oluşturduğu yapıların direnci düşüktür. Plazma elde etmek için uygulanan gerilimin gazın ayrışması için gereken gerilimden daha büyük olması gerekir. Son yıllarda özellikle polimerik prosesler için kullanılmaktadır (Panousis 2006, Dhali 2007, Ricardo ve Vaiana 1992). DBD'lerin numuneleri sterilize etmesine olanak tanıyan, “uzaktan maruz kalma reaktörü” adı verilen bir reaktör geliştirilmiştir. Uzaktan plazma tedavisinin de aynı zamanda etkili bakteriyel inaktivasyonla sonuçlanabileceğini bulmuşlardır (Roth vd. 2000).

DBD reaktörünü, kuru numuneler için 4 dakikada, ıslak numuneler için ise 40 saniyede tam bakteriyel inaktivasyon gerçekleştirerek ıslak ve kuru numuneleri sterilize edecek şekilde tasarlanmışlardır (Tanino vd. 2007).

DBD'nin elektriksel özellikleri, yüksek frekanslı bir dijital osiloskopla akım ve gerilimin ölçülmesiyle karakterize edilmiştir. Optik karakterizasyon, bir emisyon spektrometresi ile deşarj spektrumlarının kaydedilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Elektron sıcaklığı, 200 nm ila 450 nm aralığındaki optik spektrum uygulanarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak elektron sıcaklığının yaklaşık 1,9 eV olduğu bulunmuştur (Tyata vd. 2009).

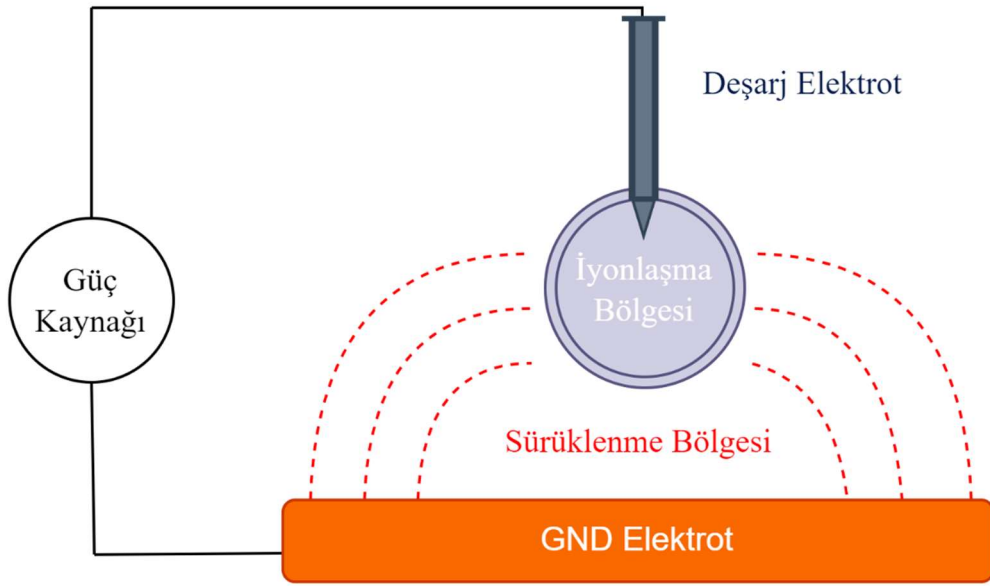
Nanosaniye darbeleri kullanan ve termal olmayan yeni bir DBD plazma sistemi geliştirilmiştir. Bu sistemin atmosferik basınçta havada homojen olduğu ve özellikle topografik olarak düzgün olmayan yüzeylerde bakterileri daha etkili bir şekilde öldürdüğü gösterilmiştir (Ayan 2009).

Pleksiglas cam kutu içine oksijenin yerleştirilmiş bir DBD reaktörü tasarlanmıştır. 'Saccharomyces cerevisiae' ve 'Candida' mayalarını iki yöntemle sterilize etmek için bu DBD reaktörünü kullanmışlardır. Oksijen plazmasına doğrudan ve dolaylı olarak maruz bırakılmıştır. Dolaylı sterilizasyonun mayayı 3 dakikadan kısa sürede etkisiz hale getirdiği, doğrudan sterilizasyonun ise 10 dakikadan fazla sürdüğü tespit edilmiştir (Morgan vd. 2010). Geleneksel ısı işlemler gıda kaynaklı patojenleri etkisiz hale getirebilir ancak gıdanın besin değeri ve duyu kalitesi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu nedenle, gıdanın mikrobiyal kontaminasyonunu etkili bir şekilde azaltmak için kullanılabilecek yeni ısı gerektirmeyen ve yüksek enerji verimliliğine sahip tekniklerin geliştirilmesine büyük önem verilmektedir (Kim vd. 2014, Toepfl vd. 2006, Van vd. 2010).

Gıda endüstrisinde uygulama potansiyeli yüksek olan yeni gelişen teknolojilerden biri, yarı nötr durumdaki iyonize bir gaz olan plazmanın kullanımını içerir (Lee vd. 2011). Plazma, bakterileri etkisiz hale getirdiği yaygın olarak bilinen serbest elektronlar, iyonlar, uyarılmış moleküller ve UV fotonları gibi oldukça reaktif türler üretir (Kaushik vd. 2013, Kim vd. 2014). DBD plazma üretimi için 45 kV, 50 kHz yüksek frekanslı yüksek gerilim güç kaynağı tasarlanmış ve üretilmiştir (Surender ve Anurag 2015).

2.3.1.2. Korona Deşarjı Plazma (CDP)

Korona deşarjları bir dizi küçük yıldırım benzeri deşarjdan oluşur. Bu deşarj, çok farklı konfigürasyonlara veya darbelere sahip olabilen, yüksek bir gerilim kullanılarak atmosferik basınçta üretilir. Yüksek gerilim sivri elektrottan malzemeye doğru yönlendirilen ışık filamanları ile karakterize edilir. Korona deşarjı tam bir plazma değildir, elektronlar ve iyonlar iyonizasyonla oluşur (Shenton vd. 2002).

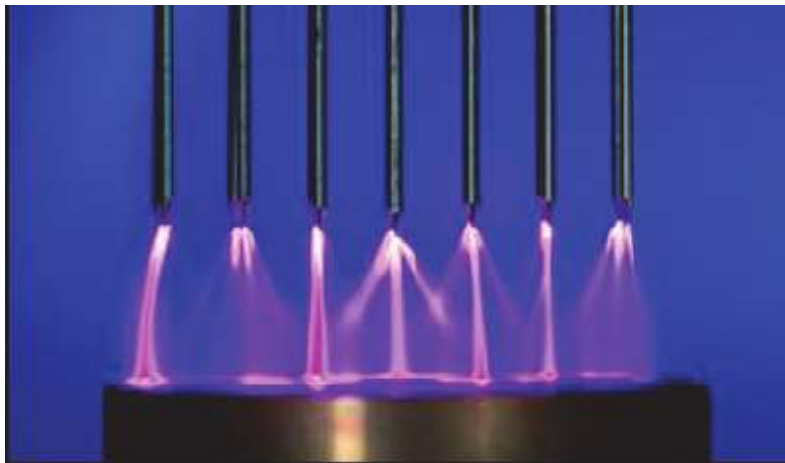


Şekil 2.5 Korona deşarj plazma şeması.

Korona deşarjını başlatmak için üç koşulun yerine getirilmesi gerekir;

- Alan yoğunluğu yeterince yüksek olmalıdır
- Alan eşitsizliğinin derecesi yeterince yüksek olmalıdır
- Aşırı gerilim altındaki alan bölgesinde serbest elektronlar bulunmalıdır.

Korona deşarjı, alanın polarizasyonuna ve elektrotların geometrik konfigürasyonuna bağlı olarak çeşitli şekillerde mevcuttur. İğne plakası elektrot konfigürasyonundaki pozitif korona için, deşarj patlayıcı darbe koronasıyla başlar ve gerilim arttıkça şerit korona, kızdırma korona ve kıvılcım deşarjına doğru ilerler.



Şekil 2.6 Korona deşarj plazma örneği.

Pozitif korona deşarjı ve negatif korona deşarjı:

Güç kaynağı koronanın deşarj özelliklerini büyük ölçüde etkileyen bir faktördür. Atmosferik basınçta içi boş iğneden plakaya elektrik boşalması durumunda, belirtilen temel deşarj özellikleri (manyetik gürültü, elektrik sinyalleri ve entegre emisyon spektrumları) ve deşarj modları elektrot polaritesinden büyük ölçüde etkilenmiştir (Pekarek vd. 1999).

Deşarj modlarındaki değişiklik, iğne elektrotunun polaritesini ve etrafındaki alandaki değişikliklerin yeniden dağılımını etkileyen elektriksel parametrelerdeki değişikliklerle doğrudan ilgilidir. Ek olarak koronal deşarjın histerezis etkisi elektrotun polarizasyonundan etkilenir (Chang vd. 1996).

Yaptığı deneyler sonucunda pozitif korona deşarjı altında akım-gerilim eğrisinde hafif bir histerezis olduğunu, negatif korona deşarjı sırasında ise önemli bir histerezis oluştuğunu göstermiştir (Chang vd. 1996).

Darbeli korona deşarjı:

Onlarca nanosaniye boyunca yüksek gerilim dalgalanması sağlayan darbeli bir güç kaynağı tarafından başlatılır ve sürdürülür. Darbeli korona deşarjları ilk olarak elektrostatik çökelticilere (ESP'ler) uygulandı (White 2012, Korzekwa vd. 1998).

DC korona deşarjı ile karşılaştırıldığında darbe korona deşarjının kendine has özellikleri vardır. Birincisi, biraz daha yüksek bir gerilim uygulandığında, DC korona deşarjı kararsızdır ve kıvılcım durumuna kolayca geçiş yaparken, darbeli korona deşarjı düşük gerilim koşullarında çalışabilir.

Darbeli korona deşarjı DC korona deşarjından daha fazladır. İkincisi, nanosaniye darbeli yüksek gerilim kaynağına uygulanan korona darbeli deşarj, elektronların yüksek enerji durumuna hızlanmasını sağlar. Bu arada, iyon ivmesinden kaynaklanan enerji kaybını önleyen atalet etkisi nedeniyle yüksek kütleli iyonlar sabit kalır (Mu 2016).

Güç kaynağının ekonomisinin ve güvenilirliğinin, plazma teknolojisinin değerlendirilmesinde önemli faktörler olduğu unutulmamalıdır. Ancak güç kaynakları nadiren hem yüksek enerji verimliliğine hem de ekonomik güvenilirliğe ulaşabilmektedir (Nelson ve Salasoo 2007).

Metal plaka elektrotu:

Genellikle asetonu, formaldehiti ve metilen klorürü çıkarmak için kullanılır. Son yıllarda tamamlayıcı teknolojilerin birleştirilmesi veya yapının optimize edilmesi yoluyla geleneksel metal plaka reaktörler geliştirilmiştir (Ruan vd. 2005, Nie vd. 2004).

Blumlein darbe üretici ağı, tristör anahtarlarına ve darbe transformatörlerine dayanan yüksek gerilimli bir güç kaynağı kullanır ve üç tip reaktöre uygulamıştır. Bunlar;

1. Dielektrik bariyer kullanılmayan;
2. Seramik plaka bariyeri;
3. Toluen işlemi için MnO_x katalizörlü seramik bariyer.

Sonuçlar, seramik korumalı reaktörün tepe akımı, tepe gücü ve tek darbe enerjisinin elektriksel parametrelerinin, dielektrik bariyeri olmayan reaktörünkinden önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum elektron sayısının ve elektronların enerjisinin arttığını gösterir. İyileştirmeler tek vuruşla yapılır. Ek olarak, katalizör emdirilmiş seramik plakalı reaktör, optimum temizleme verimliliğine sahiptir.

Tel silindirik elektrot:

Katalitik güçlendirme ve darbeli deşarj yoluyla tolüenin giderimi üzerine yapılan çalışmalar, deşarj prosesindeki metal oksitlerin organik bileşiklerin uzaklaştırılmasında daha iyi katalitik aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir.

Örneğin, MnO_2 ve Fe_2O_3 'ün toluen giderim verimini sırasıyla %59'dan %86'ya ve %83'e çıkarmak mümkündür. Toluen giderim verimliliğini elde etmek için, Mn katalizörü ile enerji tüketimi yaklaşık 30 Wh/g iken, katalizör olmadan enerji tüketimi yaklaşık 50 Wh/g'dir (Yan vd. 2000).

Her iki durumda da katalizörün performansı, ısıtma yoluyla aktivasyon yoluyla eski haline getirilebilir. Uyarma elektrodu, yalıtkan bir kuvars tüp içine yerleştirilmiş 3 mm çapında bir çelik çubuktur; Deşarj elektrodu, kuvars filtreyi çevreleyen bakır bir bobindir. Zemin filtresinin yüzeyinde ve içinde yüksek gerilim ve yüksek frekanslı güç yoluyla deşarj oluşturulur. Kirletici maddeyi içeren gaz reaktöre aktarılır ve daha sonra seramik bir filtreden geçer, yani gazın havalandırma alanından geçmesi gerekir. Sonuçlar, 8 W ve 0,8 L/dk giriş gücü ve akış hızında, 500 mg/L trikloretilenin tamamen ayrıştığını ve trikloretilen, toluen ve benzeni çıkarmak için reaktörde kullanılan arka plan gazından etkilenmediğini gösterdi (Sobacchi vd. 2002).

Çok iğneli düz elektrot:

Çok iğneli düzlem geometrisinde, DC gerilimden kaynaklanan korona deşarjı çok kısa akı darbeleri üretir (Jaworek vd. 1995). Maksimum toluen giderme verimliliği %89'a kadar ulaşmıştır ve enerji verimliliği 6,4 g/kW saat olarak ölçülmüştür. Bu nedenle katalitik olarak birleştirilen iğne plakası ve korona plazması, toluenin ayrışma etkisini artırabilir (Duan vd. 2003).

Silindirik tırtıklı elektrot:

Testere dişli elektrot, tel silindirik elektrot esas alınarak geliştirilmiştir. Araştırmacılar benzen gazı serisini dişli paslanmaz çelik elektrotlar ve silindirik toprak elektrotlarıyla işlemek için bir plazma reaktörü kullandılar. Diş sayısının işleme verimliliğine etkisi dikkate alındığında benzen, toluen ve ksilenin temizleme etkinliği diş sayısı 30 olduğunda en yüksek seviyede olmuştur. Bunun nedeni egzoz dişlisinin olmaması ve yetersiz üretim miktarına yol açması olabilir. Yukarıdaki iki element benzen serisinin oksidatif bozulması için uygun değildir. Ayrıca dişlilerin sürekli olarak boşaltılması durumunda, boşaltma gerilimi ne kadar yüksek olursa, ürünlerdeki CO₂ içeriği de o kadar yüksek olur. Enerji verimliliği önce arttı, sonra azaldı; bu da reaktör giriş gücündeki artışı gösteriyor. Bu doğrudan oksidasyon sürecini etkiler; giriş gücü ne kadar yüksek olursa, o kadar fazla CO₂ ve CO üretilir ve benzen zincirinin oksidasyon durumu da o kadar yüksek olur. Ancak enerji verimliliğini artırmak için madencilik verimliliği ile giriş gücü arasındaki dengeyi dikkate almamız gerekiyor (Wei 2008, Fan vd. 2009).

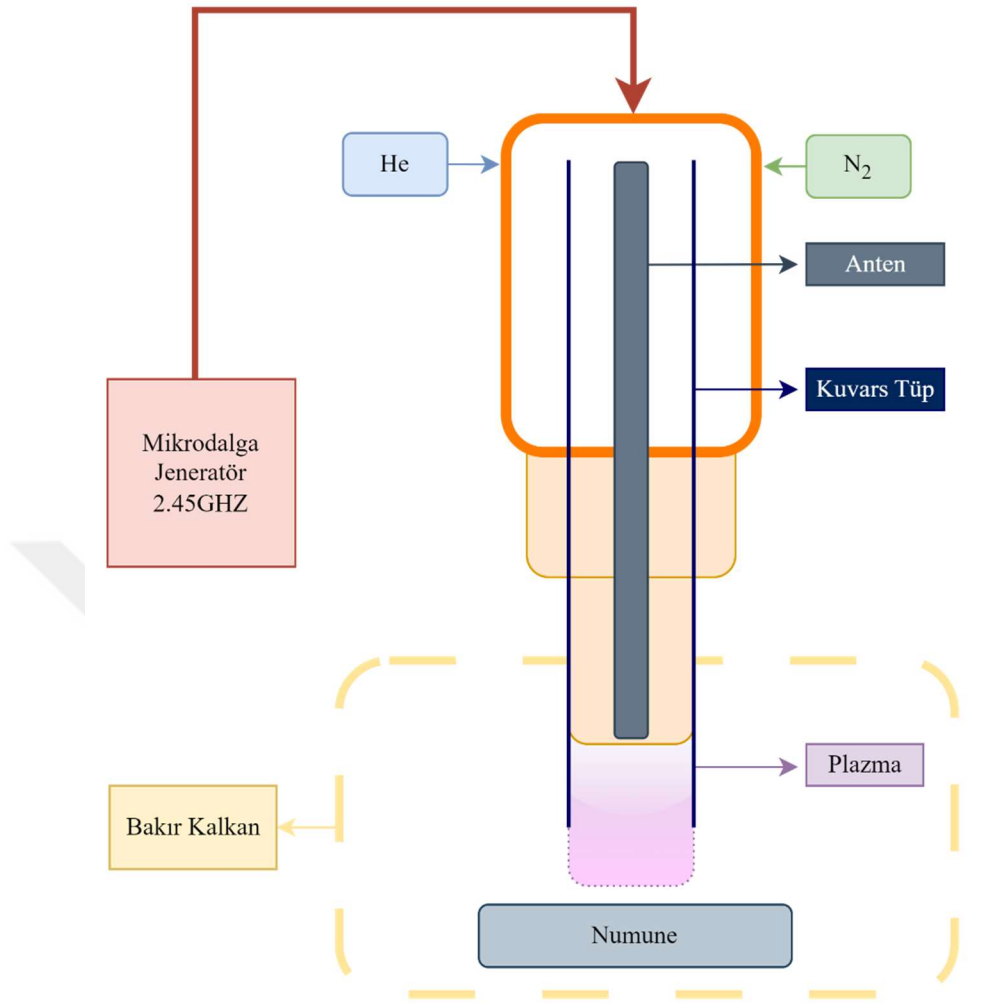
2.3.1.3. Mikrodalga Soğuk Plazma

Yüzlerce MHz (genellikle 2,45 GHz) frekansa sahip elektromanyetik dalgalar, mikrodalga deşarjları oluşturmak için yaygın olarak kullanılır. Yüksek frekanslı jeneratörlerden elde edilen mikrodalga enerjisi, düşük basınç ve atmosferik basınçta mikrodalga plazma üretiminde kullanılmaktadır. Soğuk plazma üretimi için mikrodalga kullanmanın önemli avantajlarından birisi artan elektron yoğunluğu, reaktif üretiminde yüksek verimlilik ve kirlenmemiş bir süreç yer almaktadır (Ekezie vd. 2017).

Mikrodalga plazma UV lambası aynı anda 245 nm'de (bakteri öldürücü bölge) ve 185 nm'de (ozon oluşturan bölge) UV ışığı üretebilir. Mikrodalga plazma UV lambasının elektrot konfigürasyonlu lambaya göre tipik avantajı, mikrodalga plazma UV lambasının güç ve şekil açısından herhangi bir sınırlamaya sahip olmamasıdır (Pandithas vd. 2003).

Elektron siklotron rezonansı, düzgün ve statik olmayan bir manyetik alan varlığında serbest elektronların dairesel hareketi ile ilgilidir. Elektron siklotron rezonanslı mikrodalga plazmanın, düşük ortalama elektron sıcaklığı (5-10 eV), yüksek iyonizasyon derecesi, esnek çalışma sıcaklığı ve basıncı dahil olmak üzere birçok avantajı vardır. Mikrodalga plazma kullanmanın özellikle sterilizasyon için temel avantajları arasında düşük sıcaklık ve zaman tasarrufu yer alır.

Mikrodalga ile üretilen argon plazması, belirli bakteri ve mantar türlerini etkisiz hale getirmek için kullanılmıştır. Mikrodalga plazma dekontaminasyon sistemleri, kimchi salamurasındaki mikrobiyal kontaminasyonu azaltmak için kullanılmıştır (Yu vd. 2011). Elma kabukları ve posaları, çilek, kuzu marul ve havuç gibi taze meyve ve sebzeleri sterilize etmek için mikrodalga plazma ile işlenmiş havayı kullanmıştır (Schnabel vd. 2015). Başka bir çalışmada, taze brokoliyi dekontamine etmek için mikrodalga soğuk plazma (2,45 GHz frekans ve 1,1 kW güç) kullanılmıştır (Schnabel vd. 2016). Ortam basıncı altında üretilen mikrodalga soğuk plazma aynı zamanda kırmızı biber, kırmızı biber tohumları ve çimenler, öğütülmüş misk gibi çeşitli baharat ve bitkilerin doğal mikroflorasını etkisiz hale getirmek için de kullanılır (Hertwig vd. 2015).

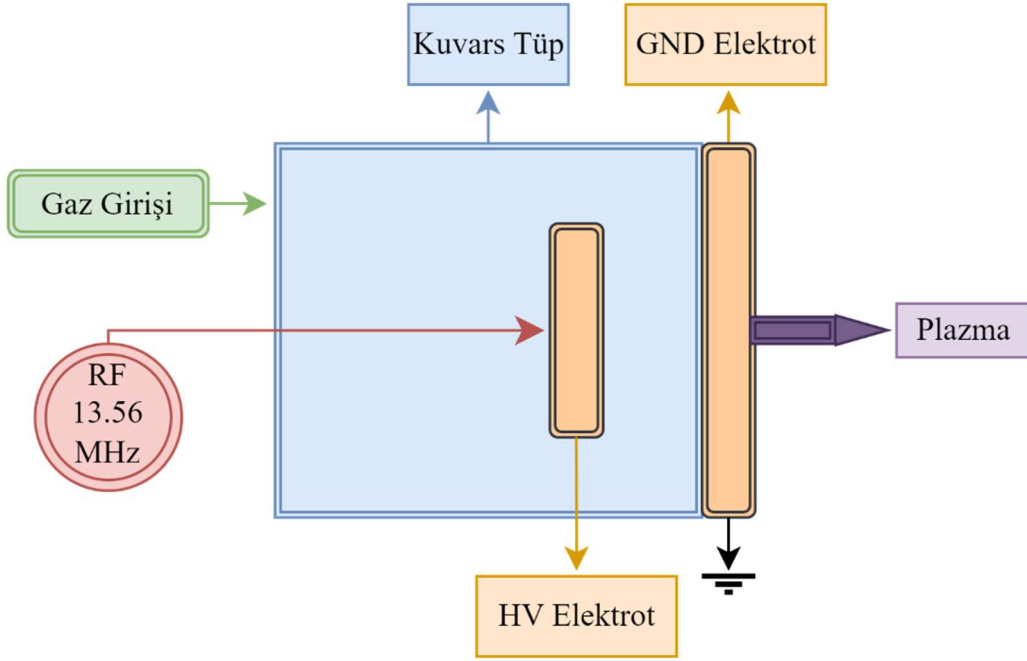


Şekil 2.7 Mikrodalga atmosferik basınçlı plazma sisteminin örnek şeması.

2.3.1.4. Radyo-Frekans (RF) Soğuk Plazma

Radyofrekans (RF) soğuk plazma sistemleri, farklı güç ve gerilim ayarlarında çalışan, hızla dönen elektrik darbelerini kullanarak gazları iyonize eder. Mikrodalga sistemlerinde olduğu gibi RF elektroniği ile ilgili teknolojiler de uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Bu tip soğuk plazma sistemi, mevcut uzmanlıktan yararlanma konusunda benzer bir avantaja sahiptir. Bu sistemlerin frekansları birkaç Hz'den yüksek MHz'e kadar değişebilir (Lassen vd. 2005). RF soğuk plazma sistemleri çeşitli şekillerde olabilir. Örneğin sistem, işlenmiş gıdayı elektrotların arasına yerleştirecek ve elektrotlarla temas sistemi oluşturacak şekilde düzenlenebilmektedir.

Bu çalışmalar, düşük basınçlı soğuk plazmanın patojenleri etkisiz hale getirme yeteneğini göstermektedir. Bu tür sistemler için önemli bir husus, plazma işleminden önce kısmi vakum gerekliliğinin, bu sistemlerin sürekli bir akış konveyörü işlemi olarak hareket etmesini etkili bir şekilde önleyeceğidir.



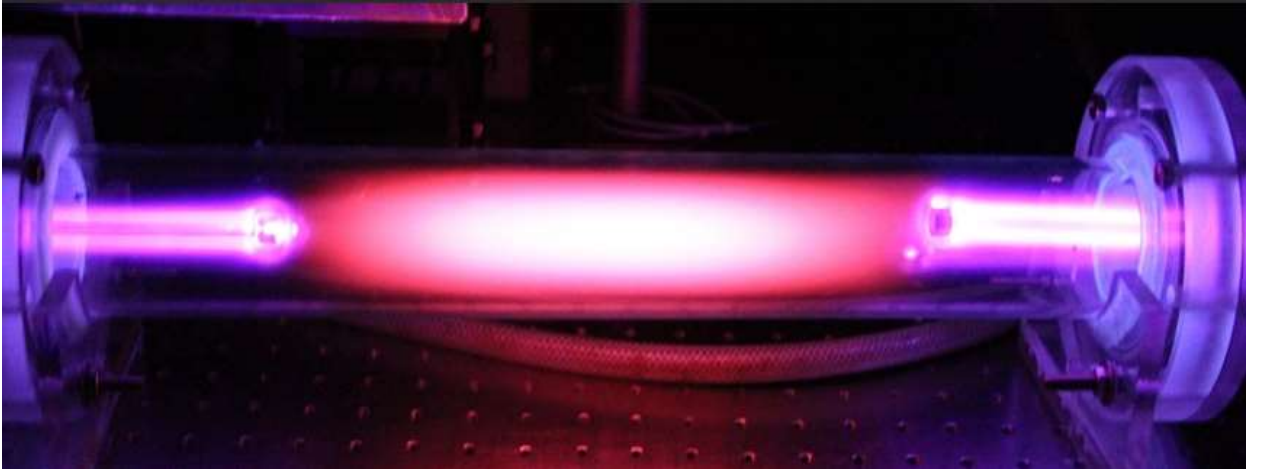
Şekil 2.8 RF plazma sisteminin örnek şeması.

2.3.1.5. Işıma Deşarjı:

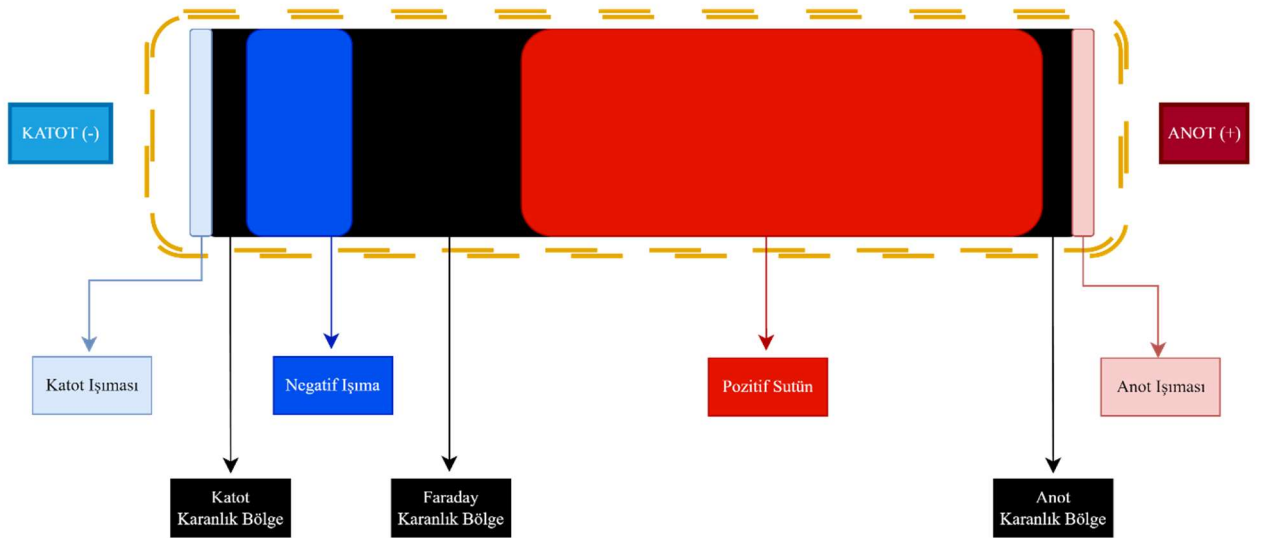
Bir parıltı deşarjı, elektrik akımının bir gazdan geçirilmesiyle oluşur. Düşük basınçta gaz bulundurulmuş cam fanusta iki elektrotun arasına gerilim verilerek elde edilir. Gerilim, "ateşleme gerilimi" olarak bilinen bir seviyeyi aştığında, gaz iyonizasyonu meydana gelir ve cam fanusun içinde renkli bir ışık belirir. Kullanılan gaza bağlı olarak renk değişir. Neon ışıklar, flüoresan lambalar ve plazma ekran televizyonlarda parıltı deşarjlı ışık kullanılır. Gaz içindeki atomik etkileşimler spektroskopi yoluyla analiz edilebilir. Analitik kimya ve plazma fiziği parıltı deşarjları kullanır.

Püskürtme olarak da bilinen bir yüzey işleme yönteminde de kullanılırlar. Sıvıların içinde veya sıvılarla temas halinde olan ışıma deşarj plazmaları üretmek için farklı tipte

reaktörler incelenmiştir. Reaktörler ışıma deşarj plazmasının konumuna göre iki gruba ayrılabilir. Birinci grup sivri uçlu metal anodun çevresinde bulunur ve sıvıyla temas halindedir. Bir diğeri ise reaktörü iki bölmeye ayıran diyaframdaki küçük deliğin etrafında bulunur. Bu tip deşarj, aydınlatma endüstrisindeki ev tipi neon ve floresan lambalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük basınçta (<10 mbar) meydana gelen ısıltılı deşarj, nötr atomları kolayca harekete geçiren ve kullanılan her spesifik gaz için karakteristik bir ışık üreten yüksek enerjili elektronlar üretir. Bu sistemin avantajlarından biri plazmayı üretmek için gereken düşük akım ve gerilimidir.



Şekil 2.9 Işıma deşarjı örneği.



Şekil 2.10 DC ışıma deşarj plazma durum şeması.

Soğuk plazma üretim teknikler, özellikleri, avantajları listelenmiştir;

- Birçok farklı reaktör tipi ve boyutu kullanılabilir. Birçok teknolojik uygulamalarda sorunlara ve koşullara uyum sağlayan sistemler geliştirmek için bu özellikten faydalanılır.
- Farklı elektrot boyutları ve tipleri kullanılabilir. Ayrıca soğuk plazmaların elektrot kullanılmadan bile üretilmeleri mümkündür. Elektrotların plazma ile karışmaması mümkündür.
- Sıvı elektrotların kullanılması da sağlanabilir.
- İstenilen basınç aralığında çalışabilmektedir. Hatta atmosfer basıncında bile üretilbilirler.
- İstenilen gaz veya gaz karışımı da alternatif olarak kullanılabilir.
- Oldukça küçük olan deşarj ölçülerinde üretilmektedirler.
- Son derece kolay, ucuz ve basit yöntemler tasarlanabilir.
- Farklı iyonlaşma dereceleri mevcuttur.
- Yerel olarak homojen plazma elde edilebilir.
- Stabil plazma üretirler.
- Atmosfer basıncında çalıştıkları için herhangi bir vakum sistemine ihtiyaç duymazlar, bu da onların son derece verimli ve ucuz çalışmasına olanak sağlar.

2.4. Plazma Teknolojisinin Kullanım Alanları

Uyarılmış moleküller, yüklü parçacıklar, oksijen reaktif türleri (ROS), nitrojen reaktif türleri (RNS) ve ultraviyole (UV) fotonları, aktif atomların antibakteriyel özelliklerine katkıda bulunur. Bu özelliği sayesinde bakterileri, kanser hücrelerini, mantarları, parazitleri, fajları ve virüsleri etkisiz hale getirebildiği bilinmektedir (Mai-Prochnow vd. 2014). Soğuk plazma teknolojisinin benzersiz özellikleri biyolojik nesneler üzerinde uyarıcı bir etkiye sahiptir. Bu özelliklere sahip plazma teknolojisi; Tıp, tarım, çevre, ekoloji ve gıda gibi alanlarda yeni umutlar açan yeni nesil sterilizasyon uygulaması olabilir (Filatova vd. 2018).

Plazma teknolojisindeki yeni tedaviler araştırmalar doğrultusunda diş enfeksiyonlarının tedavisi dermatolojik uygulamalar, yara sterilizasyonu, yara iyileşmesi, koagülasyon ve kanser tedavisi gibi çeşitli uygulama alanlarında gerçekleştirilmektedir (Graves 2014,

Nishime vd. 2017). Ayrıca endüstriyel ekipmanlarda hassas yüzeylerin sterilizasyonunda, tekstil ürünlerinin kalitesinin artırılması ve tıbbi cihazların sterilize edilmesi gibi çeşitli alanlarda da uygulama alanı bulmaktadır (Mandal vd. 2018).

Plazma teknolojisi, atıksız ve çevre dostu bir uygulama olmasının yanı sıra, malzemelerin özelliklerinde istenilen değişikliklerin elde edilmesine olanak sağladığı için ekstra önem taşımaktadır. Polimer teknolojisinde de kullanımı oldukça yaygındır (Kusano 2014).

2.4.1. Tıp

Tıpta ve özellikle tıbbi cihaz teknolojisindeki muazzam ilerlemelere rağmen, 21. yüzyıl tıbbi hala önemli ve büyüyen zorluklarla karşı karşıyadır. Genel olarak artan dünya nüfusu ve Batı ülkelerinde artan yaşlanan nüfus, küresel anlamda sağlık sektörüne olan talebin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, özellikle Batı dünyasında halk sağlığı maliyetlerinin artmasıyla birleşince, yenilikçi, etkili ve daha ucuz tıbbi tedavilerin bulunmasını zorunlu hale getirmektedir (Thomas vd. 2013).

Plazmanın ilk tıbbi uygulamaları, elektroterapinin popülerliği sayesinde ortaya çıkmıştır ve 19. yüzyılın ortalarına kadar uzanmaktadır. 1850'lerde Siemens dielektrik bariyer boşaltıcıları tarafından üretilen ozonun biyolojik olarak kirlenmiş suyu arıtmak için kullanılmasıyla başlayarak, yüksek tansiyonu tedavi etmek için karbon ark lambaları ve "mor ışın" makineleri gibi elektroterapi cihazlarıyla terapötik plazmaya yönelik ilk deneysel yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu sayede "Plazma ilaçları" olarak tanımlanmadan uygulamalar geliştirilmiştir. "Canlı hücrelerin, dokuların ve organların tedavisi için plazma teknolojisi" yani terapötik etkiler elde etmek için doğrudan insan (veya hayvan) vücuduna uygulanan uygulama ile "Plazma Tıbbı" terimi tanımlanmıştır (Hensley 2002). Bu tür tedavi yöntemlerinde insan vücuduna sadece elektrik alanları, gerilim darbeleri veya akımlar uygulanmaz, aynı zamanda çeşitli hastalıkların tedavisinde elektrik kıvılcımları ve flaş deşarjları da kullanılır (Schott 2001).

20. yüzyılın başlarında, cildi uyarmak için yüksek frekanslı alternatif gerilim kullanımına dayanan bir elektrik tedavisi olan "Zeileis yöntemi", Avusturyalı mucit Valentin Zeileis

tarafından icat edilmiştir. Elektrot konfigürasyonunun bir parçası olarak insan dokusu kullanılmıştır. Cildin veya tüm vücudun kendi kendini iyileştirme yeteneklerini harekete geçirmesini teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Bu tedavinin özel bir türüne “fulgurasyon” denilmekte ve elektrotlar ile insan derisi arasında oluşturulan uzun mesafeli elektrik deşarjlarını kullanan bir cilt uyarımı yöntemidir. Bu tedavi 1933'te bir "şarlatanlık" olarak değerlendirilse bile, hala fiziksel plazmanın insan dokusuna ilk doğrudan uygulanması olarak kabul edilebilir (Burger 1933).

Plazma bir başka uyarıcı etkisi, yeni kan damarlarının oluşumu olan anjiyogenez üzerinde gösterilebilir. İyi bilinen tavuk yumurtası koryoallantoik membran tahlili (HET-CAM) kullanılarak, anjiyogenez bir doku modelinde gösterilebilir (Bender vd. 2012). Son zamanlarda proteomik, yani hücrelerin veya mikroorganizmaların plazma tedavisine yanıt olarak protein profillerinde meydana gelen değişiklikleri tanımlayan teknikler, kapsamlı ve ayrıntılı bir anlayış elde etmek için kullanılmıştır.

2.4.2. Tarım

İklim değişikliği, hızlı sanayileşme nedeniyle küresel gıda talebi önümüzdeki yıllarda artık karşılanamayacağı düşünülmektedir (Sivachandiran vd. 2017). 50 yılı aşkın bir süredir, tarım alanlarında artan sıcaklıkların ve değişken yağışların, tarım arazilerinin verimliliği üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu ve önümüzdeki yıllarda küresel olarak gıda üretimi üzerindeki baskıyı artıracığı genel olarak kabul edilmektedir (Elbehri 2015).

20. yüzyılın küresel sorunlarından biri olan gıda güvenliğinin korunması ve geliştirilmesidir (Farsund vd. 2015). Ekilebilir arazileri artırmak zor olduğundan, gıda kıtlığını gidermenin tek yolu, ekonomik açıdan sürdürülebilir bir sürecin parçası olarak tarımsal verimliliği artırmaktır. Tohumların çimlenme hızının ve bitkilerin büyüme hızının artırılmasıyla dünya nüfusunun gıda ihtiyacının karşılanabileceğine inanılmaktadır. Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü' ne göre gıda kıtlığını hafifletmenin en iyi yöntemi, gıda kıtlığı vakalarını azaltmak için toprak ve su kirliliğinin (mikroorganizmalar, bakteriler, mantarlar ve diğer kimyasal bileşikler) neden olduğu tohum yüzeyi kirliliğini ortadan kaldırmaktır.

Soğuk plazma teknolojisi yenilikçi, ekonomik ve çevreye duyarlı, atık üretmeyen bir topoloji olarak kendine yer edinmiştir. Plazma araştırmacıları 10 yıldır tarımda soğuk plazmanın (plazma çiftçiliği) uygulanması üzerinde çalışmaktadırlar. Tohumlara plazma teknolojisi uygulandığında bitkilerin çimlenme ve büyüme hızının artacağı, tohum yüzeylerinin dekontamine edilebileceği, toprağa uygulanan plazma kimyasının çok fazla çaba harcamadan ve çok fazla su harcamadan verimliliği artırarak ekosistemlere ve çevreye daha az zarar verebileceği iddia edilmektedir (Fomins vd. 2020, Brandenburg vd. 2019, Puač vd. 2018, Judée vd. 2018, Jiang vd. 2018).

Çeşitli çalışmalar, soğuk plazmanın tohum dekontaminasyonu, tohum çimlenme verimliliğinin artması, erken fide gelişimi, farklılaşmanın düzenlenmesi, hücre fizyolojisi, gen ekspresyon sistemlerinin düzenlenmesi ve ayrıca bitki direncinin arttırılması gibi potansiyel faydalarını göstermiştir (Fomins vd. 2020, Babajani vd. 2019, Stolarik vd. 2015, Singh vd. 2015).

Araştırmalar plazmanın tahıl yüzeyinde önemli miktarda mikrobiyal dekontaminasyon sağladığını, tohumların ıslanabilirliğini, su emilimini ve tahıl kalitesini arttırdığını göstermiştir. Çimlenmeyi iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca plazmanın tohum depolama ve kullanım kapasitesini, çimlenme sırasındaki fotosentetik pigment içeriğini, fotosentetik kapasiteyi ve süperoksidad, peroksidad ve polifenoloksidad aktivitesinin arttırdığı tespit edilmiştir. Bu nedenle tüm bu veriler değerlendirme sırasında plazma uygulamasının bitki gelişimini iyileştirmede ve verimi artırmada etkili olduğu belirlenmiştir (Ling vd. 2018).

2.4.3. Gıda

Özellikle son yıllarda sağlıklı yaşam tarzı ve tüketici ihtiyaçları ışığında gıda çeşitliliği ve artan ürün tüketimi gıda sektöründe alternatif teknolojilerin kullanılmasına yol açmıştır (Thrumdas vd. 2014). Ancak bu artış aynı zamanda çiğ veya az işlenmiş gıdalarda gıda kaynaklı hastalık salgınları riskini de artırmaktadır. Çiğ veya işlenmemiş gıdaların tüketimi mikrobiyal kontaminasyonun önemli bir kaynağıdır. Güvenli ve

kaliteli gıdanın sağlanmasında bu durumun önlenmesinde mevcut teknolojilerin yeterli olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca gıdanın bileşiminde, mikrobiyal yük durumunda uygulama sırasında meydana gelen değişikliklerin en aza indirilmesi istenmektedir. Kaliteli gıdaya ve uzun raf ömrüne olan talep, ısıl işlemin yanı sıra başka uygulamaların da aranmasına yol açmıştır (Fernandez vd. 2013, Ahmad Mir vd. 2016).

Soğuk plazma yöntemi, gıda endüstrisi için faydalı ve güçlü bir teknolojidir. Bu topolojide bozulmaya neden olan mikroorganizmalar dahil olmak üzere toplam bakteri yüküne yetecek düzeyde reaktif oksijen (ROS) türlerini içermektedir. Bu, sistemin gıda dekontaminasyonu açısından en büyük avantajıdır (Butscher vd. 2016, Sohbatzadeh vd. 2016, Choi vd. 2017, Jung vd. 2017, Min vd. 2017). Soğuk plazma sistemi, mayaların, küflerin, virüslerin ve dekontamine edilmesinde etkilidir (Mısra vd. 2011, Rod vd. 2012). Etki şekli uygulanan soğuk plazma yöntemine ve bakteri türüne göre değişmektedir. Farklı yağ oranları içeren çiğ sütlerde düşük sıcaklıkta uygulanan plazma teknolojisi ile *Escherichia coli*'yi inhibe etme yeteneğini araştırmıştır. Tam yağlı süt, yarım yağlı süt ve yağsız sütte bulunan *E. coli* test edilmiştir. Farklı zaman aralıklarında uygulanan plazma tekniğinin total *E. coli* düzeylerindeki T oranını azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca bu tekniğin çiğ sütün rengi, pH'ı gibi parametrelerde önemli değişikliklere yol açmadığı gözlenmiştir (Gürol vd. 2012). Et ve et ürünleri üzerinde yapılan çalışmalarda plazmanın bakteri ve virüslere karşı etkili olduğu tespit edilmiştir (Kim vd. 2013).

2.4.4. Endüstri

Ozon üretimi, kirleticilerin uzaklaştırılması, Excimer UV lambaları, CO₂ lazerleri, plazma ekran panelleri gibi endüstriyel uygulamalarda ısılanmayı, basılabilirliği ve yapışmayı iyileştirmek için polimer yüzey işleminde de kullanılır (Kogelschatz 1997).

Uyarıcıların oluşumuna dayanan ve kendiliğinden emisyon kaynağı olan Excimer lambası, dielektrik bariyer deşarjı ile oluşturulabilir. Burada, uyarılmış molekül, normal fiziksel koşullar altında zeminde kararlı bir elektronik durumu olmayan bir molekülün uyarılmış halindedir. Uyarılmış molekül oluşuktan sonra nanosaniyeler içinde ayrışır ve UV fotonları biçiminde uyarma enerjisi açığa çıkarır (Zhang ve Boyd 1998).

Plazma aktif uçları ile aşındırabilir, temizleyebilir, implante edebilir ve tekstil yüzeyi üzerine fonksiyonel bir ince film kaplayabilir. Plazmanın benzersiz özellikleri tekstil endüstrisinde birçok fonksiyonel prosese yol açmaktadır. Bunlardan bazıları; gravür, temizlik, aktif uçların implantasyonu, yüzey üzerinde işlevsel bir ince film kaplama prosesleridir (Shishoo 2007).

Tekstillerin plazmayla işlenmesi ve bu alandaki araştırmalar, ancak soğuk plazma sistemlerinin ortaya çıkmasından sonra ele alınmaya başlanmış ve bunların geçmişi yalnızca birkaç yıl öncesine dayanmaktadır. Plazma işlemi, tekstil yüzeyinde yalnızca birkaç nanometre derinlikte büyük kimyasal ve fiziksel değişikliklere neden olmaktadır.

2.5 Güç Topolojileri

Güç topolojisi, bir güç sistemi içindeki bileşenlerin çeşitli konfigürasyonlarını ve düzenlemelerini ifade eder. Bu topolojiler, enerjinin sistem içinde nasıl dağıtıldığını ve organize edildiğini belirler. Yaygın olarak kullanılan bir güç kaynağı topolojisi, fazla gücü ısı olarak dağıtarak kararlı bir çıkış gerilimi sağlayan doğrusal regülatördür. Bu topoloji basit ve güvenilir olmasına rağmen enerjiyi ısı şeklinde israf ettiği için pek verimli değildir.

Diğer bir güç topolojisi, doğrusal regülatörden daha verimli olan anahtarlama regülatörüdür. Akım akışını kontrol etmek ve çıkış gerilimini ayarlamak için bir anahtarlama mekanizması kullanılır. Bu topoloji genellikle pille çalışan cihazlar gibi yüksek verimlilik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Ancak anahtarlama regülatörler çıkış geriliminde gürültü ve dalgalanma yaratabilir ve ek filtre bileşenleri gerektirebilir.

Diğer güç kaynağı topolojileri, her birinin kendi avantaj ve dezavantajlarına sahip olan buck dönüştürücüleri, boost dönüştürücüleri ve flyback dönüştürücüleri içerir.

Bu topolojiler belirli gerilim regülasyonunu, akım taşıma kapasitesini ve verimlilik gereksinimlerini karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Güç topolojisi, güç sistemlerinin tasarımında ve işletilmesinde önemli bir rol oynar. Enerji kaybını en aza indirirken yükün gerekli gerilim ve akım seviyelerinde beslenmesini sağlar. İzolesiz ve izoleli anahtarlama güç kaynakları için birçok topoloji bulunur.

2.5.1 İzolesiz Anahtarlama Güç Kaynakları

Giriş ve çıkış devreleri arasında elektriksel izolasyon sağlamayan bir güç kaynağı türüdür. Bu, giriş ve çıkış gerilimlerinin ortak bir zemini paylaştığı anlamına gelir; bu, izolasyonun gerekli olmadığı bazı uygulamalarda avantajlı olabilir. İzolesiz anahtarlama güç kaynakları genellikle maliyet, boyut ve verimliliğin önemli faktörler olduğu düşük güçlü uygulamalarda kullanılır.

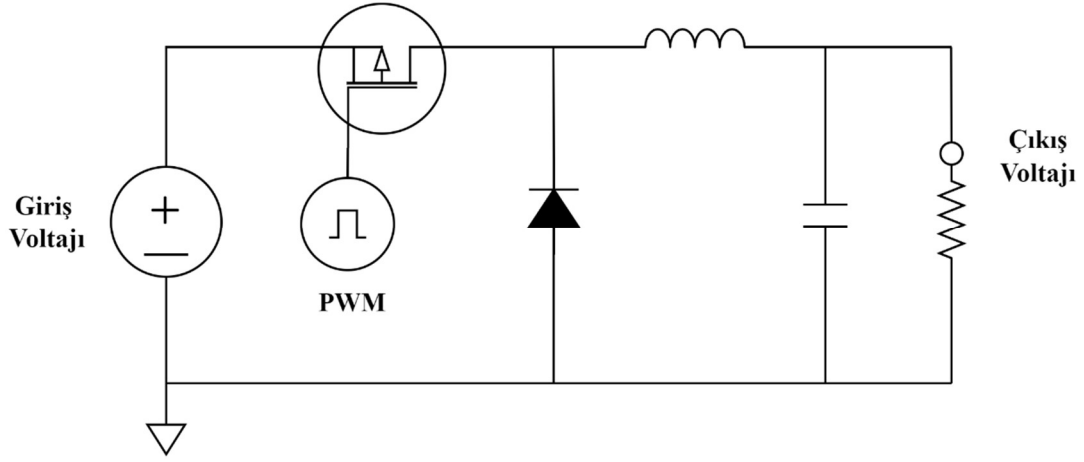
2.5.1.1 Alçaltıcı (Buck) Dönüştürücü

Daha yüksek bir gerilim seviyesini daha düşük bir gerilim seviyesine dönüştürmek için kullanılan elektronik bir cihazdır. Güç kaynakları, pil şarj cihazları ve elektronik cihazlar gibi daha düşük geriliminin gerekli olduğu çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Alçaltıcı dönüştürücünün temel amacı, gerilimi verimli bir şekilde düzenlemek ve giriş geriliminden daha düşük kararlı bir çıkış gerilimi sağlamaktır. Alçaltıcı dönüştürücü, bir indüktörden geçen akımın akışını kontrol eden bir anahtarlama regülatör devresi kullanılarak çalışır. Giriş gerilimini yüksek frekansta açılıp kapatıldığı darbe genişlik modülasyonu (PWM) prensibiyle çalışır.

Bu anahtarlama işlemi, dönüştürücünün, anahtarlama sinyalinin görev döngüsünü ayarlayarak çıkış gerilimini düzenlemesine olanak tanır. Düşürücü dönüştürücü, görev döngüsünü kontrol ederek, yüksek giriş gerilimini verimli bir şekilde daha düşük bir çıkış gerilimine dönüştürebilir.

Alçaltıcı dönüştürücünün en önemli avantajlarından biri yüksek verimliliğidir. Aşırı gerilimi ısı olarak dağıtan doğrusal regülatörlerin aksine, düşürücü dönüştürücüler güç kaybını en aza indirmek için anahtarlama tekniklerini kullanır. Bu, onları daha enerji verimli hale getirir ve güç verimliliğinin çok önemli olduğu uygulamalar için uygun hale getirir. Ek olarak, düşürücü dönüştürücüler kompakt boyutlu ve hafiftir, bu da onları taşınabilir elektronik cihazlar için ideal kılar.

Genel olarak, alçaltıcı dönüştürücü, gerilim dönüşümü için güvenilir ve verimli bir çözüm sağlayarak çeşitli endüstrilerde hayati bir rol oynar.



Şekil 2.11 Alçaltıcı dönüştürücü örnek devre şeması.

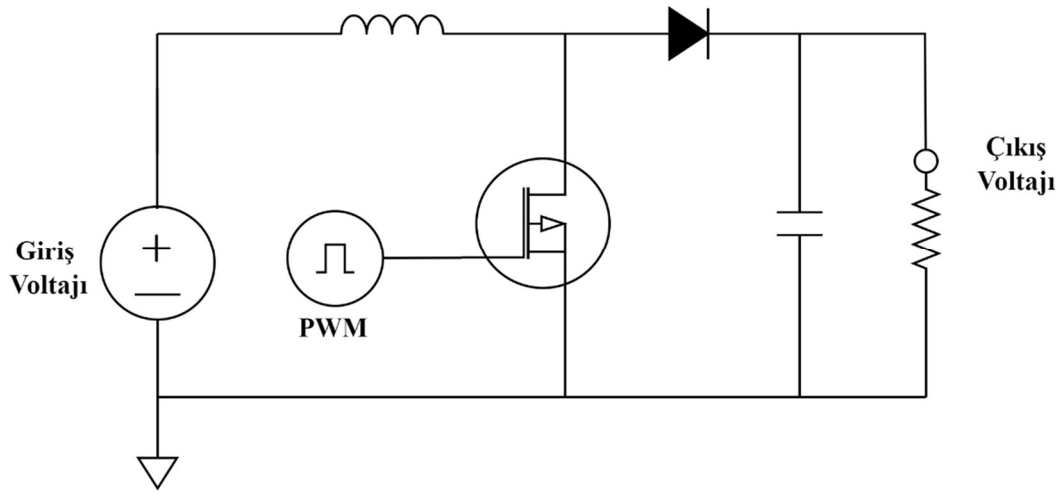
2.5.1.2 Yükseltici (Boost) Dönüştürücü

Giriş DC güç kaynağının gerilim seviyesini daha yüksek bir çıkış gerilimine yükselten bir DC-DC dönüştürücü türüdür. Pille çalışan cihazlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve elektronik cihazlar için güç kaynakları gibi daha yüksek gerilimin gerekli olduğu çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Yükseltici dönüştürücü, bir indüktör, bir diyot, bir kapasitör ve bir anahtar kullanılarak çalışır. Anahtar kapatıldığında indüktör giriş kaynağından gelen enerjiyi depolar. Anahtar açıldığında depolanan enerji diyot ve kapasitör aracılığıyla çıkış yüküne aktarılır. Bu işlem çıkış geriliminin giriş geriliminden daha yüksek olmasını sağlar.

Yükseltici dönüştürücünün avantajlarından biri, gerilim seviyesini verimli bir şekilde yükseltme yeteneğidir. Minimum güç kaybıyla yüksek gerilim dönüşüm oranlarına ulaşabilir. Ek olarak yükseltici dönüştürücü, giriş gerilimi değiştiğinde bile düzenlenmiş bir çıkış gerilimi sağlayabilir. Bu, LED aydınlatma sistemleri veya düşük akü gerilimiyle çalışan taşınabilir elektronik cihazlar gibi sabit ve daha yüksek gerilimin gerekli olduğu uygulamalar için uygun olmasını sağlar.

Genel olarak, yükseltici dönüştürücü, verimli gerilim dönüşümü sağlayarak ve güvenilir güç kaynağı sağlayarak çeşitli endüstrilerde önemli bir rol oynar.



Şekil 2.12 Yükseltici dönüştürücü örnek devre şeması.

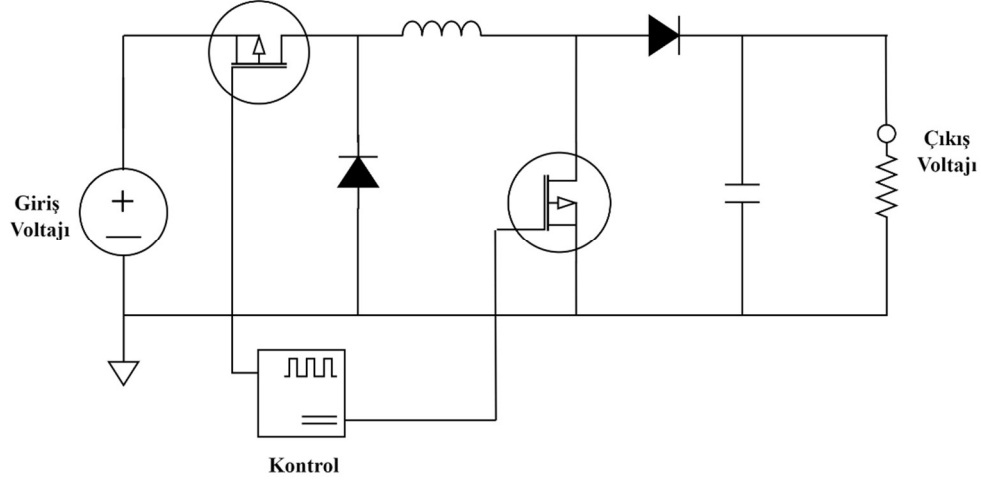
2.5.1.3 Alçaltıcı-Yükseltici (Buck-Boost) Dönüştürücü

Alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü, bir DC güç kaynağının gerilim seviyesini artırabilen veya azaltabilen bir tür DC-DC dönüştürücüdür. Bu tip dönüştürücü çok yönlüdür ve giriş geriliminin değişebileceği çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü, çıkış gerilimini istenen seviyeye ayarlayabilmesi, onu güç elektroniğinde popüler bir seçim haline getiriyor.

Alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü, çıkış gerilimi ayarlamak için bir anahtarın görev döngüsünü kontrol ederek çalışır. Giriş gerilimi çıkış geriliminden yüksek olduğunda, dönüştürücü gerilimi düşürerek alçaltıcı modunda çalışır. Tersine, giriş gerilimi çıkış geriliminden düşük olduğunda, dönüştürücü gerilimi artırarak yükseltici modunda çalışır. Bu esneklik, alçaltıcı-yükseltici dönüştürücünün, giriş gerilimini dalgalanmalarından bağımsız olarak çıkış gerilimini verimli bir şekilde düzenlemesine olanak tanır.

Özetle, alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü, gerilim seviyesini gerektiği gibi artırma veya azaltma yeteneğinden dolayı güç elektroniğinde çok önemli bir bileşendir. Çok yönlülüğü ve verimliliği, sabit bir çıkış geriliminin gerekli olduğu çeşitli uygulamalar için onu popüler bir seçim haline getiriyor. Alçaltıcı-yükseltici dönüştürücü, anahtarın görev

döngüsünü kontrol ederek çıkış gerilimini etkili bir şekilde düzenleyebilir ve bu da onu modern elektronik tasarımında önemli bir araç haline getirir.



Şekil 2.13 Alçaltıcı-Yükseltici dönüştürücü örnek devre şeması.

2.5.2 İzoleli Anahtarlama Güç Kaynakları

Bağımsız olarak veya diğer elektrik sistemlerinden ayrı olarak çalışacak şekilde tasarlanan anahtarlama güç kaynaklarına genellikle izole anahtarlama güç kaynakları denir. Bu güç kaynakları, güvenliğini sağlamak ve farklı devreler veya sistemler arasındaki paraziti önlemek için elektriksel izolasyonun gerekli olduğu çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

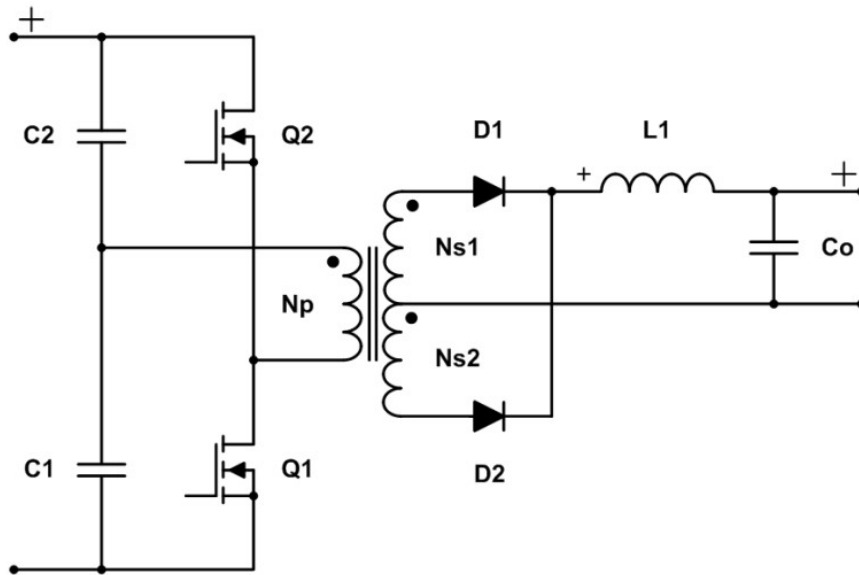
İzoleli anahtarlama güç kaynakları, güç kaynağının giriş ve çıkış tarafları arasında yüksek düzeyde izolasyonu korurken düzenlenmiş bir çıkış gerilimi veya akımı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. İzoleli anahtarlama güç kaynakları, giriş ve çıkış tarafları arasında elektriksel izolasyon sağlayan bir güç kaynağıdır. Bu izolasyon, iki taraf arasında doğrudan elektrik temasını önleyen transformatörler veya diğer izolasyon teknikleri kullanılarak elde edilir. Bu güç kaynakları genellikle tıbbi cihazlar, endüstriyel ekipmanlar ve telekomünikasyon sistemleri gibi güvenliğin önemli olduğu uygulamalarda kullanılır. Bu güç kaynakları izolasyon sağlayarak hassas bileşenlerin ve devrelerin elektriksel gürültüden, gerilim yükselmelerinden ve diğer potansiyel tehlikelerden korunmasına yardımcı olur.

2.5.2.1 Yarım Köprü (Half Bridge) Dönüştürücü

Yarım köprü dönüştürücü, invertör sistemleri, motor sürücüleri ve güç kaynakları gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir tür güç elektroniği devresidir. Merkezi uçlu bir transformatör veya bir indüktör ile seri olarak bağlanan, genellikle MOSFET'ler veya IGBT'ler olmak üzere iki anahtardan oluşan bir konfigürasyondur.

Yarım köprü dönüştürücünün çalışması, iki anahtarın tamamlayıcı bir şekilde anahtarlanması içerir. Bir anahtar açıldığında diğer anahtar kapatılır ve bunun tersi de geçerlidir. Bu anahtarlama işlemi, dönüştürücünün giriş DC gerilimini ayarlanabilir frekans ve büyüklükte bir AC gerilimine dönüştürmesine olanak tanır.

Yarım köprü dönüştürücünün avantajlarından biri de diğer tek anahtarlı dönüştürücülere göre daha yüksek çıkış gücü sağlayabilmesidir. Bunun nedeni, iki anahtarın ayrı ayrı daha yüksek akımları işleyebilmesi ve bunun sonucunda daha yüksek bir genel güç işleme kapasitesi sağlamasıdır. Ek olarak yarım köprü dönüştürücü, aynı anda yalnızca bir anahtar akımı ilettiği için tam köprü dönüştürücülere kıyasla daha iyi verimlilik ve daha düşük kayıplar sunar. Bununla birlikte, yarım köprü dönüştürücünün değişken bir güç kaynağı gerektirdiğini ve bunun da sistem tasarımına karmaşıklık katabileceğini unutmamak önemlidir.



Şekil 2.14 Yarım köprü dönüştürücü örnek devre şeması.

Yarım köprü dönüştürücünün sürekli ve süreksiz iletim modunda oluşan denklemler Çizelge 2.4 ve Çizelge 2.5'te verilmiştir. Denklemlerde belirtilen ifadeler aşağıda yer almaktadır.

$$\text{FET açık kalma süresi} = t_1$$

$$\text{FET kapalı kalma süresi} = t_2$$

$$\text{Giriş gerilimi} = V_{in}$$

$$\text{Çıkış gerilimi} = V_{out}$$

$$\text{Anahtarlama frekansı} = f_{switch}$$

$$\text{Birincil indüktör} = N_p$$

$$\text{İkincil indüktör} = N_s$$

$$\text{Manyetik akım} = I_{mag}$$

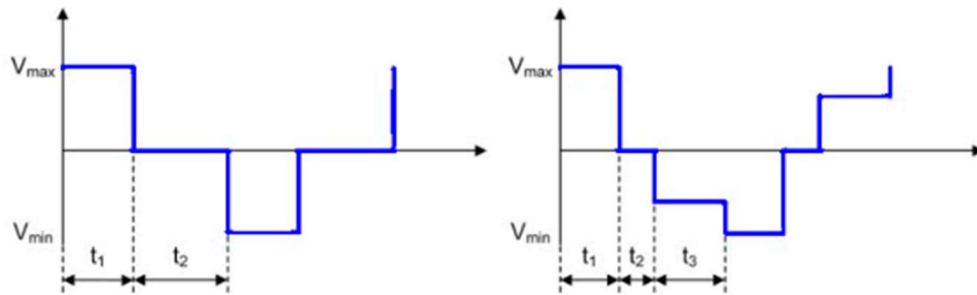
$$\text{Dalgalanma akımı} = I_{ripple}$$

Çizelge 2.4 Yarım Köprü - Sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.

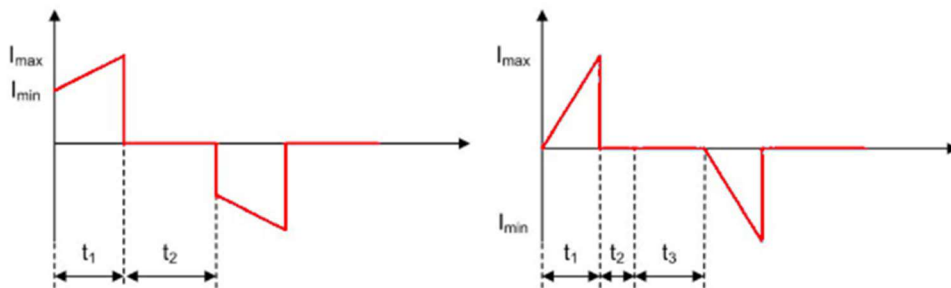
Açıklama	Denklem
FET açık, artan akımı:	$t_1 = \frac{1}{f_{switch}} \cdot \frac{(V_{out} + V_f)}{V_{in} \cdot \frac{n_p}{n_s}}$
FET kapalı, azalan akım:	$t_2 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} - t_1$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = I_{sec,min} \cdot \frac{n_s}{n_p} - \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{sec,max} \cdot \frac{n_s}{n_p} + \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = I_{out} - \left(\frac{1}{2} \cdot I_{ripple} \right)$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = I_{out} + \left(\frac{1}{2} \cdot I_{ripple} \right)$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$

Çizelge 2.5 Yarım Köprü - Süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.

Açıklama	Denklem
FET açık, artan akımı:	$t_1 = \sqrt{2 \cdot I_{out} \cdot L_1 \cdot \frac{(V_{out} + V_f)}{2 \cdot f_{switch} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p} - v_f - v_{out}\right) \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p}\right)}}$
FET kapalı, azalan akım:	$t_2 = t_1 \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p}}{(V_{out} + V_f)} - t_1$
FET kapalı, demanyetizasyon:	$t_3 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} - t_1 - t_2$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = 0A$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{sec,max} \cdot \frac{n_p}{n_s} + \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = 0A$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = I_{ripple}$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$



Şekil 2.15 Yarım Köprü – CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) gerilim dalga formları.



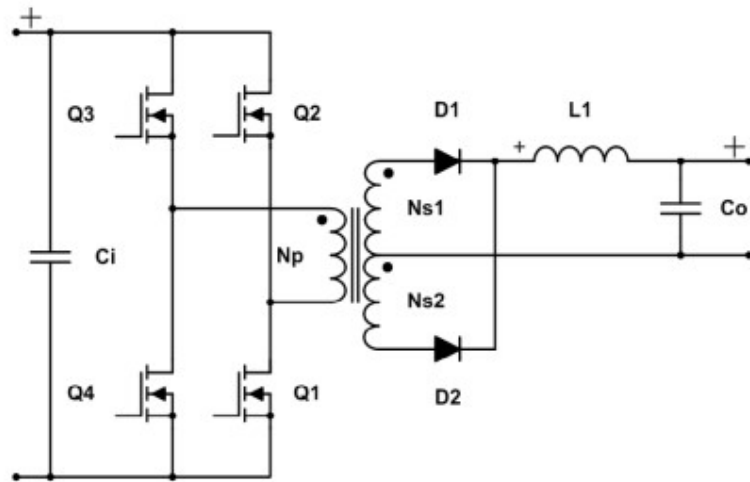
Şekil 2.16 Yarım Köprü – CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) akım dalga formları.

2.5.2.2 Tam Köprü (Full Bridge) Dönüştürücü

Tam köprü dönüştürücü, motor sürücüleri, yenilenebilir enerji sistemleri ve güç kaynakları gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir tür güç elektroniği devresidir. Bu dönüştürücü, çift yönlü güç akışına ve verimli gerilim dönüşümüne olanak tanıyan, köprü konfigürasyonunda düzenlenmiş dört anahtardan oluşur. Bu topolojiyi kullanarak tam köprü dönüştürücü, yüksek güç yoğunluğu ve çıkış gerilimi ve akımı üzerinde gelişmiş kontrol sağlayabilir.

Bir tam köprü dönüştürücüde, anahtarlar tipik olarak çıkış gerilimini ve frekansını düzenlemek için darbe genişliği modülasyonu (PWM) teknikleri kullanılarak kontrol edilir. Bu, uygulama gereksinimlerine bağlı olarak dönüştürücünün verimli bir şekilde DC gücünü AC gücüne veya tam tersine dönüştürmesini sağlar. Tam köprü dönüştürücü, yüksek güç seviyelerini idare etme ve zorlu ortamlarda güvenilir çalışma sağlama yeteneğiyle bilinir.

Tam köprü dönüştürücünün en önemli avantajlarından biri, yüksek verimlilik seviyelerine ulaşma yeteneğidir, bu da onu enerji tasarrufunun çok önemli olduğu uygulamalar için popüler bir seçim haline getirir. Ek olarak tam köprü dönüştürücü, gerilim ve akım değerleri açısından esneklik sunarak belirli sistem gereksinimlerine göre özelleştirmeye olanak tanır. Genel olarak, tam köprü dönüştürücü, modern enerji dönüşüm sistemlerinde hayati bir rol oynayan çok yönlü ve güvenilir bir güç elektroniği devresidir.



Şekil 2.17 Tam köprü dönüştürücü örnek devre şeması.

Tam köprü dönüştürücünün sürekli ve süreksiz iletim modunda oluşan denklemler Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7’de verilmiştir. Denklemlerde belirtilen ifadeler aşağıda yer almaktadır.

$$\text{FET açık kalma süresi} = t_1$$

$$\text{FET kapalı kalma süresi} = t_2$$

$$\text{Giriş gerilimi} = V_{in}$$

$$\text{Çıkış gerilimi} = V_{out}$$

$$\text{Anahtarlama frekansı} = f_{switch}$$

$$\text{Birincil indüktör} = N_p$$

$$\text{İkincil indüktör} = N_s$$

$$\text{Manyetik akım} = I_{mag}$$

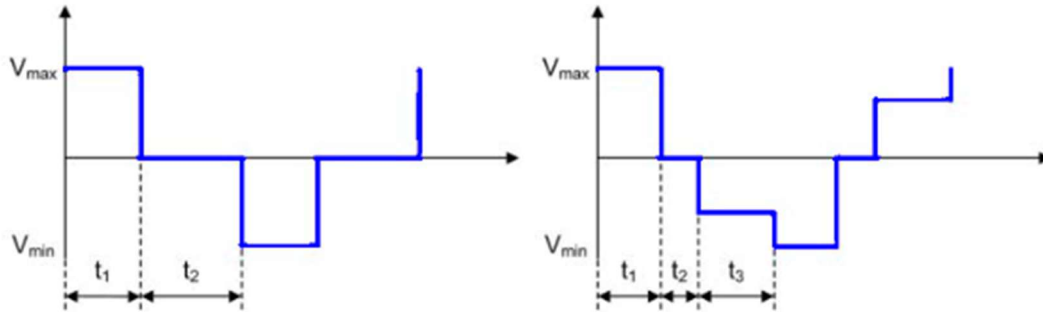
$$\text{Dalgalanma akımı} = I_{ripple}$$

Çizelge 2.6 Tam Köprü - Sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.

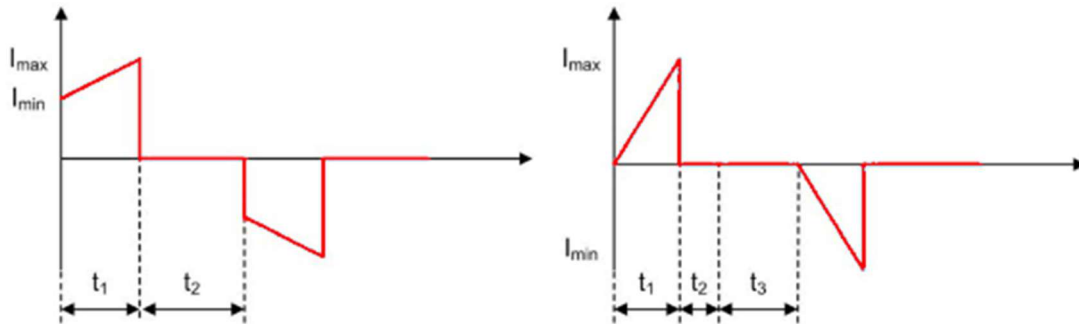
Açıklama	Denklem
FETler açık, artan akımı:	$t_1 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} \cdot \frac{(V_{out} + V_f)}{V_{in} \cdot \frac{n_p}{n_s}}$
FETler kapalı, azalan akım:	$t_2 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} - t_1$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = I_{sec,min} \cdot \frac{n_s}{n_p} - \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{sec,max} \cdot \frac{n_s}{n_p} + \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = I_{out} - \left(\frac{1}{2} \cdot I_{ripple} \right)$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = I_{out} + \left(\frac{1}{2} \cdot I_{ripple} \right)$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$

Çizelge 2.7 Tam Köprü - Süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.

Açıklama	Denklem
FETler açık, artan akımı:	$t_1 = \sqrt{2 \cdot I_{out} \cdot L_1 \cdot \frac{(V_{out} + V_f)}{2 \cdot f_{switch} \cdot \left(V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p} - v_f - v_{out}\right) \cdot \left(V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p}\right)}}$
FETler kapalı, azalan akım:	$t_2 = t_1 \cdot \frac{V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p}}{(V_{out} + V_f)} - t_1$
FETler kapalı, demanyetizasyon:	$t_3 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} - t_1 - t_2$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = 0A$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{sec,max} \cdot \frac{n_p}{n_s} + \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = 0A$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = I_{ripple}$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$



Şekil 2.18 Tam Köprü-CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) gerilim dalga formları.

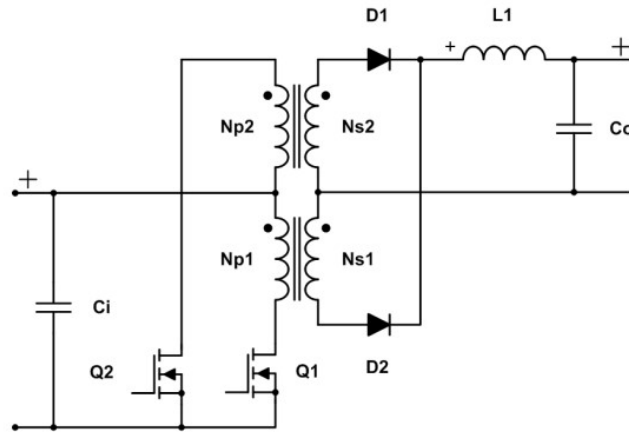


Şekil 2.19 Tam Köprü-CCM ve DCM modunda birincil yan indüktör (N_p) akım dalga formları.

2.5.2.3 İtme-Çekme (Push-Pull) Dönüştürücü

Push-pull dönüştürücü, güç kaynağı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir elektronik devre türüdür. DC gücünü, pil veya redresör gibi bir kaynaktan farklı bir gerilim seviyesindeki AC gücüne verimli bir şekilde dönüştürmek için tasarlanmıştır. Dönüştürücü, dönüşümlü olarak açılıp kapanan bir çift transistör kullanarak çalışır ve gücü bir çıkış transformatörü üzerinden yönlendiren bir itme-çekme hareketi yaratır.

Push-pull dönüştürücü, diğer dönüştürücü türlerine göre çeşitli avantajlar sunar. İlk olarak, harmonik bozulma miktarını azaltan ve sistemin genel verimliliğini artıran dengeli bir çıkış dalga biçimi sağlar. İkincisi, transistörlerin paralel çalışması nedeniyle daha yüksek güç seviyelerine ulaşılmasına olanak tanır. Bu, onu yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik invertör sistemleri gibi yüksek güç çıkışı gerektiren uygulamalar için uygun hale getirir. Ek olarak, push-pull dönüştürücünün giriş ve çıkış devreleri arasında galvanik izolasyon sağlama yeteneği ile bilinir. Bu, hassas elektronik bileşenleri gerilim yükselmelerinden veya giriş gücündeki diğer bozulmalardan koruyabileceği anlamına gelir. Ayrıca dönüştürücü, geri besleme mekanizmaları kullanılarak kolayca kontrol edilebilir ve düzenlenebilir, bu da çıkış geriliminin ve akımının hassas kontrolüne olanak tanır. Genel olarak itme-çekme dönüştürücü, güç dönüştürme uygulamaları için çok yönlü ve verimli bir çözümdür; dengeli çıkış dalga biçimi, yüksek güç kapasitesi, galvanik izolasyon ve hassas kontrol gibi avantajlar sunar.



Şekil 2.20 Push-pull dönüştürücü örnek devre şeması.

İtme-çekme dönüştürücünün sürekli ve süreksiz iletim modunda oluşan denklemler Çizelge 2.8 ve Çizelge 2.9’da verilmiştir. Denklemlerde belirtilen ifadeler aşağıda yer almaktadır.

FET açık kalma süresi = t_1

FET kapalı kalma süresi = t_2

Giriş gerilimi = V_{in}

Çıkış gerilimi = V_{out}

Anahtarlama frekansı = f_{switch}

Birincil indüktör = N_p

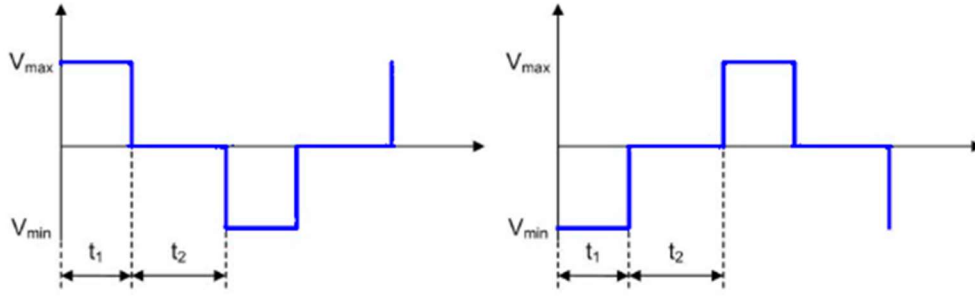
İkincil indüktör = N_s

Manyetik akım = I_{mag}

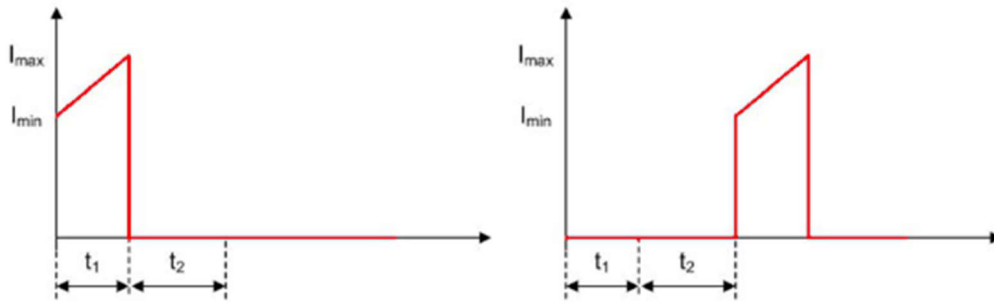
Dalgalanma akımı = I_{ripple}

Çizelge 2.8 Push-pull dönüştürücü sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.

Açıklama	Denklem
FET açık, artan akımı:	$t_1 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} \cdot \frac{(V_{out} + V_f)}{V_{in} \cdot \frac{n_p}{n_s}}$
FET kapalı, azalan akım:	$t_2 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} - t_1$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = I_{sec,min} \cdot \frac{n_s}{n_p} - \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{sec,max} \cdot \frac{n_s}{n_p} + \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = I_{out} - \left(\frac{1}{2} \cdot I_{ripple} \right)$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = I_{out} + \left(\frac{1}{2} \cdot I_{ripple} \right)$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$



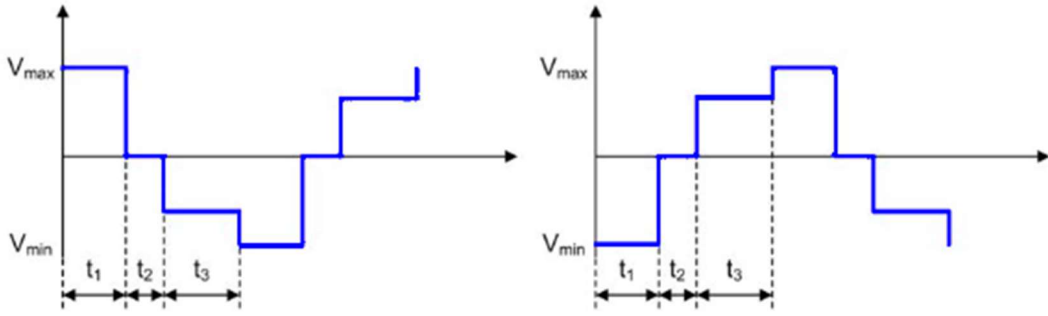
Şekil 2.21 Push-pull CCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) gerilim dalga formları.



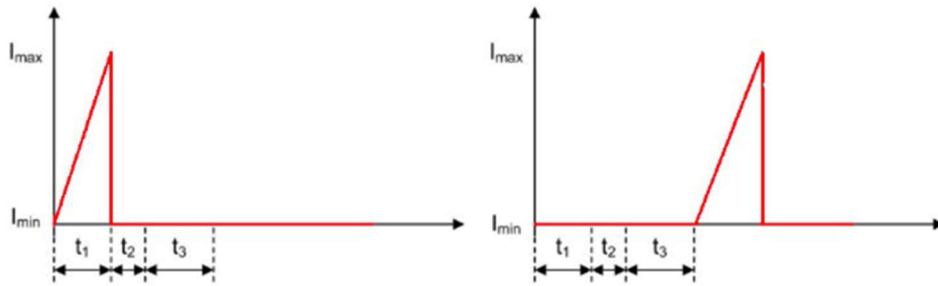
Şekil 2.22 Push-pull CCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) akım dalga formları.

Çizelge 2.9 Push-pull dönüştürücü süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.

Açıklama	Denklem
FET açık, artan akımı:	$t_1 = \sqrt{2 \cdot I_{out} \cdot L_1 \cdot \frac{(V_{out} + V_f)}{2 \cdot f_{switch} \cdot \left(V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p} - v_f - v_{out}\right) \cdot \left(V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p}\right)}}$
FET kapalı, azalan akım:	$t_2 = t_1 \cdot \frac{V_{in} \cdot \frac{n_s}{n_p}}{(V_{out} + V_f)} - t_1$
FET kapalı, demanyetizasyon:	$t_3 = \frac{1}{2 \cdot f_{switch}} - t_1 - t_2$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = 0A$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{sec,max} \cdot \frac{n_p}{n_s} + \frac{1}{2} \cdot I_{mag}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = 0A$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = I_{ripple}$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$



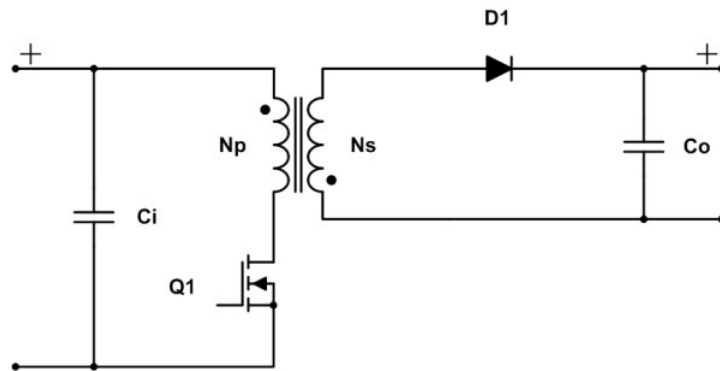
Şekil 2.23 Push-pull DCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) gerilim dalga formları.



Şekil 2.24 Push-pull DCM modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) ve ikincil yan indüktör (N_{p2}) akım dalga formları.

2.5.2.4 Flyback Dönüştürücü

Bir flyback regülatörü, bir giriş gerilimini daha yüksek veya daha düşük, pozitif veya negatif çıkış gerilim seviyesine dönüştürür. Flyback topolojisinde enerji, anahtarlama çevriminin ilk yarısında transformatörün manyetik alanında depolanır ve daha sonra çevrimin ikinci yarısında yüke bağlı sekonder sargıya verilir.



Şekil 2.25 Flyback dönüştürücü örnek devre şeması.

Flyback dönüştürücüde en yaygın kullanılan anahtar bir MOSFET'tir (Q1), ancak bazen bipolar transistörler kullanılır ve bazen GaN (galyum nitrür) veya SiC (silisyum karbür) transistörler kullanılabilir. Geri dönüş denetleyicisi, gerekli çıkış gerilimini elde etmek için uygun görev döngüsüyle anahtarı açar ve kapatır başka bir deyişle PWM uygulanır. Flyback transformatörlerinin görev döngüsü (duty oranı) genellikle %50 'yi geçmemektedir. Aşağıdaki denkleme göre gerekli çıkış gerilimini elde etmek için çeşitli dönüş oranı ve görev döngüsü kombinasyonları kullanılabilir:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{N_s}{N_p} \cdot \left(\frac{D}{1-D} \right) \quad (3.1)$$

Çıkış gerilimi = V_{out}

Giriş gerilimi = V_{in}

İkincil döngü = N_s

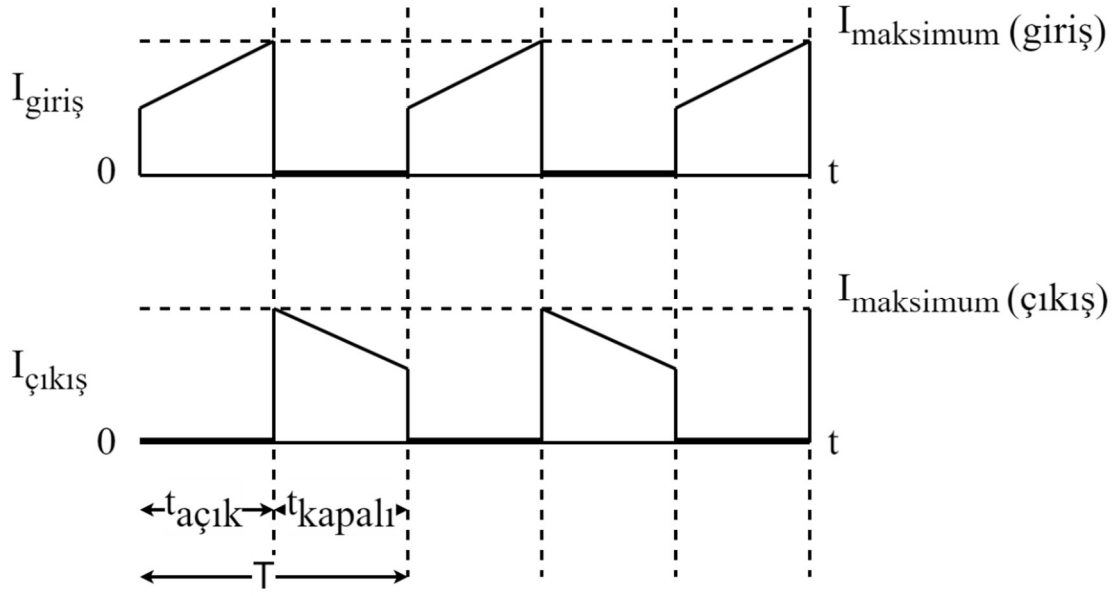
Birincil döngü = N_p

Görev döngüsü = $D = t_{on} / (t_{on} + t_{off})$

Temel flyback döngüsü aşağıdaki parçalardan oluşur:

- FET (Alan Etkili Transistör) AÇIK, konuma getirildiğinde, transformatörün birincil sargısından akım akar. Bu, enerjinin çekirdekte depolandığı bir manyetik alan yaratır. Sargı polaritesinin kombinasyonu, anahtar KAPALI durumda ikincil (yük) enerjisinin aktarılmamasını sağlamak için çıkış diyotunu tersine çevirir. Döngünün bu kısmı sırasında, birincil bobindeki akım, enerjiyi depolamak için zamanla artar.
- KAPALI konuma getirildiğinde manyetik alan çöker ve depolanan enerji sekonder sargıya ve sonuçta yüke aktarılır. Anahtar kapatıldığında, depolanan enerji yüke aktarıldığından ikincil tepe akımı azalacaktır.

Geri besleme enerjisinin tamamı sekonder sargıya aktarılmadan önce FET tekrar açılırsa sekonder akım hiçbir zaman sıfıra ulaşmayacaktır. Buna sürekli iletim modu (CCM) adı verilir.



Şekil 2.26 Flyback CCM dalga formu örneği.

Flyback dönüştürücünün sürekli, süreksiz ve geçiş modunda oluşan denklemler Çizelge 2.10, Çizelge 2.11 ve Çizelge 2.12’de verilmiştir. Denklemlerde belirtilen ifadeler aşağıda yer almaktadır.

FET açık kalma süresi = t_1

FET kapalı kalma süresi = t_2

Giriş gerilimi = V_{in}

Çıkış gerilimi = V_{out}

Çıkış akımı = I_{out}

Anahtarlama frekansı = f_{switch}

Birincil indüktör = N_p

İkincil indüktör = N_s

Birincil akım = I_{pri}

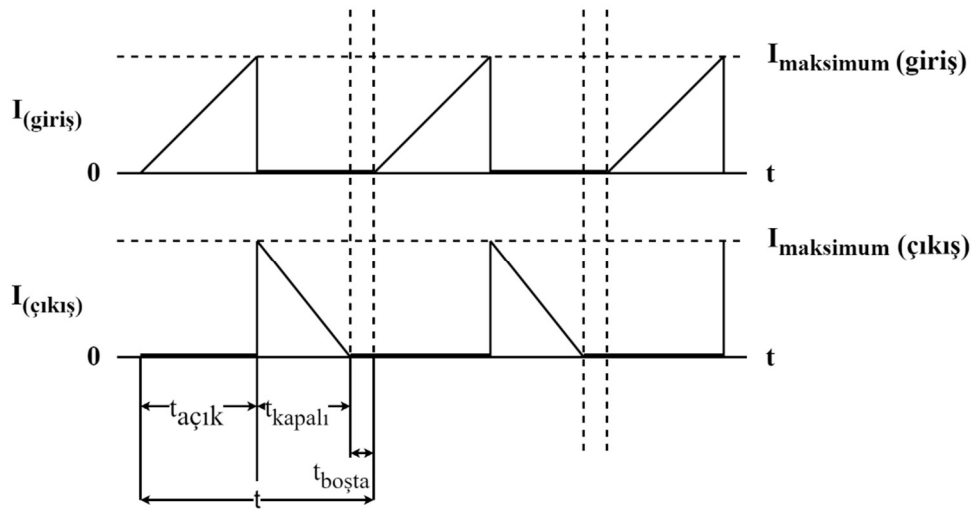
İkincil akım = I_{sec}

Dalgalanma akımı = I_{ripple}

Çizelge 2.10 Flyback - Sürekli iletim modundaki (CCM) denklemler.

Açıklama	Denklem
FET açık, artan akımı:	$t_1 = \frac{1}{f_{switch}} \cdot (V_{out} + V_f) \cdot \frac{\frac{n_p}{n_s}}{V_{in} + (V_{out} + V_f) \cdot \frac{n_p}{n_s}}$
FET kapalı, azalan akım:	$t_2 = \frac{1}{f_{switch}} - t_1$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in} \cdot f_{switch} \cdot t_1} - \frac{1}{2} \cdot I_{ripple}$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{pri,min} + I_{ripple}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = I_{pri,min} \cdot \frac{n_p}{n_s}$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = (I_{pri,min} + I_{ripple}) \cdot \frac{n_p}{n_s}$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$

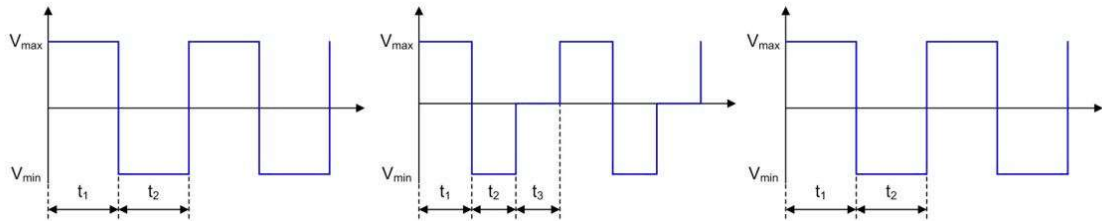
FET tekrar açılmadan önce depolanan geri besleme enerjisi tamamen sekondere boşaltılırsa, sekonder akım döngünün bitiminden önce sıfır olacak ve döngü sırasında "boş zaman" (t_{idle}) yaratacaktır buna süreksiz iletim modu (DCM) denir.



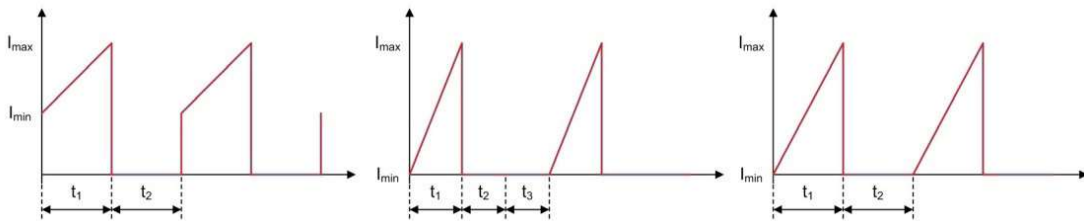
Şekil 2.27 Flyback DCM dalga formu örneği.

Çizelge 2.11 Flyback - Süreksiz iletim modundaki (DCM) denklemler.

Açıklama	Denklem
FET açık, artan akımı:	$t_1 = \sqrt{2 \cdot I_{out} \cdot L_p \cdot \frac{(V_{out} + V_f)}{f_{switch} \cdot V_{in}^2}}$
FET kapalı, azalan akım:	$t_2 = t_1 \cdot \frac{V_{in} + (V_{out} + V_f) \cdot \frac{n_p}{n_s}}{(V_{out} + V_f) \cdot \frac{n_p}{n_s}} - t_1$
FET kapalı, akım yok:	$t_3 = \frac{1}{f_{switch}} - t_1 - t_2$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = 0A$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{ripple}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = 0A$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = (I_{pri,max}) \cdot \frac{n_p}{n_s}$
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$



Şekil 2.28 Flyback - CCM, DCM ve Geçiş modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) gerilim dalga formları.



Şekil 2.29 Flyback - CCM, DCM ve Geçiş modunda birincil yan indüktör (N_{p1}) akım dalga formları.

Çizelge 2.12 Flyback - Geçiş modundaki denklemler.

Açıklama	Denklem
Ortalama giriş akımı:	$I_{in,avg} = \frac{(V_{out} + V_f) \cdot I_{out}}{V_{in}}$
Anahtarlama frekansı:	$f_{switch,transition} = \frac{V_{in}}{2 \cdot \left(\frac{\sqrt[2]{8} \cdot V_{in}}{\frac{n_p}{n_s} \cdot \pi \cdot V_{out}} + 1 \right)^2 \cdot I_{in} \cdot L_p}$
FET açık, artan akımı:	$t_1 = \frac{2 \cdot I_{in,avg} \cdot L_p}{v_{in}} \cdot \left \frac{\sqrt[2]{8} \cdot V_{in}}{\frac{n_p}{n_s} \cdot \pi \cdot V_{out}} + 1 \right $
FET kapalı, azalan akım:	$t_2 = \frac{1}{f_{switch,transition}} - t_1$
Minimum birincil akım:	$I_{pri,min} = 0A$
Maksimum birincil akım:	$I_{pri,max} = I_{ripple}$
Minimum ikincil akım:	$I_{sec,min} = 0A$
Maximum ikincil akım:	$I_{sec,max} = (I_{pri,max}) \cdot \frac{n_p}{n_s}$

Transformatör CCM, DCM veya her ikisi için tasarlanabilir. Flyback transformatörleri giriş gerilimi ve yük koşullarına bağlı olarak CCM ve DCM modlarında çalışabilir.

Uygulamanız için beklenen tepe birincil akımından çok daha yüksek olan birincil akım tepe noktasına (I_{pk}) veya birincil doyma akımına (I_{sat}) sahip bir transformatör seçmeniz gerekir. Uygulamanın en yüksek birincil akım tüketimi transformatörün değerini aşarsa çekirdek doyması birincil endüktansın düşmesine neden olur, yükün artık daha fazla enerjiye ihtiyacı varsa transformatörün enerji depolama kapasitesi aşılacak ve yük gerekli enerjiyi alamayacaktır.

Bu, düzenleme kaybına yol açacağından, geri dönüş transformatörünün maksimum birincil akımı (I_{pk}) veya birincil doyma akımı (I_{sat}) önemli bir parametredir.

Flyback dönüştürücünün genel özellikleri şunlardır:

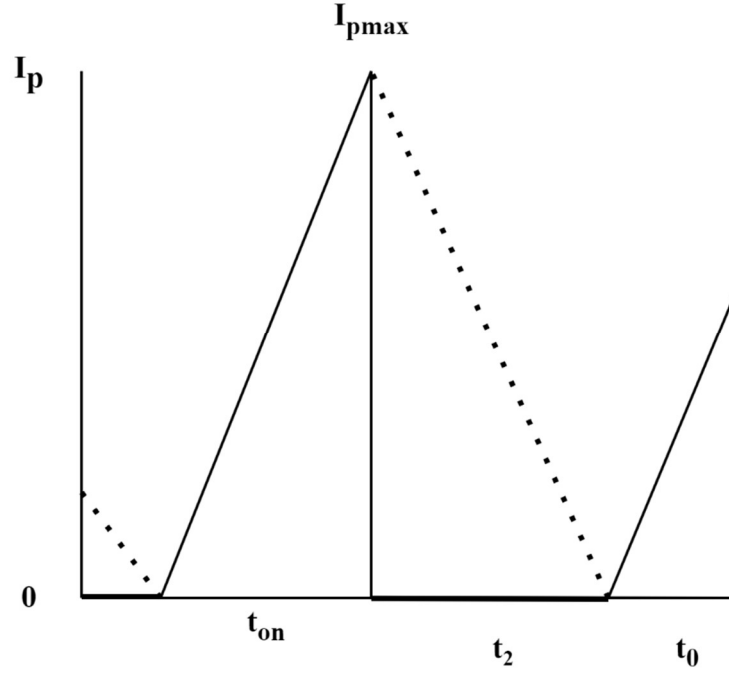
- İzoleli güç kaynaklarında kullanılabilir
- Çok az elamanı vardır.
- Düşük maliyetlidir.
- Giriş gerilim aralığı geniştir.
- Geri besleme devresi tamamen ayrıdır.
- Birden fazla çıkış elde edilebilir.
- Giriş gerilimi çıkış geriliminden daha yüksek veya daha düşük olabilir.
- Çıkış gerilimi pozitif veya negatif olarak olabilir.

Flyback dönüştürücünün başlıca uygulama alanları şunlardır:

- Cep telefonu şarj cihazları
- Bilgisayar güç kaynakları
- LCD monitör ve TV uygulamaları
- LED ile aydınlatma uygulamaları
- Fotokopi makineleri için yüksek gerilim üretimi
- İzoleli sürücü devreleri
- Lazerler ve fotokopi makineleri için yüksek gerilim üretimi

2.5.2.4.1 Flyback Dönüştürücünün Tasarım Hesabı

Kısıtlı çalışma durumunda çalışan flyback dönüştürücü akım şekli Şekil 2.30'da gösterilmektedir. Tanım gereği, her bir anahtarlama periyodunun bir bölümünde toplam amper-sarım sıfır değerini alır. Sonuç olarak, kesintili çalışma durumu, her anahtarlama sürecinde sırasıyla üç ayrı zaman dilimi içerir. Bu üç farklı zaman dilimini göstermektedir. Yük akımı arttıkça t_0 ve t_2 süreleri azalır, ancak t_1 artar. Şekil 2.30'da gösterildiği gibi, t_0 süresi sıfır olduğunda kesintili çalışma durumu sınırına ulaşabilmektedir. Yük akımındaki artış, kesintili çalışmadan kesintisiz çalışmaya geçer. Bu, kontrol döngüsünün kararsız hale gelmesine neden olabilir, bu da istenmeyen bir durumdur.



Şekil 2.30 Flyback kesintili çalışma durumu zaman periyodu.

Kesintili çalışma durumunda, her anahtarlama periyodunda endüktörde depolanan enerjinin tamamı çıkışa aktarılır. Bu enerjinin anahtarlama frekansı ile çarpılarak hesaplanmasıyla çıkış gücü elde edilir. Bundan dolayı, endüktans, frekans ve çıkış voltajı sabit tutulursa mıknatıslanma endüktansında depolanan enerji, giriş voltajına göre değil, yalnızca yük akımına göre değişir.

Bununla birlikte giriş gerilimi, dönüş oranı, anahtarlama oranı ve endüktans değeri, süreksizlik ile süreklilik arasındaki sınırda enerji veren indüktörde depolanan maksimum enerjiyi belirler. Flyback devresi, minimum giriş voltajında aralıklı kesintisiz sınırda gerekli tam yük akımını (çıkış akımı) sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bunun nedeni, minimum voltajda gereken tam yük akımının, birincil endüktans akımının tepe değerine ulaşmasına neden olmasıdır. Birincil endüktans akımının tepe değerine ulaştığı sınır, sürekli çalışmanın sınırıdır.

Çıkış akımı artmaya devam ederse sistem kesintisiz çalışmaya geçer. Bu istenmeyen bir durumdur çünkü kontrol döngüsü kararsızlığına yol açabilir. Bu nedenle tasarımın başlangıcında geri dönüş dönüştürücünün aralıklı kesme sınırında çalışacak şekilde

hesaplanır. Aralıklı kesintisiz güç limit değerinden daha küçük bir endüktans değeri seçerseniz, aralıklı çalışma durumuna göre tekrar hesaplama yapmanız gerekecektir.

2.5.2.4.2 Transformatör Çevirme Oranının Hesaplanması

Anahtarlama güç kaynaklarında istenilen çıkış geriliminin sağlanmasında, transformatör çevirme oranı çok önemlidir. Flyback dönüştürücüdeki anahtarlama oranı eğer transformatör çevirme oranı doğru seçilmezse %50'yi geçebilir. Kesintili-kesintisiz sınır, transformatör çevirme oranını hesaplamak için kullanılır. Flyback dönüştürücüdeki transformatör çevirme oranını (3.2) bulmak için bir eşitlik kullanılır.

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{(V_{giriş} - V_{DS(on)})}{(V_{yük} + V_f)} \times \frac{D_{maks}}{(1 - D_{maks})} \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliğinde,

n; transformatör sarım oranını göstermektedir.

D; anahtarlama oranını göstermektedir.

2.5.2.4.3 Transformatör Nüve Hava Aralığının Hesaplanması

Flyback dönüştürücüde manyetik alanın aktardığı enerji hava boşluğu sayesinde depolandığından, hava boşluğunun boyutu transformatörün tasarımı açısından oldukça önemlidir. Flyback topolojisi enerjiyi tek kutuplu bir şekilde depoladığından çekirdek doyumluğu riski vardır.

Çekirdekte bir hava boşluğu bırakılarak;

- Birincil endüktans azaltılır.
- Doyma akım değeri artar.
- Manyetik geçirgenliğin endüktans üzerindeki etkisini azaltır.

Transformatör için nüveler arasında bırakılması gereken hava boşluğunun boyutu denklem 3.3'te verilmektedir.

$$L_g = \mu_0 A_e \left(\frac{N_p^2}{L_m} - \frac{1}{A_l} \right) \times 10^3 \quad (3.3)$$

(3.3) eşitliğinde,

L_g ; Transformatörde nüveler arası bırakılacak hava boşluğu miktarını,

μ_0 ; boşluğunun manyetik geçirgenliğini,

A_l ; endüktans faktörünü göstermektedir.

2.5.2.4.4 Transformatör Primer Sarım Sayısının Hesaplanması

İzole anahtarlama güç kaynakları için maksimum manyetik akı yoğunluğu ve birincil sargı sayısı, transformatör doygunluğunu önlemek açısından çok önemlidir. Maksimum manyetik akı yoğunluğu seçilen çekirdeğin özelliklerine bağlıdır. Birincil sargıdaki sarım sayısı denklem 3.4'te verilmektedir.

$$N_p = \frac{L_m I_p}{B_{max} A_e} \quad (3.4)$$

(3.4) eşitliğinde,

N_p ; primer sarım sayısını,

A_e ; nüve kesit alanını,

B_{max} ; maksimum akı yoğunluğunu göstermektedir.

Maksimum manyetik akı yoğunluğu seçilen çekirdeğin özelliklerine bağlıdır. Dönüş sayısı denklem (3.4) kullanılarak hesaplanan değer dışında seçilirse B_{max} değeri değişecektir. Bu nedenle B_{max} değerinin yeniden hesaplanması gerekir. Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri denklem (3.5)'den hesaplanır.

$$B_{max} = \frac{L_m I_p}{N_p A_e} \quad (3.5)$$

2.5.2.4.5. Transformator Sekonder Sarım Sayısının Hesaplanması

Sekonder sarım sayısı, primer sarım sayısı ve primer sarım sayısının sekonder sarım sayısına oranına bağlıdır. Sekonder sarım sayısı değeri 3.6’da gösterilmiştir:

$$N_s = \frac{1}{n} \times N_p \quad (3.6)$$

2.6 Ozon Jeneratörü

Ozon üç oksijen atomundan oluşan bir moleküldür. Belirgin bir kokuya sahip soluk mavi bir gazdır. Ozon, güneşin zararlı ultraviyole radyasyonunun çoğunu emerek Dünya atmosferinde çok önemli bir rol oynar.

Ozon jeneratörü, oksijen moleküllerini yüksek voltajlı bir elektrik alanından veya ultraviyole ışıktan geçirerek ozon üreten bir cihazdır. Ozon jeneratörleri genellikle hava temizleme, su arıtma ve koku giderme amacıyla kullanılır. Oksijen moleküllerini parçalayıp onları ozona dönüştürerek çalışırlar.

Endüstride ozon jeneratörlerinin farklı konfigürasyonlarını görmek mümkündür. Bu topolojiler tasarım, verimlilik ve uygulama açısından farklılık gösterir. Bazı ozon jeneratörleri korona deşarj teknolojisini kullanırken diğerleri ozon üretmek için UV ışığına veya elektrolize güvenebilir. Bu topolojilerin her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır, bu da kullanıcıların belirli bir ozon jeneratörü topolojisini seçmeden önce kendi özel ihtiyaçlarını dikkatlice düşünmelerini hayati önem taşır.

Ozon jeneratörü topolojisinin seçimi, ozon üretiminin genel performansını ve etkinliğini önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin korona deşarjlı ozon jeneratörleri, yüksek ozon üretim hızları ve kararlılıkları ile bilinir ve bu da onları büyük ölçekli uygulamalar için uygun kılar. Öte yandan, UV ışıklı ozon jeneratörleri, düşük bakım gereksinimleri ve kompakt boyutları nedeniyle sıklıkla tercih edilmekte ve bu da onları konut veya küçük ölçekli kullanım için ideal kılmaktadır.

Kullanıcılar, bu topolojiler arasındaki farklar analiz edilerek ihtiyaca göre bir ozon jeneratörü tasarımı gerçekleştirilebilir.

Sonuç olarak ozon jeneratörü topolojisinin seçimi hafife alınmaması gereken kritik bir karardır. Kullanıcıların seçim yapmadan önce kapsamlı bir araştırma yapması ve ozon üretim oranları, bakım gereksinimleri ve uygulamanın uygunluğu gibi faktörleri dikkate alması önemlidir. Kullanıcılar, piyasada mevcut olan çeşitli topolojileri anlayarak, gereksinimlerini karşılayan ve optimum performans sağlayan bir ozon jeneratörünü seçtiklerinden emin olabilirler.

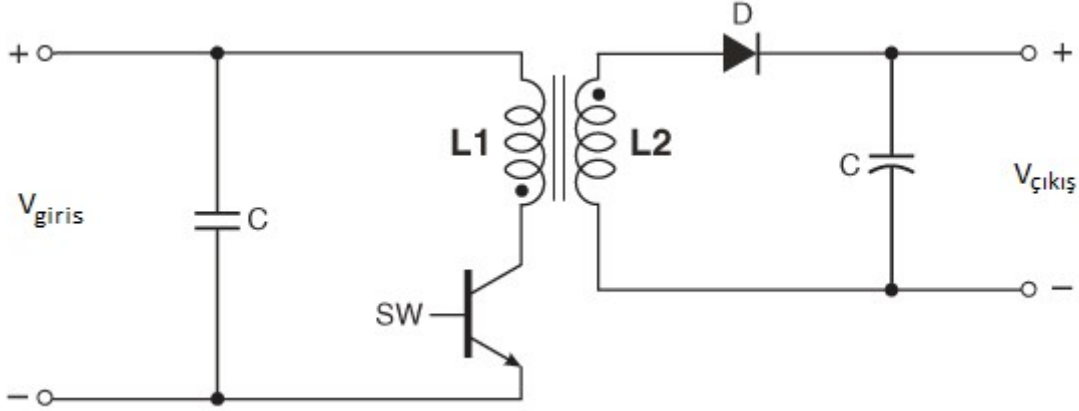
2.6.1 Flyback Topolojisi İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri

Flyback topolojisi, ozon jeneratörü geliştirme alanında oyun değiştirici olarak ortaya çıktı. Geleneksel yaklaşımların aksine, bu yenilikçi teknoloji birçok önemli avantaj sunmaktadır. İlk olarak, daha etkili ve verimli bir süreç sağlayarak daha yüksek seviyelerde ozon üretimine olanak tanımaktadır. Bu, güç aktarımının ve voltaj regülasyonunun optimizasyonu yoluyla elde edilir ve bu da gelişmiş ozon üretim kapasitesiyle sonuçlanır.

İkinci olarak, Flyback topolojisi ozon jeneratörünün çalışmasında daha fazla kontrol ve esneklik sağlar. Gelişmiş kontrol algoritmaları kullanarak voltaj ve akım gibi elektriksel parametrelerin hassas şekilde düzenlenmesini sağlayarak ozon üretim doğruluğunun artmasını sağlar. Ek olarak bu teknoloji, aşırı akım koruması ve arıza tespiti gibi çeşitli güvenlik özelliklerinin entegrasyonunu kolaylaştırarak güvenilir ve güvenli çalışmayı sağlar.

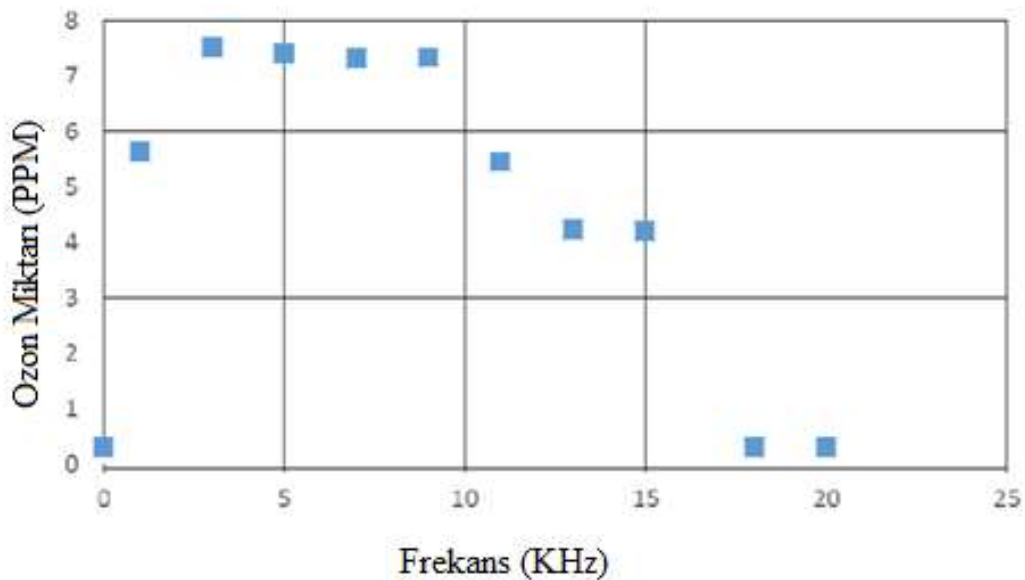
Flyback topolojisinin yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi yeni ortaya çıkan çeşitli teknolojilere dahil edilmesi önemli bir potansiyel göstermektedir. Bu iş birliği, dinamik çevresel koşullara uyum sağlayabilen ve gerçek zamanlı verilerin kullanımı yoluyla ozon üretimini optimize edebilen, gelişmiş ve daha akıllı ozon jeneratörlerinin ortaya çıkmasını sağlama kapasitesine sahiptir. Yenilikçi Flyback topolojisinin desteklediği ozon jeneratörü gelişiminde devam eden ilerleme nedeniyle, hava temizleme ve su arıtma gibi ozona dayalı uygulamaların yüksek verimlilik ve sürdürülebilirliğe ulaştığı bir gelecek

öngörebiliriz. Şekil 2.31’de örnek olarak flyback dönüştürücünün genel yapısı gösterilmektedir.

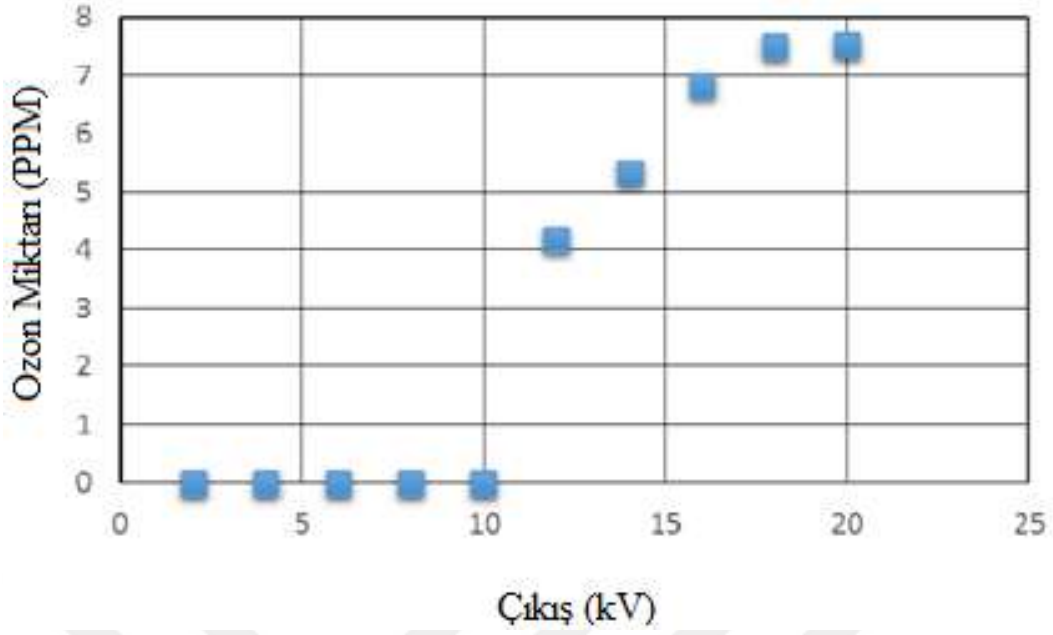


Şekil 2.31 Tipik flyback dönüştürücü devre şeması.

Singhapuntu ve arkadaşları Flyback topolojisi ile 3kHz frekansta 20kV gerilim üreterek test yapmışlardır ve 7.53 ppm ozon üretimi gerçekleştirmişlerdir. Yapmış olduğu testlerde belirli frekans aralığında ozon üretiminin ve gerilim miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 2.32’de elde ettiği sonuç bilgisi verilmektedir. Şekil 2.33’te ozon üretimi için gerekli gerilim seviyesi gösterilmektedir.



Şekil 2.32 Frekansa bağlı ozon üretim miktarı. (Singhapuntu vd. 2016)



Şekil 2.33 Gerilime bağlı ozon üretim miktarı. (Singhapuntu vd. 2016)

Bir başka çalışmaya baktığımız zaman Phoa ve arkadaşları ekonomik olarak daha uygun olması için flyback topolojisi ile çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çizelge 2.13'te Phoa vd'lerinin yapmış olduğu sonuçlara bakıldığında frekansın arttıkça giriş gerilimin azaldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 2.13 Frekansa bağlı gerilim jeneratör test sonuçları. (Phoa vd. 2020)

Frekans(kHz)	Giriş Gerilimi(V)	Giriş Akımı(A)	Çıkış Gerilimi (kV)
35	20.3	0.09	4.12
39	16.5	0.32	3.59
44	19.2	0.14	4.78
51	17.3	0.24	3.37
59	15.5	0.29	3.76
70	20.0	0.10	4.06
86	18.8	0.16	4.77
119	12.9	0.51	3.7
172	7.0	0.88	1.89

Çizelge 2.14'te Phoa vd'lerinin yapmış olduğu sonuçlara bakıldığında belirli frekans aralığında iyonların yoğunluğunun arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca kullanılan elektrot

tipine göre %5 e kadar iyon yoğunluğunda farklılıkların oluştuğu tespit edilmiştir.

Çizelge 2.14 Frekansa bağlı iyon yoğunluğu test sonuçları. (Phoa vd. 2020)

Frekans(kHz)	Düz İğneli Elektrot İyon Okuması	L Şeklinde İğneli Elektrot İyon Okuması
35	0.69	0.62
39	0.24	0.18
44	3.72	4.52
51	0.11	0.08
59	0.27	0.21
70	1.2	1.18
86	4.85	4.76
119	0.14	0.1
172	0.13	0.11

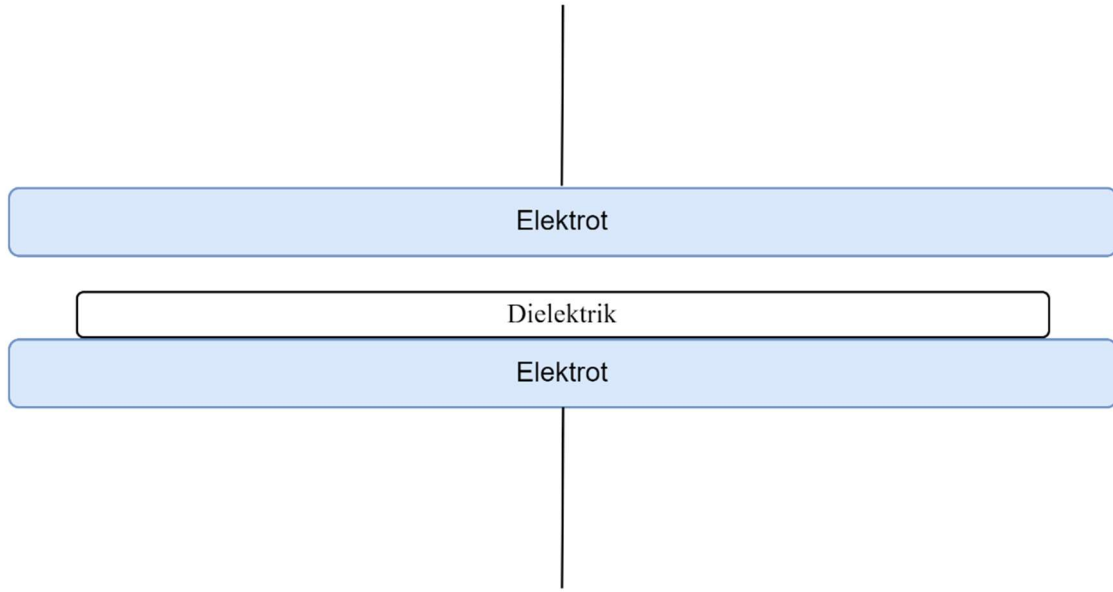
2.6.2 Dielektrik Bariyer Deşarjı İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri

Ozon gazı üretmek üzere tasarlanmış cihazlar olan ozon jeneratörlerinin geliştirilmesinde Dielektrik Bariyer Deşarjından (DBD) yararlanılmıştır. DBD, iki elektrot arasında bir bariyer oluşturmak için dielektrik malzemenin kullanımını içeren ve termal olmayan bir plazmanın üretilmesine olanak sağlayan bir tekniktir.

Bu plazma da oksijen moleküllerini parçalayıp ozon molekülleri halinde yeniden birleştirerek ozon üretimini kolaylaştırır. DBD ile geliştirilen ozon jeneratörlerinin diğer ozon üretim yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. İlk olarak, DBD bazlı ozon jeneratörleri düşük sıcaklıklarda çalışır, bu da onları enerji açısından verimli ve güvenli kılar.

Ek olarak, DBD'nin kullanımı ozon üretim hızı üzerinde hassas kontrole olanak tanıyarak istenen ozon konsantrasyonunun elde edilmesini sağlar. Üstelik DBD bazlı ozon jeneratörleri kompakt ve taşınabilir olduğundan hava temizleme, su arıtma ve endüstriyel prosesler gibi çeşitli uygulamalar için uygundur.

Genel olarak, ozon jeneratörlerinin geliştirilmesinde DBD'nin kullanılması, ozon üretimi için güvenilir ve verimli bir yöntem sağlamaktadır. Şekil 2.34’de örnek olarak DBD’nin genel yapısı gösterilmektedir.

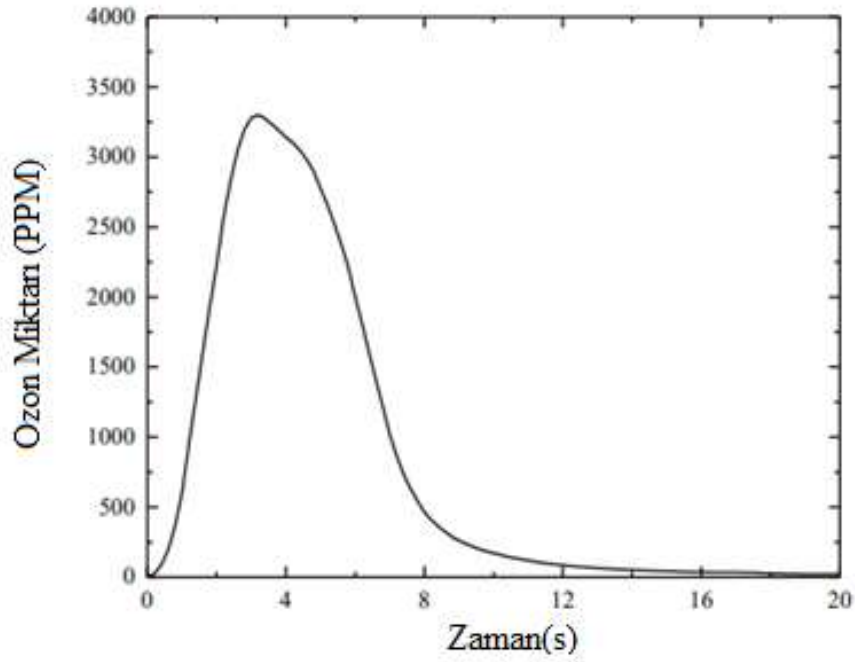


Şekil 2.34 Tipik DBD şeması. (Tsai-Fu Wu vd. 2019)

Bir veya iki dielektrikle çevrelenen bir gaz boşluğu, metal elektrotlar arasındakile hemen hemen aynı kırılma voltajına sahiptir. Dielektrik varlığı nedeniyle elektrotlara yalnızca alternatif veya darbeli voltajlar uygulanabilir. (Huang vd. 2016)

Ozon üretiminin verimliliğini değerlendirmek için üretilen plazma deşarjının özelliklerini doğru bir şekilde teşhis etmek önemlidir. DBD'nin özelliklerini araştırmak amacıyla elektriksel ve optik teşhis sistemler kurarak DBD yükünün voltaj, akım, güç tüketimi ve aktarılan yük gibi elektriksel parametreleri üzerine çalışmalar gerçekleştirildi.

Ozon reaktörüne (0,5 mm boşluk uzunluğu, 1 bar mutlak basınçla) 5.5 kV genlikli 5 kHz sinüzoidal dalga uygulandığında ölçülen ozon konsantrasyon eğrisi Şekil 2.35’te gösterilmiştir. (Huang vd. 2016)



Şekil 2.35 Ozon konsantrasyon eğrisi (Huang vd. 2016)

DBD'nin frekansa bağlı karakteristiği üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 2.15'te Huang ve arkadaşlarının 100Hz – 5Khz arasında çeşitli frekanslar uygulandığı zaman oluşan deşarj gerilimlerine yer verilmiştir.

Çizelge 2.15 Frekansa bağlı DBD gerilim test sonuçları. (Huang vd. 2016).

Uygulanan gerilim	100Hz	5Khz
4 kV	701 V	-561 V
5 kV	-312 V	-1640 V
6 kV	-1387 V	-2670 V
7 kV	-2347 V	-3630 V

2.6.3 Full-Bridge Topolojisi İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri

Genel olarak, ozon jeneratörlerinin tasarımına tam köprü topolojisinin dahil edilmesi, ozon üretim teknolojisi alanında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Bu yenilikçi yaklaşım, daha fazla kontrol ve verimlilikle ozon üretimi için daha sağlam ve güvenilir bir çözüm sunar. Tam köprü topolojisinin avantajlarından yararlanan ozon jeneratörleri,

ozon üretimi gerektiren çeşitli uygulamaların taleplerini karşılayarak üstün performans ve işlevsellik sunabilir.

Önemli faydalardan biri, çıkış voltajını ve akımını daha yüksek bir doğrulukla düzenleyebilme yeteneğidir, bu da ozon üretiminde verimliliğin ve tutarlılığın artmasına yol açar. Ek olarak, tam köprü topolojisi, sistem içindeki güç dağıtımının daha iyi yönetilmesine olanak tanıyarak ozon jeneratörünün genel performansının ve ömrünün artmasını sağlar. Tsai Fu ve arkadaşları full bridge topolojisi kullanarak dielektrik bariyer deşarj yöntemi ile ozon jeneratörleri için modelleme yapmıştır. yapmış olduğu çalışmalarda lissajous yöntemi kullanılmış ve doğrusal olan, olmayan modelleme yapmışlardır. Çalışmalarında lissajous metodu uygulanarak 3.7 numaralı denklemi üretmişlerdir.

$$V_{C_m} = \frac{1}{C_m} \int i_{C_m} dt = \frac{Q}{C_m} \quad (3.7)$$

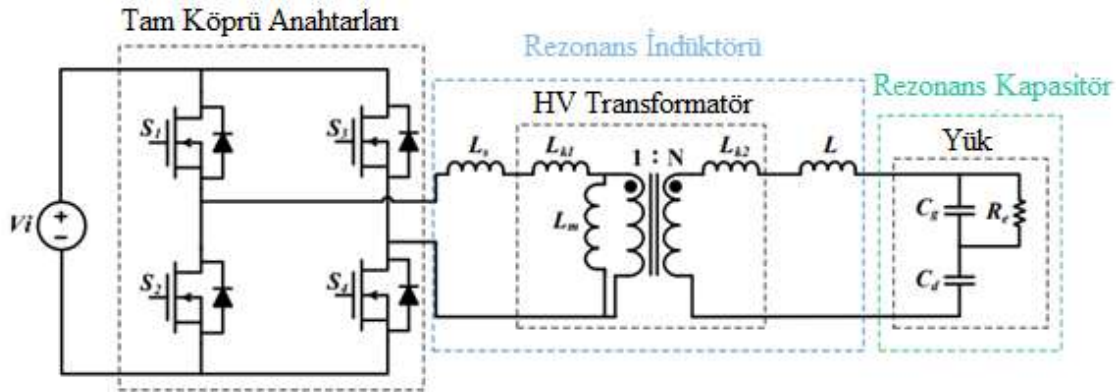
Denklemden kullanılan terimler;

C_m = Yardımcı kapasitör,

V_{C_m} = Gerilim,

Q = Yük

Full bridge topolojisi kullanılarak yapılan LC yüksek gerilim rezonans dönüştürücü modelleme yapısı Şekil 2.36’da verilmiştir.



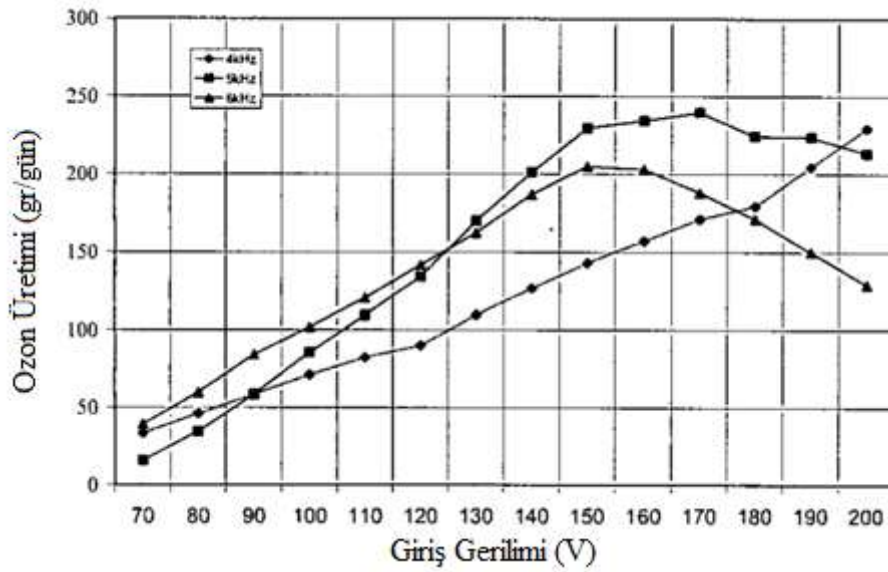
Şekil 2.36 LC yüksek gerilim rezonans dönüştürücü şeması. (Wu vd. 2019)

Farklı DBD türleri arasında her zaman fark olduğundan rezonans kazancını istenen çalışma frekansı aralığında tasarlamak için kapasitans kullanılması gerektiğini belirtir.

4 hücreli ozon jeneratörü tasarımında hücrelerin paralel çalışmasıyla, jeneratörün mıknatıslanma endüktansı 4 HV transformatör paralel olarak kabul edilebilir, eşdeğer direnç de dört kat daha küçüktür ve eşdeğer kapasitans dört kat daha büyüktür. Önerilen yöntemle simüle edilmiş ve deneysel sonuçlar arasındaki hatanın %5'ten az olduğu kanıtlanmıştır. (Tsai Fu vd. 2019)

Bir başka çalışmada Matlab üzerinden transformatörsüz rezonant invertör simüle edilmiştir bu modelde Faz kaydırmalı Darbe genişlik modülasyonu, ozon hücresine çıkış gücünü kontrol etmek için kullanılır ve hücre tarafından tüketilen güç, faz açısı kontrolüne göre değiştirilebilir, güç tüketimi formülleri kullanarak bilinir. (Palanisamy vd. 2013)

Bir başka çalışmada 3khz-30khz arasında anahtarlama işlemi yapılmış ve ozon jeneratörü hücresinde uygulanmıştır. Değişen frekans miktarlarına göre gerilim, akım miktarları incelenmiş olup frekansın belirli bir aralık içerisinde daha fazla ozon ürettiği gözlemlenmiştir Şekil 2.37’de sonuçlar gösterilmiştir. (Akbari vd. 2009)



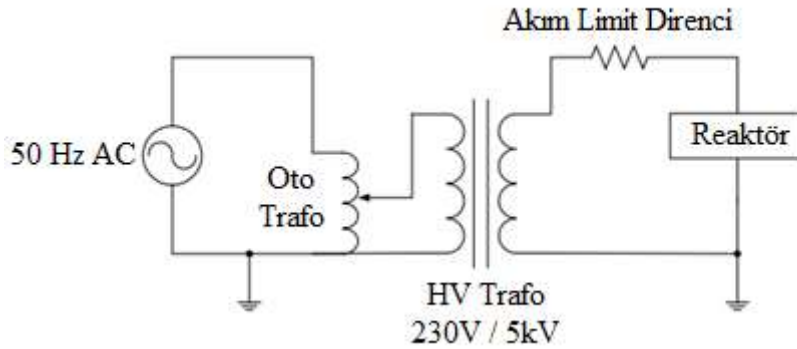
Şekil 2.37 Full bridge anahtarlama frekansına ve gerilime bağlı ozon üretimi sonuçları. (Akbari vd. 2009)

2.6.4 Yüksek Gerilim Trafosu İle Geliştirilen Ozon Jeneratörleri

Ozon jeneratörlerinin geliştirilmesi süreci, yüksek gerilim transformatörünün kullanımını içerir. Bu önemli bileşen ozon gazının üretiminde önemli bir rol oynar. Yüksek gerilim transformatörü, verimli ozon üretimi için gerekli olan giriş gerilimini daha yüksek bir gerilim seviyesine dönüştürmekten sorumludur.

Yüksek gerilim transformatörü, gerilimi düşük bir seviyeden daha yüksek bir seviyeye yükselterek çalışır. Gerilimdeki bu artış, ozon üretiminin ana mekanizması olan korona deşarjının oluşması için gereklidir.

Ozon jeneratörlerinde yüksek gerilim transformatörünün kullanılması, ozon gazının verimli üretimi için gerekli gerilim seviyelerinin elde edilmesini sağlar. Bu bileşen olmadan yeterli miktarda ozon üretmek zor olurdu. Bu nedenle, ozon jeneratörlerinin geliştirilmesi büyük ölçüde ozon gazı üretimini kolaylaştırmak için yüksek gerilim transformatörlerinin dahil edilmesine dayanmaktadır. Şekil 2.38’de örnek olarak yüksek gerilim trafosu gösterilmektedir.



Şekil 2.38 Tipik yüksek gerilim trafosu şeması. (Huang vd. 2016)

Bu tarz sistemlere rezonans koşulu çok önemlidir çünkü koşula ulaşıldığı taktirde en yüksek elektriksel verim elde edilir. Çıkış katındaki güç kayıplarını azaltmak için ON sürüş darbesi dardır ve çıkış sinyalinin minimum voltaj değeri ile senkronize edilir. Elektronik sistem, rezonans durumunu elde etmek için yüksek frekanslı osilatörün periyodunu ayarlayan bir düzenleme sürecine sahiptir. (Roberto vd. 2001)

Ozon konsantrasyonu görev döngüsünün artmasıyla birlikte artar, ancak %12'den büyük görev döngüsü için ozon konsantrasyonu daha yavaş artar ve %12'den daha büyük görev döngüsü için hücreye uygulanan enerjinin büyük bir kısmı ısıya dönüştürülür ve bu da hücrede üretilen ozonu kısmen yok eder. Ozonizatör hücresinin boyutunun daha yüksek olması durumunda, daha yüksek ozon üretim seviyesi elde edilmesi ve ozonizatör hücresine daha yüksek değerlerde gaz akışı uygulanabilmesi muhtemeldir. (Roberto vd. 2001) Çizelge 2.16'da yüksek gerilim trafosuna yüksek frekans uygulandığındaki sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 2.16 Orta frekans ve yüksek frekans ozon jeneratör sisteminin kıyaslanması. (Roberto vd. 2001)

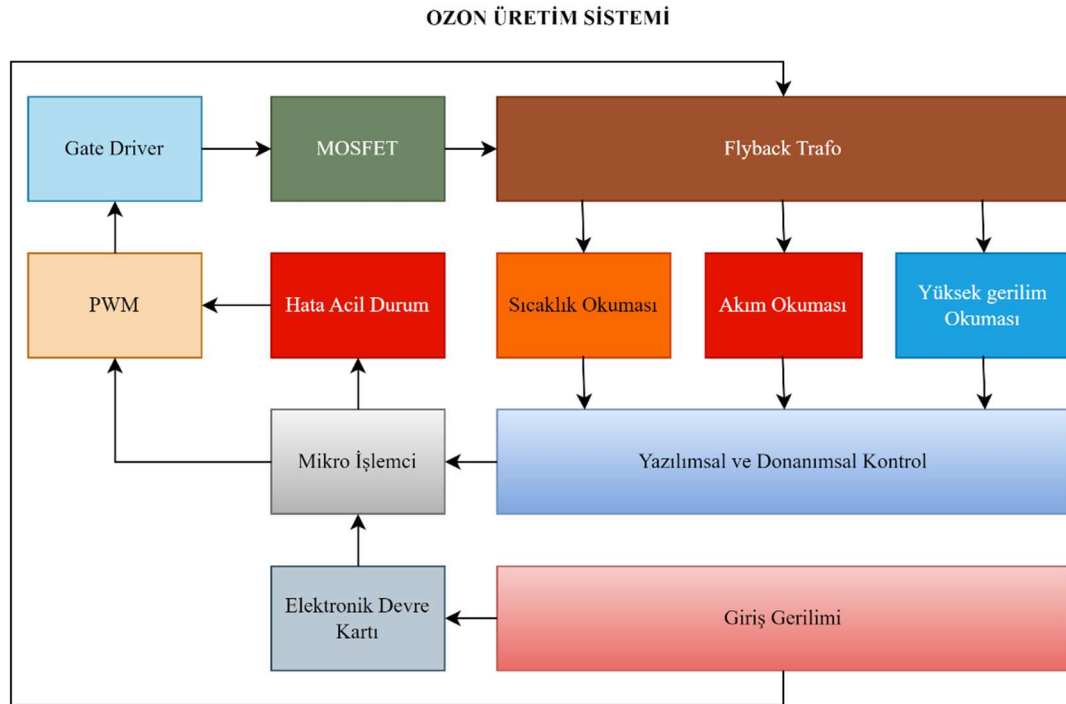
Özellik	Orta frekansa sahip ozon jeneratörü	Yüksek frekansa sahip ozon jeneratörü
Frekans	400 – 500 Hz	12200 Hz
Dalga Boyu	Sinüs	Darbe
Uygulanan Gerilim	8000 V	1000 V
Üretim	6.2 g/h	6.2 g/h
Güç	110 W	50 W

3. MATERYAL ve METOT

Ozon ve plazma üreten yenilikçi cihazlar, çeşitli endüstrilerde devrim yaratan en ileri teknolojilerdir. Cihaz, güçlü bir oksidan olan ozon ve yüksek enerjili bir durum olan plazmayı üretmek için karmaşık bir mekanizma kullanmaktadır. Bu iki unsuru birleştiren cihaz, hava temizleme ve su arıtmadan tıbbi sterilizasyon ve yüzey dekontaminasyonuna kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır.

3.1 Ozon ve Plazma Üretici

Ozon üretimi birçok alanda aktif olarak kullanılacağı ve piyasadaki emsal ürünlerin pahalı olması sebebiyle hem ozon üretebilecek hem de sterilizasyon yapabilecek bir sistemin geliştirilmesi kritik bir ihtiyacın giderilmesi hususunda oldukça önem arz etmektedir. Bu sistemin üretimindeki temel amaç plazma üreterek, plazmanın sterilizasyon özelliğini sağlamaktır. Bu noktada yapılan birçok araştırma kapsamında çeşitli topolojiler ve sistemler tasarlanmış, simülasyon ve test ortamında değerlendirilmiştir. Elektronik kart ve sistem için gereken malzemeler tespit edilmiştir. Ozon üretim sistemi blok şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Ozon üretim sistemi blok şeması.

3.1.2. Flyback Transformatör

Flyback transformatörü, boşluklu bir çekirdeğe sahip birleştirilmiş bir indüktördür. Her çevrim sırasında, primer sargıya giriş gerilimi uygulandığında, enerji çekirdeğin boşluğunda depolanır. Daha sonra yüke enerji sağlamak için ikincil sargıya aktarılır. Flyback transformatörleri, flyback dönüştürücülerde gerilim dönüşümünü ve devre izolasyonunu sağlamak için kullanılır. Enerji transformatörde depolandığından, flyback topolojisi diğer izole topolojiler gibi ayrı bir çıkış filtreleme indüktörüne ihtiyaç duymaz. Bu, bileşen sayısını azaltır ve devre gereksinimlerini basitleştirir.

Flyback transformatörleri, yaklaşık 120 Watt'a kadar uygun maliyetli, yüksek verimli izole güç kaynağı tasarımları için en popüler seçimdir. Devre izolasyonu, çoklu çıkış potansiyeli ve pozitif veya negatif çıkış gerilimi olanağı sağlarlar. Ayrıca geniş bir giriş gerilimi ve yük koşulu aralığında da düzenlenebilirler. Başlangıçta nispeten yüksek frekanslarda yüksek gerilimli testere dişi sinyalleri üretmek için tasarlanmıştır.

Modern uygulamalarda, düşük gerilimli (3 V) ve yüksek gerilimli (10 kV'un üzerinde) güç kaynakları için anahtarlama güç kaynaklarında yaygın olarak kullanılır.

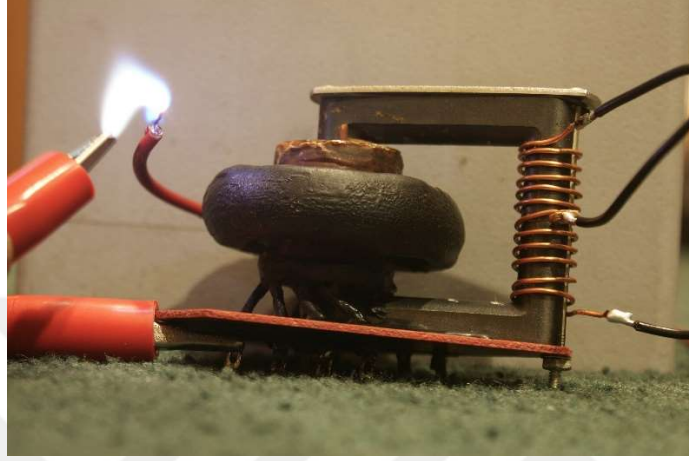
Flyback transformatörlerini aşağıdakiler dahil birçok uygulamada kullanabilirsiniz:

- DC-DC güç kaynakları
- Telekom
- LED aydınlatma
- Ethernet Üzerinden Güç (PoE)
- Kapasitör şarjı
- Pil doldurma
- AC-DC güç kaynakları

Düşük maliyet, küçük boyut ve yüksek performans gerektiren birçok uygulama için kullanıma hazır flyback transformatörler mevcuttur. Genellikle 37 ila 72 VDC aralığında (telekomünikasyonda), bazen 2 ila 400 VDC genişletilmiş gerilimlerde ve ayrıca hat giriş gerilim aralığında DC-DC kontrolörlerinde kullanılırlar.

Flyback transformatörleri tipik olarak yaklaşık 10 amperin altındaki çıkış akımları ve yaklaşık 100 watt'ın altındaki çıkış güçleri için kullanılır.

Daha yüksek akım ve güce ihtiyaç duyulduğunda doğrudan mod, itme-çekme veya yarım köprü/tam köprü modu topolojileri daha verimli alternatifler haline gelir.



Şekil 3.2 Flyback trafo.

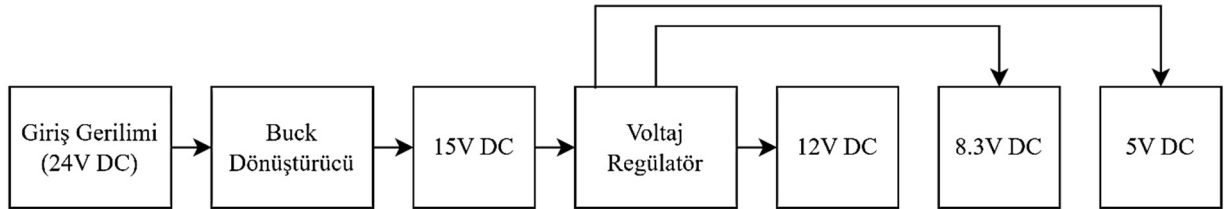


Şekil 3.3 EHT trafo.

3.1.3 Plazma Sistemine Ait Kontrol Devresi

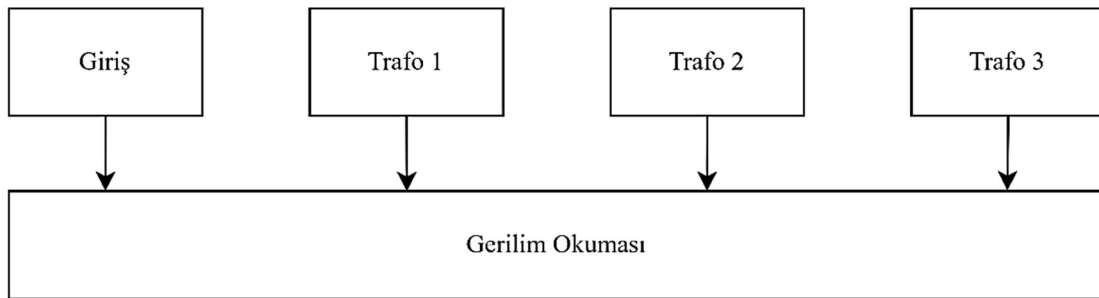
Bir ozon jeneratörü için elektronik devre tasarlamak, elektrik mühendisliği prensiplerinin ve ozon gazının özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını gerektirir. Ozon jeneratörlerinin düzgün çalışmasını sağlamak için gerilim gereksinimleri, akım sınırları ve güvenlik önlemleri gibi faktörleri dikkate alınmalıdır. Ayrıca özel uygulama gereksinimlerinizi de göz önünde bulundurmanız ve bu gereksinimleri karşılayabilecek bir devre tasarlamanız gerekir.

Tasarlamış olduğumuz elektronik kartın belirli katmanları için gerekli şemalar mevcuttur. Şekil 3.4’de gördüğünüz gibi elektronik komponentlerin çalışabildiği gerilim aralıklarına bağlı olarak, elektronik kartın belirli gerilim çıkışlarını vermesi gerekmektedir.



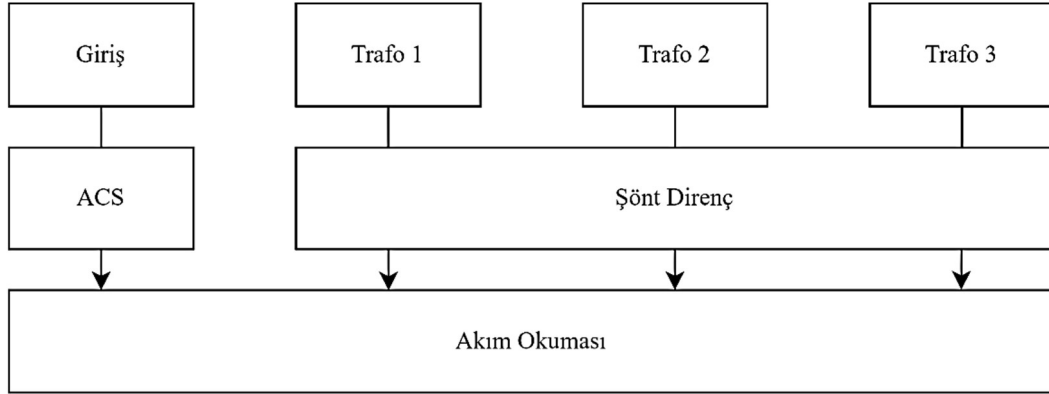
Şekil 3.4 Plazma sistemine ait kontrol devresi besleme katı şeması.

Elektronik devre, akım, gerilim, sıcaklık ve hata gibi çeşitli parametreleri ölçmek için tasarlanmıştır. Sensörleri ve bileşenleri birleştirerek bu önemli değişkenleri doğru bir şekilde okuyabilir ve izleyebilir. Gerilim okumaları, devrenin farklı noktaları arasındaki elektriksel potansiyel farkının belirlenmesine yardımcı olarak devre performansının ve potansiyel sorunların analizine yardımcı olur. Giriş ve trafo gerilimleri ayrı ayrı işlemci tarafından okunmaktadır ve Şekil 3.5’te blok şeması gösterilmiştir.



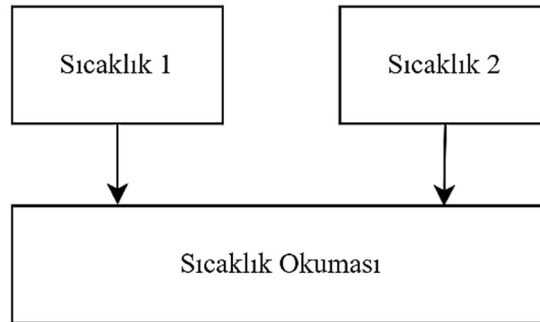
Şekil 3.5 Plazma sistemine ait kontrol devresi gerilim okuması.

Akım ölçümü, devre boyunca elektrik yükünün akışının değerlendirilmesine olanak tanır ve güç tüketimi ve verimliliği hakkında değerli bilgiler sağlar. Giriş ve trafo akımları ayrı ayrı işlemci tarafından okunmaktadır. Akım okuma işleminde 2 farklı metot uygulanmıştır ve Şekil 3.6’da blok şeması gösterilmiştir.



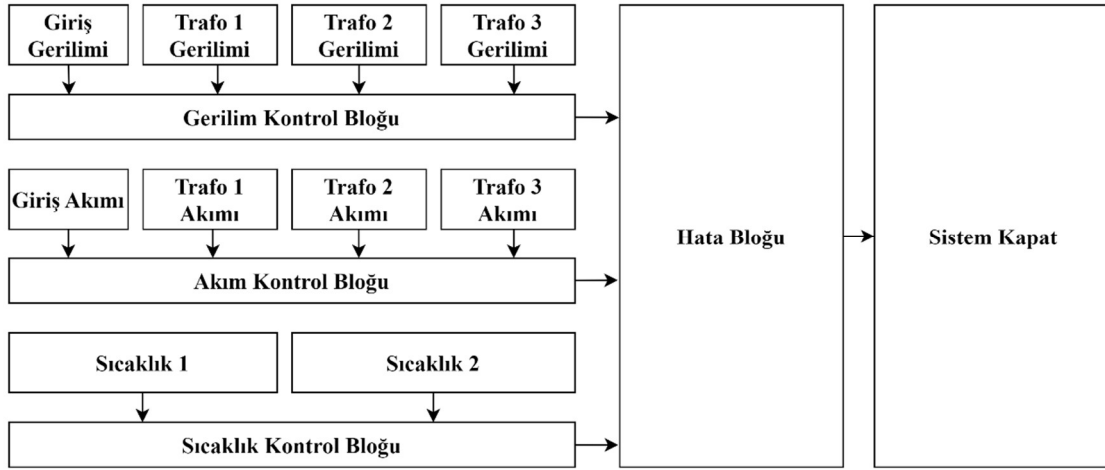
Şekil 3.6 Plazma sistemine ait kontrol devresi akım okuması.

Sıcaklık algılama, devre bileşenlerinin ürettiği ısının izlenmesi ve bunların güvenli sınırlar dahilinde çalışmasının sağlanması açısından çok önemlidir. Elektronik kartta 2 adet sıcaklık okuması yapılmaktadır ve Şekil 3.7’de blok şeması gösterilmiştir.



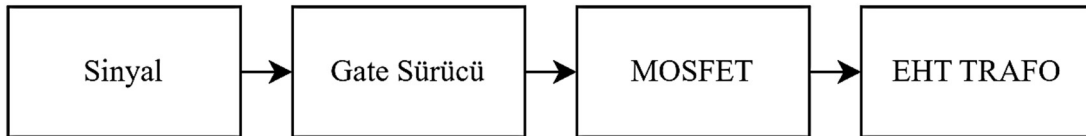
Şekil 3.7 Sıcaklık okuması.

Son olarak devrenin hata kontrol özelliği, olası tehlikelerin veya arızaların tespit edilmesini ve herhangi bir hasar veya zararın önlenmesi için uygun önlemlerin alınmasını sağlar. Gerilim, akım ve sıcaklık durumları sürekli olarak kontrol edilir ve istenilen aralığın dışında olması durumunda hata gösterilir. Şekil 3.8’de blok şeması gösterilmiştir.



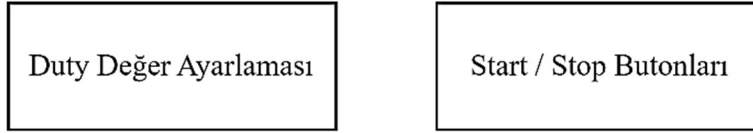
Şekil 3.8 Sistem kontrol birimi.

Güç aşaması olarak da bilinen sürüş birimi, elektronik sistemlerde elektrik akımının akışını kontrol eden önemli bir bileşendir. Düşük güçlü sinyallerin, çeşitli cihazları çalıştırabilecek yüksek güçlü sinyallere dönüştürülmesinden sorumludur. Sürüş birimindeki önemli unsurlardan biri, akım akışını kontrol eden bir anahtar görevi gören MOSFET'tir. Kapı sürücüsü, MOSFET'i çalıştırmak için gerekli gerilimi ve akımı sağlayan bir diğer hayati bileşendir. MOSFET'in verimli bir şekilde açılıp kapanmasını sağlayarak sistemden istenilen akımın geçmesini sağlar. Bir kare dalga sinyalinin görev döngüsünü değiştirerek bir yüke iletilen ortalama gücü kontrol etmek için Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) tekniği kullanılır. Elektronik kartta yük olarak kullanılan EHT trafosunu sürme işleminin blok şemasını Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Trafo sürme birimi.

Kullanıcı kontrol birimi, bir sistemin veya sürecin işleyişinin yönetilmesinde ve düzenlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Giriş sinyallerini alan ve işleyen merkezi bir merkez görevi görür ve önceden tanımlanmış parametrelere dayalı olarak sistemin çeşitli yönlerini kontrol etmek için uygun çıkış sinyallerini gönderir. Sistemde kullanıcının ayarlarını sağlaması için kontrol birimi oluşturulmuştur. Blok şeması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

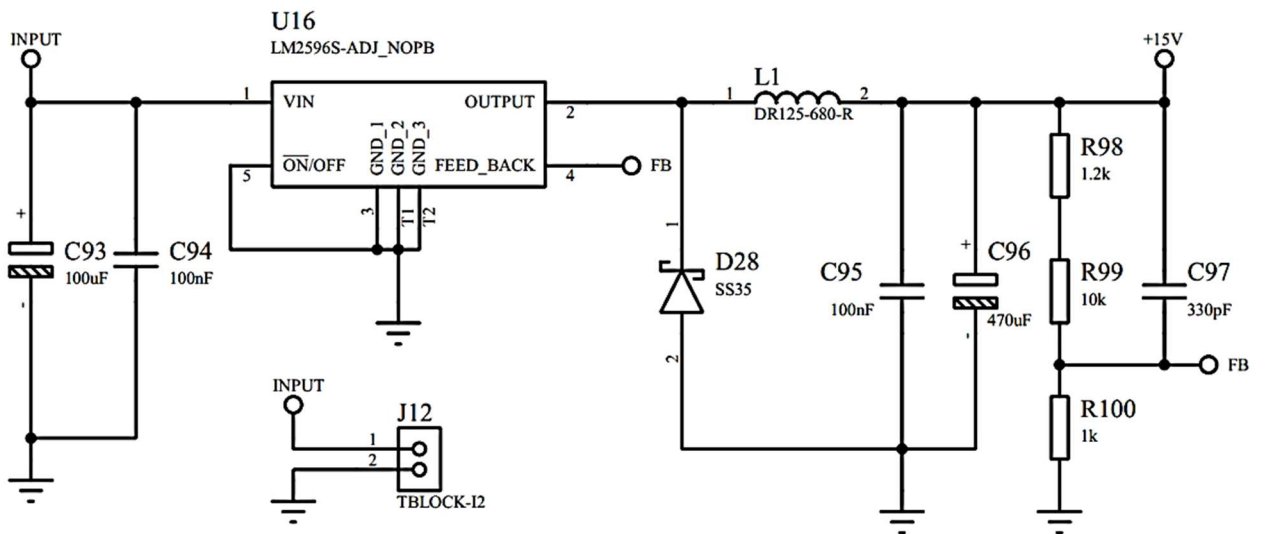


Şekil 3.10 Kullanıcı kontrol birimi.

3.1.3.1 Buck Converter

Buck converter, girişinden (besleme) çıkışına (yük) kadar akımı artırırken gerilimi azaltan bir DC'den DC'ye dönüştürücüdür. Anahtarlamalı güç kaynağı sınıfıdır. Anahtarlamalı dönüştürücüler (buck dönüştürücüler gibi), gücü ısı olarak dağıtan ancak çıkış akımını artırmayan daha basit devreler olan doğrusal regülatörlere kıyasla DC'den DC'ye dönüştürücüler olarak çok daha fazla güç verimliliği sağlar. Sistem içerisinde belirli gerilim değerlerine gereksinim duyulduğu için çeşitli entegreler ile istenilen gerilim değerleri üretilmiştir.

24V DC giriş gerilimi uygulanmış ve sırasıyla 15V DC (Gate Driver), 8.3V DC, 5V(MCU) DC gerilimleri üretilmiştir. Bu sistemde giriş gerilimini (24V DC) 15VDC'ye düşürmek için buck dönüştürücü devresi kullanılmıştır. Tasarım şematik çizimi Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Buck converter tasarımı.

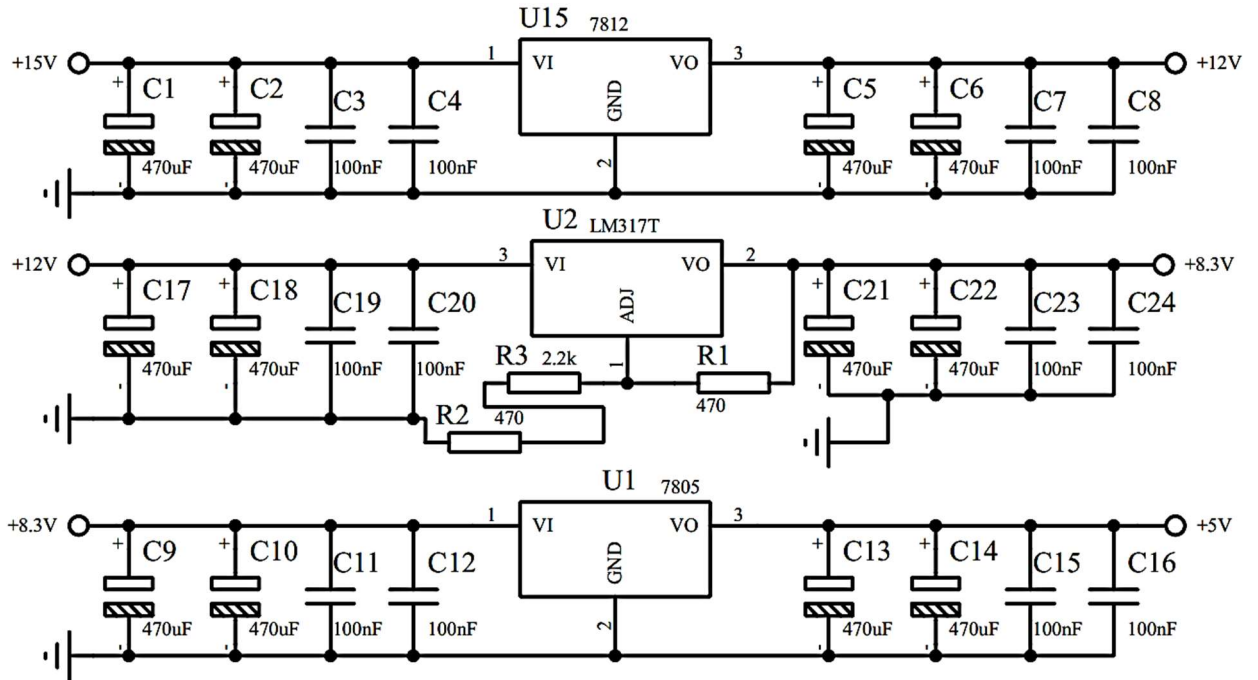
3.1.3.2 Gerilim Regulator

Gerilim regülatörü, otomatik olarak sabit bir gerilim seviyesini koruyan bir sistemdir. Gerilim regülatörleri basit bir ileri beslemeli tasarım kullanabilir veya negatif geri beslemeyi içerebilir. Elektronik gerilim regülatörleri, işlemciler ve diğer ögeler tarafından kullanılan DC gerilimini dengelemek için bilgisayar güç kaynakları gibi cihazların içine yerleştirilmiştir. Otomotiv alternatörlerinde ve merkezi enerji santrali enerji üretim sistemlerinde gerilim regülatörleri sistem performansını kontrol eder. Elektrik dağıtım sistemlerinde, hatlardan çekilen güç miktarına bakılmaksızın tüm müşterilerin sabit gerilim almasını sağlamak için trafo merkezlerine veya dağıtım hatları boyunca gerilim regülatörleri kurulabilir.

Sistemde kullanılan gerilim regülatörler;

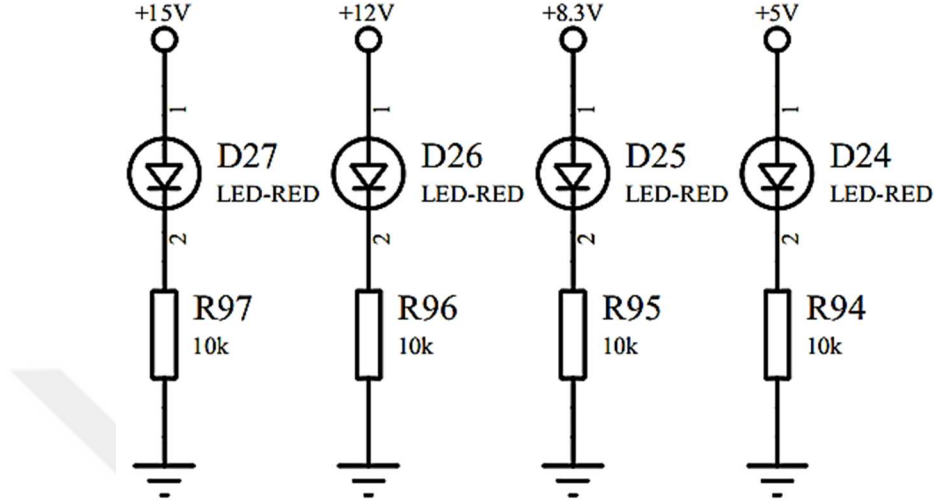
- 7812 entegresi kullanılarak 15V DC'yi 12V DC'ye
- LM317 entegresi kullanılarak 12V DC'yi 8.3V DC'ye
- 7805 entegresi kullanılarak 8.3V DC'yi 5V DC'ye

gerilim kademeli düşürülerek istenilen değerler elde edilmiştir ve Şekil 3.12'de şematik çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Gerilim regülatörleri.

Devre üzerindeki gerilim katmanlarını test ve kontrol etmek adına ledler kullanılarak “Gerilim Kontrol Led Devresi” oluşturulmuştur Şekil 3.13’de şematik çizimi gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Gerilim kontrol led devresi.

3.1.3.3 Gate Sürücü

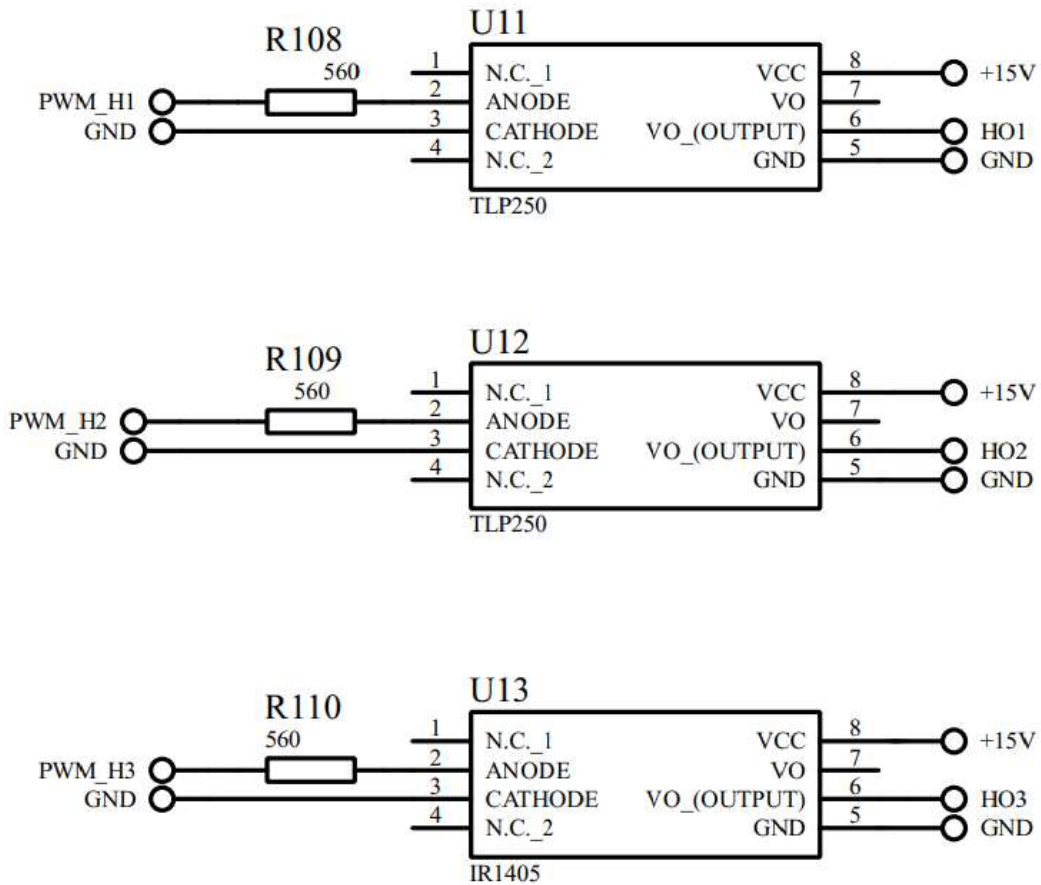
Bir kapı sürücüsü, bir kontrolör entegre devresinden düşük bir güç girişi alan ve bir IGBT veya güç MOSFET'i gibi yüksek güçlü bir transistörün kapısına yüksek akımlı bir sürücü girişi üreten bir güç amplifikatörüdür. Kapı sürücüleri çip üzerinde veya ayrı modüller halinde sağlanabilir. Temel olarak kapı sürücüsü bir seviye dönüştürücü ve bir amplifikatörden oluşur. Kapı sürücüsü entegre devreleri, kontrol sinyalleri (dijital veya analog) ve güç anahtarları (IGBT'ler, MOSFET'ler vb) arasında bir arayüz görevi görür.

Entegre kapı sürücüsü çözümü, tasarım karmaşıklığını, geliştirme süresini, malzeme listesini ve kart alanını azaltırken, ayrı olarak uygulanan kapı sürücüsü çözümlerine göre güvenilirliği artırır. TLP250'nin optoizolatör özelliği, gürültülü veya yüksek gerilimli ortamlarda bile sinyallerin herhangi bir müdahale veya bozulma olmadan iletilmesini sağlar. Ayrıca TLP250'nin kompakt paketi ve düşük güç tüketimi, onu çeşitli elektronik cihazlar için enerji açısından verimli bir çözüm haline getiriyor. Genel olarak TLP250, geniş bir uygulama yelpazesinde sinyal izolasyonu ve amplifikasyonu için güvenilir ve verimli bir çözüm sunar.

Çizelge 3.1 TLP250 özellikleri.

Özellik	Değer
Paket yapısı:	DIP8
Besleme gerilimi:	15V – 35 V DC
Besleme akımı:	11 mA
Çıkış akımı:	1.5A
İzolasyon gerilimi:	2500 V _{rms}
Çalışma sıcaklığı:	-20°C~+85°C

Bu sistemde gate driver olarak TLP250 tercih edilmiştir ve şematik tasarımı Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Gate driver devresi.

3.1.3.4 MOSFET Devresi

MOSFET, elektronik cihazlarda ve devrelerde yaygın olarak kullanılan bir transistör türüdür. Bir elektrik alanı kullanarak kaynak ve drenaj terminalleri arasındaki akım akışını kontrol ederek çalışan üç terminalli bir cihazdır. MOSFET'ler yüksek anahtarlama hızları, düşük güç tüketimi ve yüksek gerilim ve akımları idare edebilme yetenekleriyle bilinir. Güç amplifikatörleri, gerilim regülatörleri ve dijital mantık devreleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.

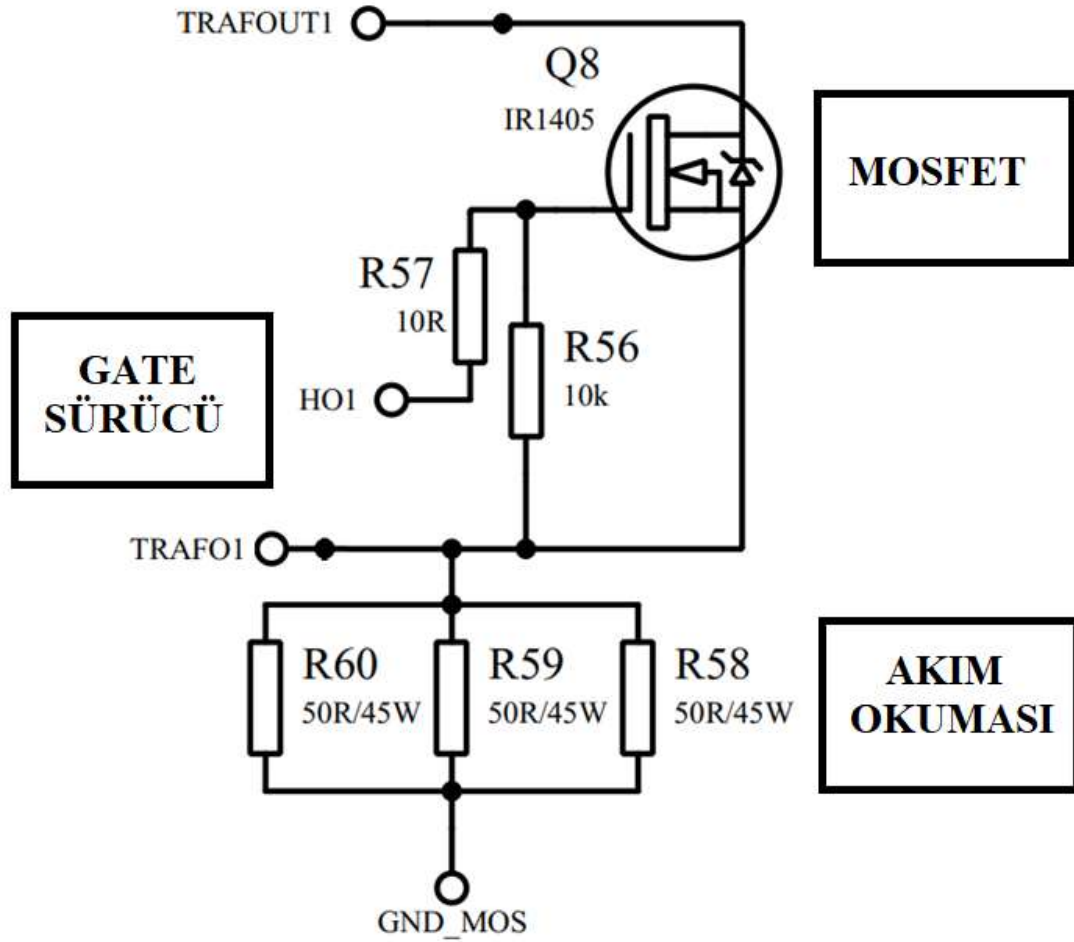
Bu sistemde MOSFET olarak IRFP260NPBF kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 IRFP260NPBF MOSFET özellikleri.

Özellik	Değer
Paket yapısı:	TO247AC
Gerilim:	200 V
Akım (25°C):	50A
Fet tipi:	N-Channel
Trr:	268 ns
Rds on:	40m ohms
Max güç:	300W
Çalışma sıcaklığı:	-55°C~+175°C

Akım şöntü olarak da bilinen şönt direnci, bir devredeki elektrik akımını ölçmek veya kontrol etmek için özel olarak tasarlanmış bir direnç türüdür. Tipik olarak izlenmesi gereken yüke veya bileşene paralel olarak bağlanır.

Akımın küçük bir kısmını şönt direncinden geçirerek devreden geçen akımın doğru bir şekilde ölçülmesini sağlar. Örnek MOSFET devre şeması ve şönt direnç kullanımı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

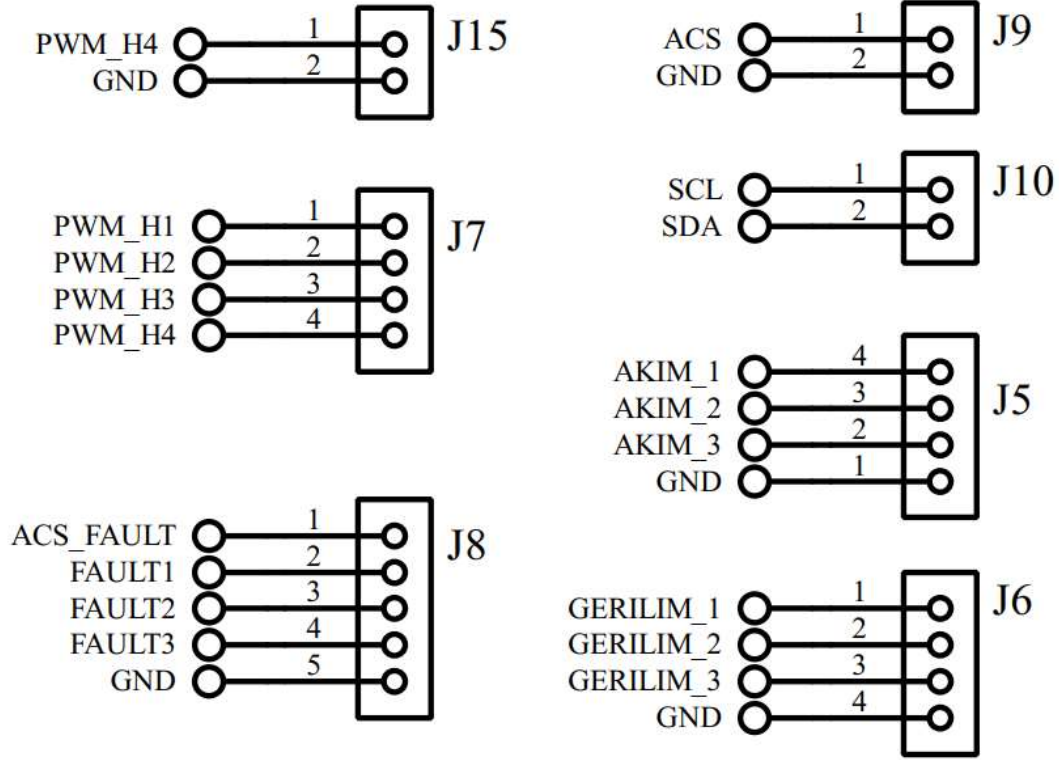


Şekil 3.15 MOSFET kontrol devresi.

3.1.4 Kontrol

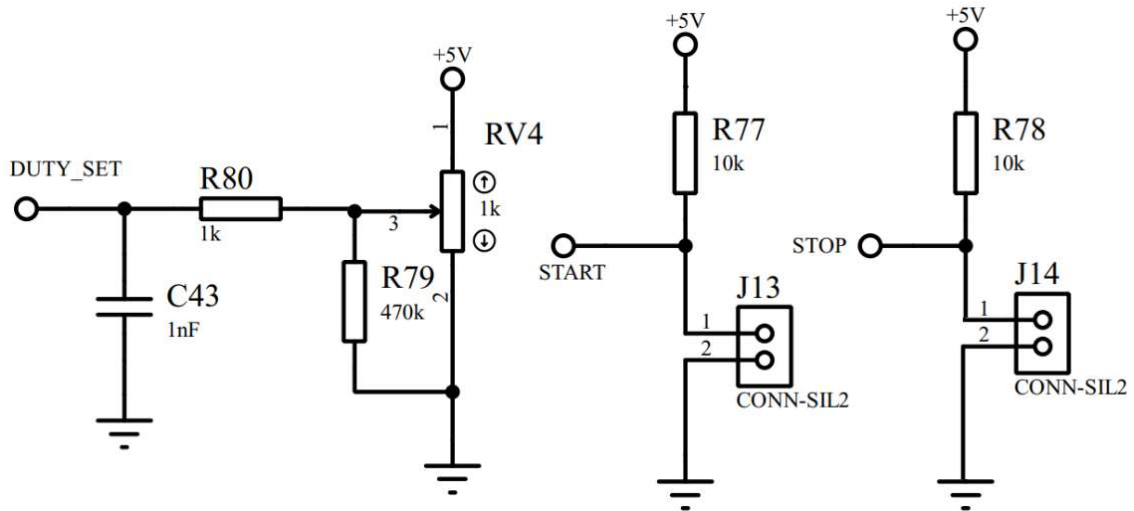
Sistemde temel olarak akım, gerilim ve sıcaklık değerleri sürekli olarak ölçülüp algoritma kısmında belirli kontroller ile acil bir durumda enerjinin kesilmesi sağlanmıştır. Her işlem için ayrı kontrol blokları mevcuttur. Bunlar donanımsal ve yazılımsal olarak kontrol gerçekleştirir ve sistemi sürekli olarak kontrol etmektedir.

Buna ek olarak devremizde kullandığımız bazı pinleri kolay bir şekilde ölçmek ve kontrol etmek adına dışarıya çıkarılmıştır. Hata pinleri, PWM pinleri, akım, sıcaklık, gerilim okuma pinleri, uart pinleri dışarıya aktarılmıştır. Test point olarak adlandırılan kontrol pinlerinin şematığı Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



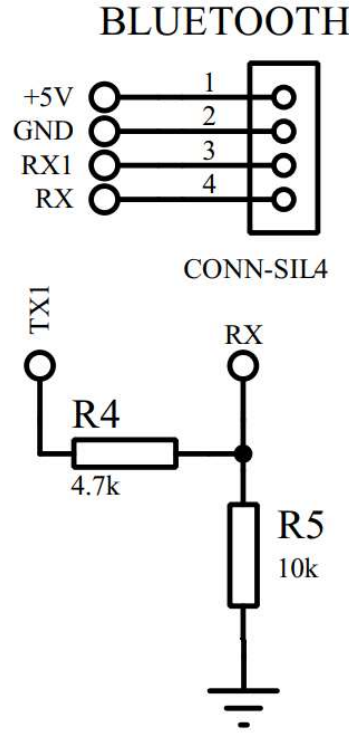
Şekil 3.16 Kontrol pinleri.

Sistemde kullanıcının kontrol işlemlerini yapması için kullanıcı kontrol birimi yapılmıştır. Başlama ve durdurma işlemlerini 2 ayrı buton ile yaparken PWM Duty miktarını da pot ile ayarlayabilmektedir. Bu birimlerin yedekleri de elektronik kart üzerinde mevcuttur. Şekil 3.17’de örnek şematiği gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Kontrol butonları ve ayar potu.

Bu sistemde tasarım yapılırken kullanıcının daha rahat bir kontrol sağlaması ve güvenlik tedbirleri kapsamında uzaktan kontrol edebilme imkânı sağlanmıştır. Elektronik kart üzerinde UART hat girişleri verilmiştir. UART hattına Bluetooth modülü takılabilir bu şekilde uzaktan kontrol ile sistem takibi, verilerin kayıt edilmesi ve sistem kontrolü hedeflenmiştir. Şekil 3.18’de elektronik kartta bulunan ve bluetooth bağlantısı için ayrılan pin gösterilmektedir.

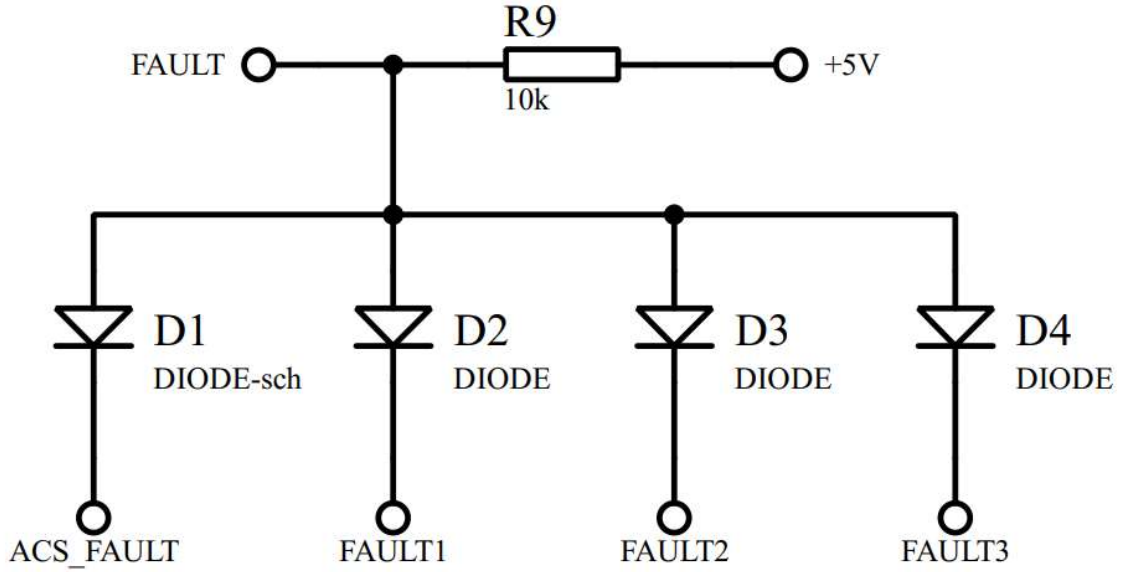


Şekil 3.18 Bluetooth devre şeması.

Interrupt, türkçeye kesinti olarak çevrilen bir terimdir. Bu, yazılımdan veya donanımdan kaynaklanan bir olayın işlenmek üzere işlemciye acilen bildirilmesi gereken "durumlarda" meydana gelir. Bu "durumlar" acil ve kritiktir. İşlemcide devam eden süreçlerin tamamlanmasını bekleyemeyecekleri için beklemeden ele alınmalıdır.

Bir işlemci bir kesme isteği aldığı anda, işini beklemeye alır, gelen kesme için bir işleyici işlevi belirlemek üzere bir tablo kullanır, gerekli işlemeyi gerçekleştirir ve işlem tamamlanıp bir kesinti oluşturuluncaya kadar kesmeyi kendisini oluşturan cihaza geri gönderir. Kısacası öncelikli bir işlem geldiğinde işlemci sürecini durdurur gelen kesintiye inceler ve kaldığı yerden devam eder.

Bu sistemde MCU’da bulunun INT0 (genel interrupt) pinine akım kontrollerini yaptığımız hata uçlarını ekledik. Bu sayede herhangi bir noktadan hata geldiği zamanda sistem interrupt üretecek, kendini otomatik olarak kapatacak ve korumaya alacaktır. Şekil 3.19’da hata kontrol bloğu gösterilmektedir.



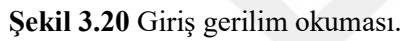
Şekil 3.19 Hata kontrol blok devresi.

3.1.4.1 Gerilim Kontrolü

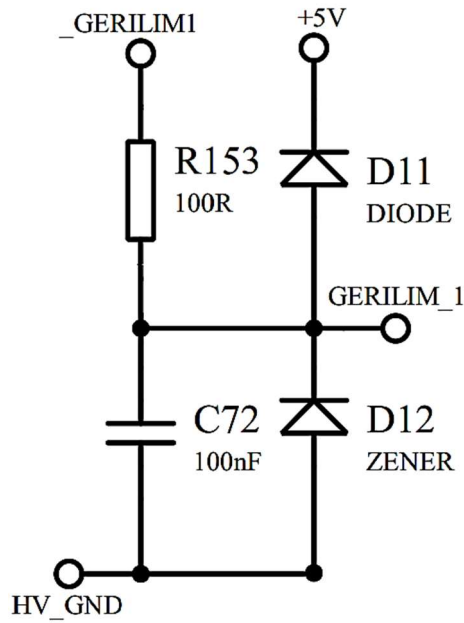
Sistemde belirli gerilim kontrolleri yapılmaktadır. Giriş gerilimi, kullanmış olduğumuz EHT trafolarının gerilimleri ve çıkış gerilimi sürekli kontrol edilmektedir. Bu işlem gerilim bölücü devreler aracılığı ile yapılmaktadır.

Hata olarak kabul ettiğimiz limit değerlerinin dışarısında olması durumunda sistem kendini kapatacak ve korumaya alacaktır.

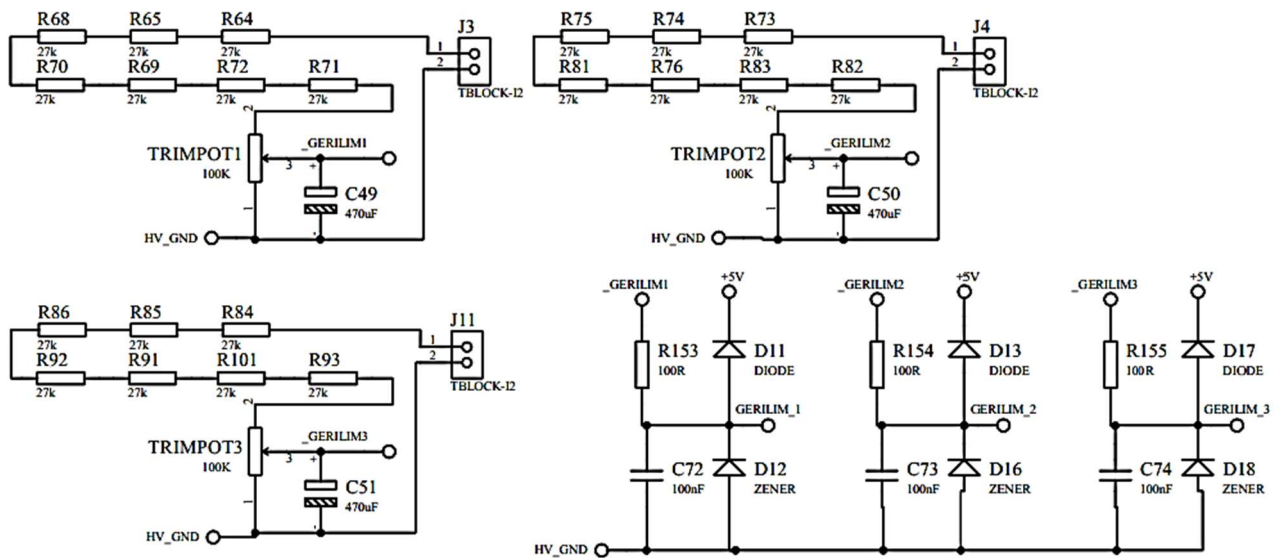
Giriş gerilim okuması Şekil 3.20’de trafo gerilim okuması Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Trafoların gerilim okumaları ve koruyucu devre şematiği Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



80



Şekil 3.22 Gerilim okuması işlemci koruma devresi.

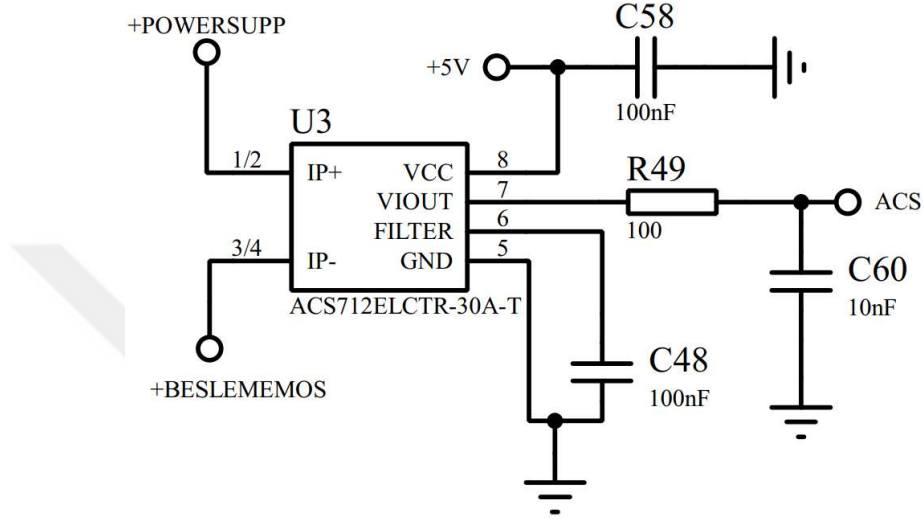


Şekil 3.23 Çıkış gerilim okuması şematiği.

3.1.4.2 Akım Kontrolü

Akım okuma ise bir devreden veya yükten akan elektrik akımı miktarının ölçülmesi veya izlenmesi işlemini ifade eder. Bu genellikle akımı doğru bir şekilde ölçebilen ve analiz için geri bildirim veya veri sağlayabilen akım sensörleri veya ölçüm cihazları kullanılarak yapılır. Mevcut değerlerin gerçek zamanlı izlenmesi mümkündür, bu da anormalliklerin

ve beklenen değerlerden sapmaların tespit edilmesine yardımcı olur. Sistemimizde 2 çeşit akım kontrolü yapılmaktadır. Giriş akımı ölçmek için ACS modülü kullanılmıştır. EHT trafolarının ayrı ayrı akımları ölçmek için şönt direnç kullanılmıştır. Akımlar sürekli olarak okunup kontrol edilmektedir. Giriş akış okumasının şematiği Şekil 3.24’de gösterilmiştir.

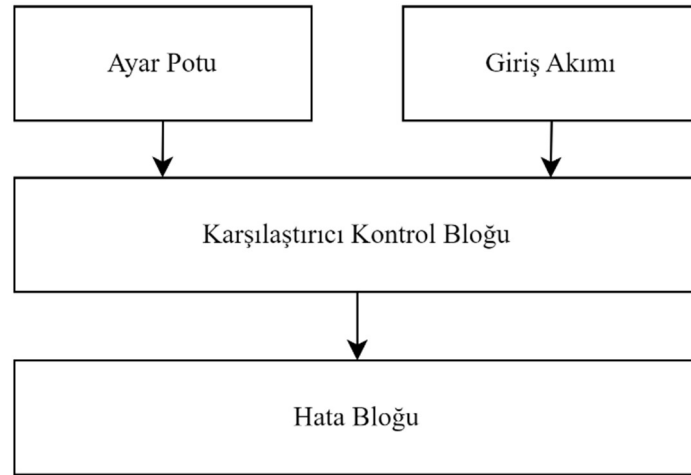


Şekil 3.24 Giriş akımı okuma devresi.

Çizelge 3.3 ACS712ELCTR-30A-T özellikleri.

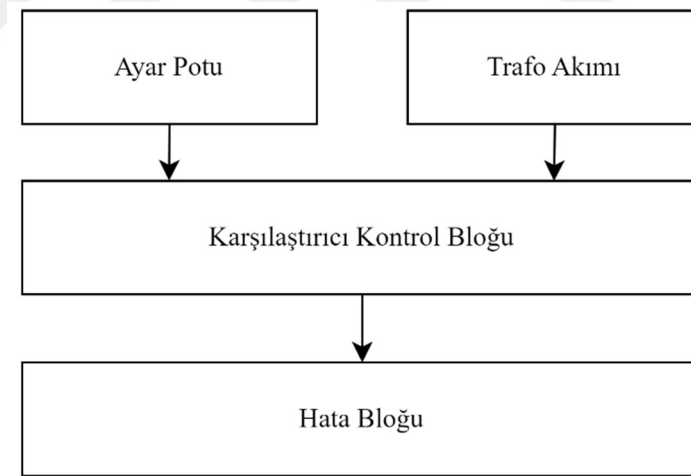
Özellik	Değer
Paket yapısı:	SOIC8
Besleme gerilim:	5V
Besleme akımı:	13mA
Çalışma sıcaklığı:	-40°C~+85°C

Sistemde akımların kontrolü sağlanırken hem yazılımsal hem de donanımsal kontrol sağlanmaktadır. Giriş akımını, pot ve karşılaştırmacı amaçlı opamp entegresi kullanarak kontrol ediyoruz. Ayarladığımız değerden fazla bir akım geçmesi durumunda sistem hata pinini aktif edecek ve arıza moduna geçecektir. Giriş akımı karşılaştırma bloğu Şekil 3.25’te trafo akımı karşılaştırma bloğu şekil 3.26’da gösterilmiştir.



Şekil 3.25 Giriş akımı karşılaştırma bloğu.

EHT trafo akımını, şönt direnç üzerinden gelen değeri daha rahat kontrol edebilmek adına katlayıcı opamp devresine giriyoruz. Yükseltelen bu değeri, pot ve karşılaştırmacı opamp kullanarak kontrol ediyoruz. Ayarladığımız değerden fazla bir akım geçmesi durumunda sistem hata pinini aktif edecek ve arıza moduna geçecektir.

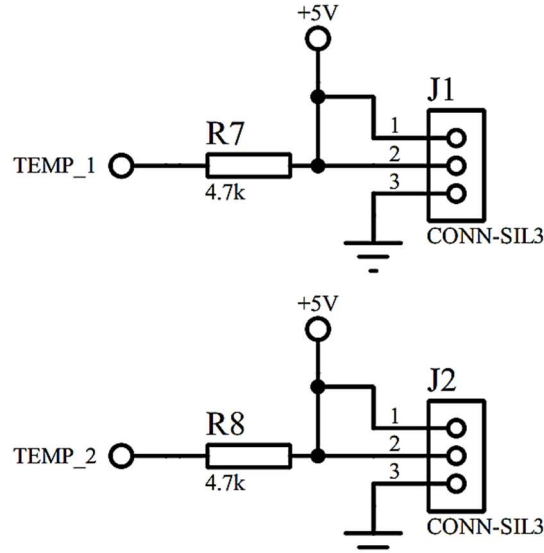


Şekil 3.26 EHT trafo akım karşılaştırma bloğu.

3.1.4.3 Sıcaklık Kontrolü

Termal sensör olarak da bilinen sıcaklık sensörü, ortam sıcaklığını ölçen ve tespit eden bir cihazdır. Amacı, sıcaklığı, sıcaklık ölçümü olarak yorumlanabilecek ve görüntülenebilecek bir elektrik sinyaline dönüştürmektir.

Yaygın olarak kullanılan sıcaklık sensörlerinden biri, yüksek hassasiyetle doğru sıcaklık ölçümleri sağlayan dijital bir termometre olan DS18B20'dir. DS18B20 sıcaklık sensörü, sıcaklık verilerinin daha fazla işlenmesi ve analizi için bir mikro denetleyiciye veya başka bir dijital cihaza kolay bağlantı sağlayan bir dijital çıkışa sahiptir. Bu dijital çıkış sinyalini 'ONEWIRE' kütüphanesi ile okunmuş ve anlamlı hale getirilmiştir. Bu sistemde kullanmış olduğumuz sıcaklık sensörleri sürekli olarak sıcaklık okumaktadır. Belirtilen değerin üzerinde bir sıcaklık olması durumunda sistem kendini kapatıp korumaya alacaktır. Şekil 3.27'de DS18B20 bağlantı şeması gösterilmiştir. Çizelge 3.4'de DS18B20 sensör özellikleri tanımlanmıştır.



Şekil 3.27 Sıcaklık sensör bağlantı şeması.

Çizelge 3.4 DS18B20 özellikleri.

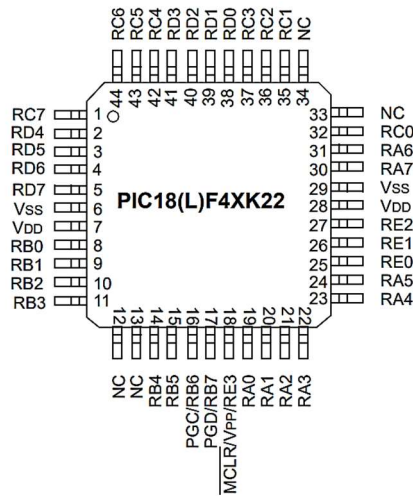
Özellik	Değer
Paket yapısı:	TO92-3
Besleme gerilim:	3V-5.5V
Besleme akımı:	1mA
Sensör hassasiyeti:	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ($-10^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$)
Çözünürlük:	9-12-Bit
Çalışma sıcaklığı:	$-55^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$

3.1.5 MCU

"MCU" terimi, mikrodenetleyiciler için yaygın olarak kullanılan bir kısaltmadır. Mikrodenetleyiciler tüketici elektroniğinden endüstriyel otomasyona kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Mikrodenetleyici, mikroişlemci çekirdeğini bellek ve çevre birimleriyle birleştiren ve elektronik bir sistemde belirli bir görevi gerçekleştirmek üzere tasarlanmış entegre bir devredir. Bu sistemde "Microchip Technology Inc." tarafından geliştirilen PIC18 mikro denetleyici ailesinde bulunan PIC18F46K22 işlemcisi kullanılmıştır. PIC18F46K22 özellikleri çizelge 3.5'te, pin şeması Şekil 3.28'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 PIC18F46K22 Özellikleri.

Özellik	Değer
Paket yapısı:	TQFP44/10x10mm
Hafıza tipi:	Flash
Hız:	64 Mhz
Program hafıza boyutu:	64KB (32K x 16)
Ram boyutu:	3.8KB
EEPROM boyutu:	1KB
I/O sayısı:	35
Besleme gerilim:	2.3V-5.5V
Çalışma sıcaklığı:	-40°C~+85°C

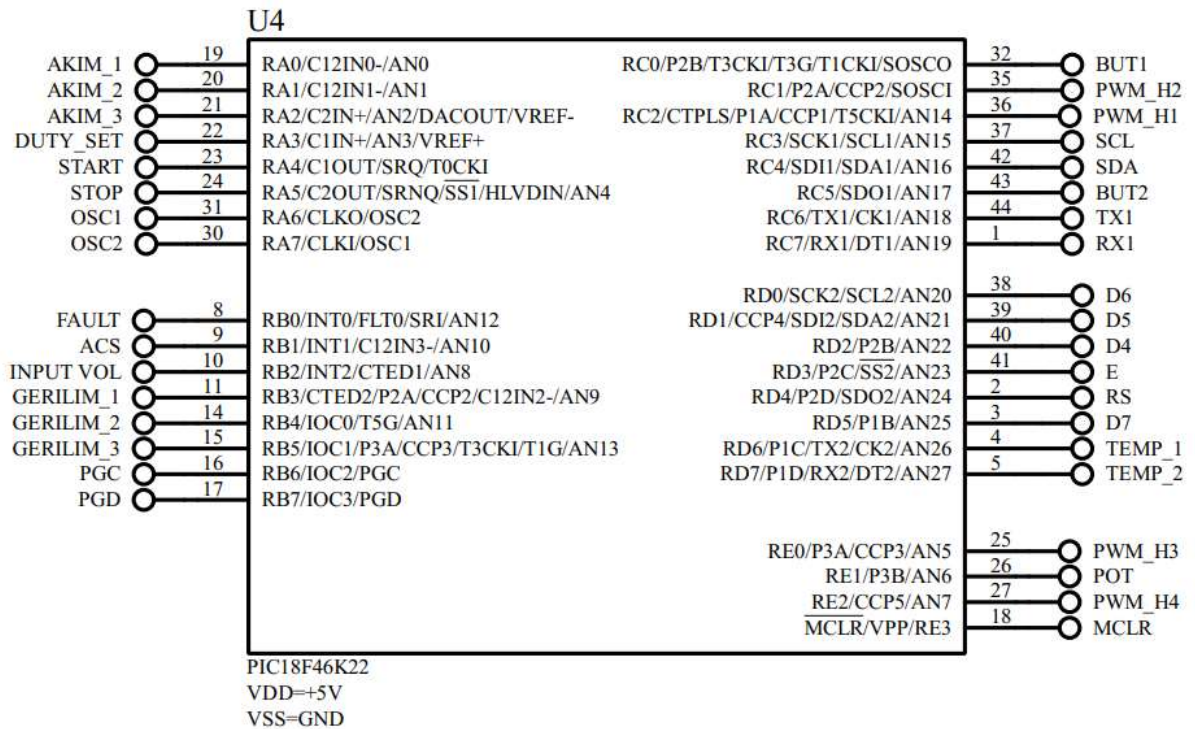


Şekil 3.28 PIC18F46K22 pin şeması.

Bu sistemde kullanılan PIC18F46K22 işlemcisi ile;

- 3 adet EHT trafo akım okuması analog pin üzerinden yapıldı.
- 3 adet EHT trafo gerilim okuması analog pin üzerinden yapıldı.
- 1 adet Giriş gerilim okuması analog pin üzerinden yapıldı.
- 1 adet Giriş akımı okuması analog pin üzerinden yapıldı.
- INT0 pini kullanılarak donanımsal hata pini oluşturuldu ve öncelik verildi.
- Başlama, durma ve 2 adet yedek olmak üzere 4 adet buton dijital pin kullanıldı.
- Duty ayarlamak için ve 1 adet yedek olmak üzere 2 adet analog pin kullanıldı.
- 2 adet Sıcaklık okuması dijital pin üzerinden yapıldı.
- LCD için dijital pinler kullanıldı.
- Bluetooth ya da seri haberleşme için RX, TX pinleri kullanıldı.
- SCL – SDA pinleri kullanıldı.

Şekil 3.29’da MCU bağlantı şeması gösterilmiştir.



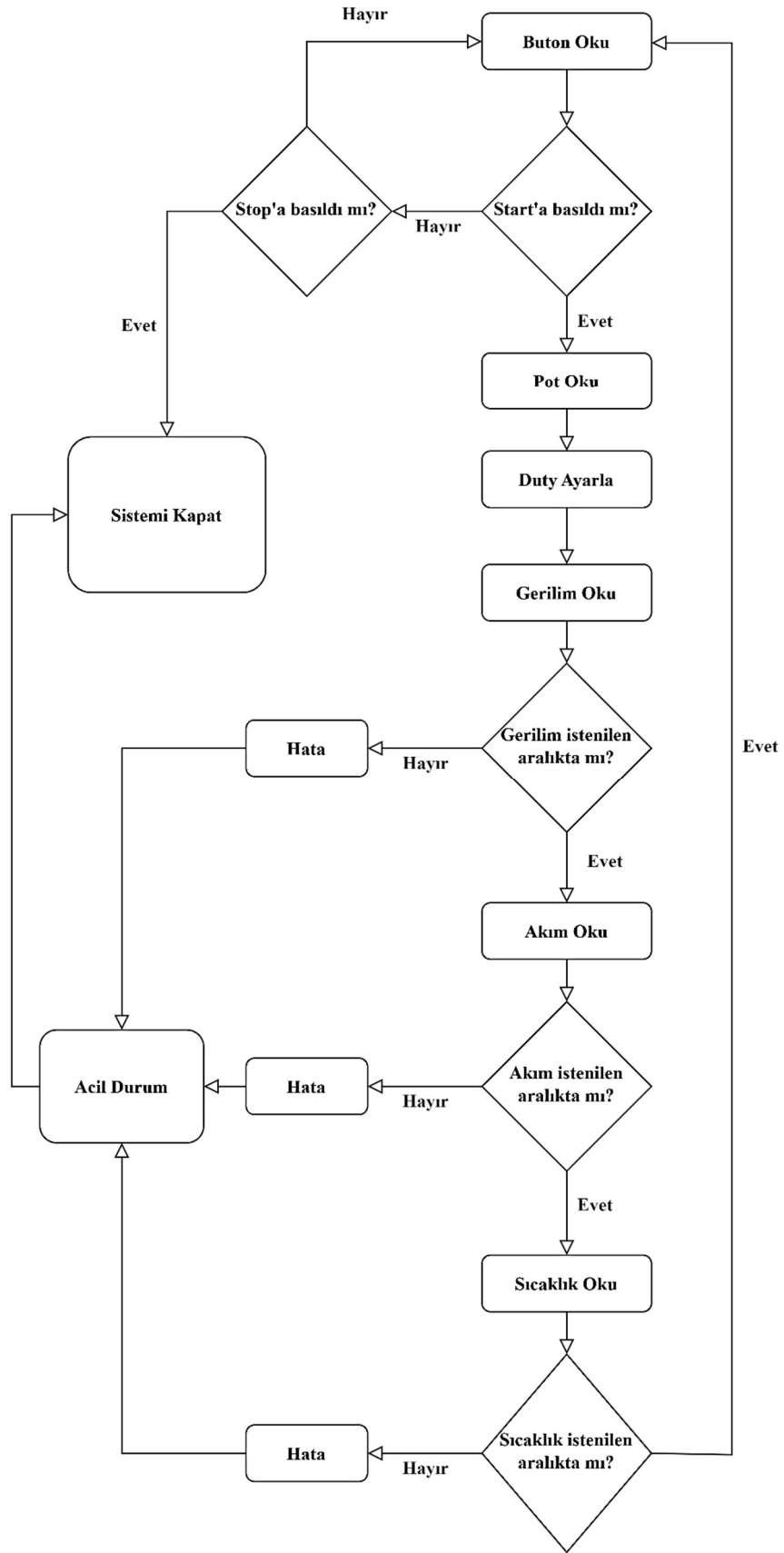
Şekil 3.29 MCU bağlantı şeması.

3.1.6 Algoritma

Algoritma, bir sorunu çözmek veya belirli bir görevi gerçekleştirmek için kullanılan adım adım prosedür veya kurallar dizisidir. Karmaşık operasyonların verimli ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlayan hassas ve sistematik bir yaklaşımdır. Algoritmalar süreçleri kolaylaştırmak ve performansı optimize etmek için kullanılır. Döngüler programlama ve hesaplama mantığında temel bir yapıdır. Döngüler, tekrarlanan görevleri otomatikleştirmek, veri yapıları üzerinde yineleme yapmak ve program yürütme akışını kontrol etmek için kullanılır. Yaygın döngü türleri arasında for döngüleri, while döngüleri ve do-while döngüleri bulunur. Bunların her biri farklı bir amaca hizmet eder ve algoritma ve program tasarımında esneklik sağlar.

Gerilim, akım ve sıcaklık kontrolü elektrik sistemlerinin temel unsurlarıdır. Gerilim regülasyonu, bir devredeki potansiyel farkının istenen aralıkta kalacak şekilde ayarlanmasını içerir. Akım düzenlemesi, bir devre boyunca yük akışını belirli bir seviyede tutarak kontrol etmeyi içerir. Sıcaklık kontrolü, aşırı ısınmayı önlemek için sistemin sıcaklığının izlenmesini ve ayarlanmasını içerir. Hata kontrolü, doğruluk ve güvenilirlik için çaba gösteren sistem ve süreçlerde kritik bir bileşendir genel sistem performansını iyileştirmek için hata kontrol mekanizmaları uygulanır. Bu mekanizmalar hata tespit kodlarını, hata düzeltme kodlarını ve hata kurtarma tekniklerini içerebilir.

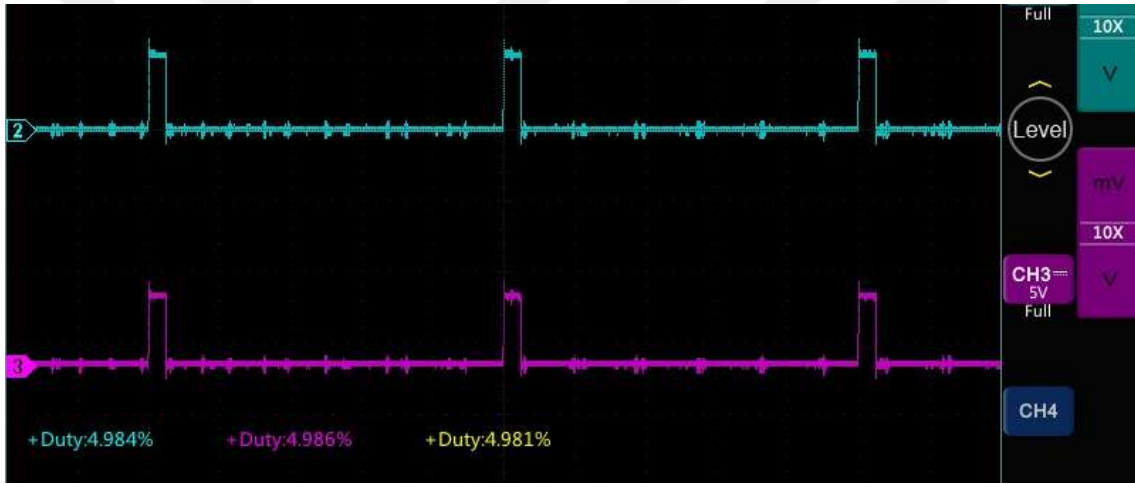
Sistemimizde döngüler üzerinde sürekli olarak çalışan bir kontrol algoritması mevcuttur. Bu sistemde ilk olarak buton durumlarına bakılır ve sistemin çalışma durumu kontrol edilir. Sistem çalışıyor ise kullanıcının belirlediği pot üzerinden değer okuması yapılır. Okunan bu değer anahtarlama yapmak için duty miktarını temsil eder. Duty miktarı ayarlanır ve gate driver aracılığıyla MOSFET'lere aktarılır. MOSFET'ler anahtarlanmaya başladığında trafolarda akım ve gerilim oluşmaktadır. Gerilim, akım ve sıcaklık değerleri anahtarlama esnasında sürekli olarak kontrol edilir ve önceden tespit edilen güvenlik sınırları ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda limitlerin dışında bir durum olması durumunda donanımsal ve yazılımsal olarak hata oluşturulur. Bu hata MCU'nun INT0 pinine aktarılır ve kesme (interrupt) oluşturularak sistemin kapatılması sağlanır. Daha sonra kullanıcıya bilgi verilir ve güvenli bir şekilde cihazın kullanılması sağlanır. Sistemin çalışma mantığı ve yazılım algoritması Şekil 3.30'da verilmiştir.



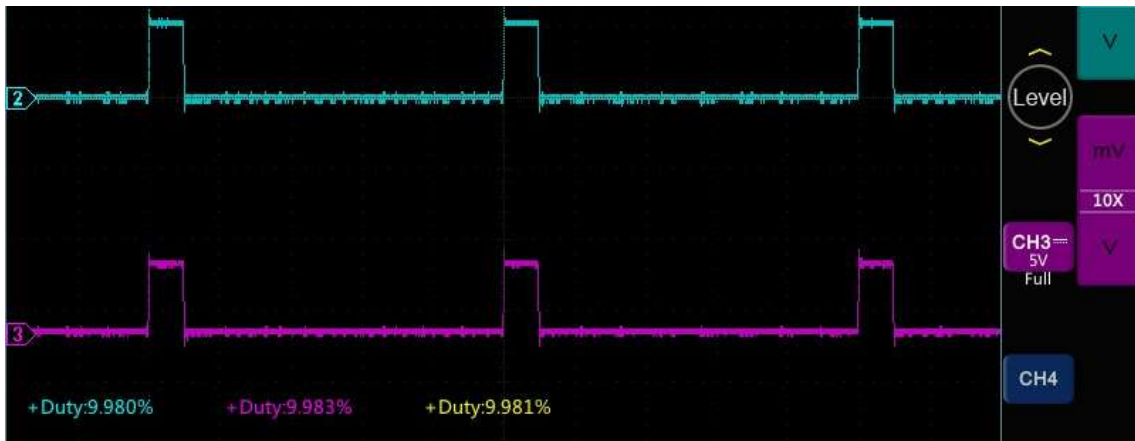
Şekil 3.30 Algoritma şeması.

4. BULGULAR

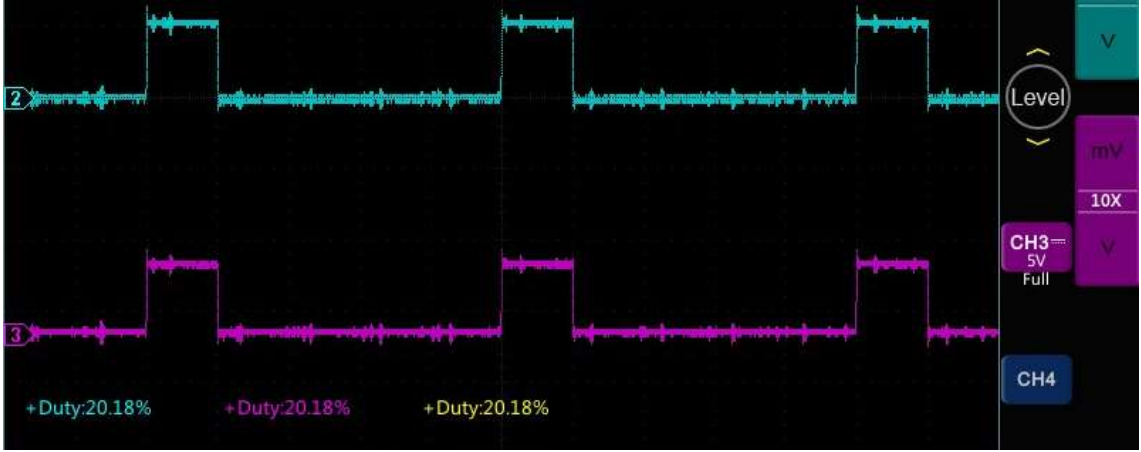
Cihaz simülasyonlar ve tasarım ışığında üretilmiş ve denenmiştir. Laboratuvar ortamında devre kartının kontrolleri sağlandığında ilk olarak gerilim katmanının sorunsuz bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Devre kartı üzerinden çeşitli PWM sinyalleri üretilerek işlemci üzerinden kontrol edilmiştir. Daha sonra gate driver üzerinde ve MOSFET tarafında PWM sinyali kontrol edilmiştir. Şekil 4.2’de daha açık bir şekilde görüldüğü gibi oluşan PWM sinyallerinde gürültü olduğu ve filtreleme yapılması gerektiği tespit edildi. Bu gürültünün kaynağının besleme katmanında kullanılan “Buck Converter” tarafında oluştuğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 %5 Duty PWM sinyali.

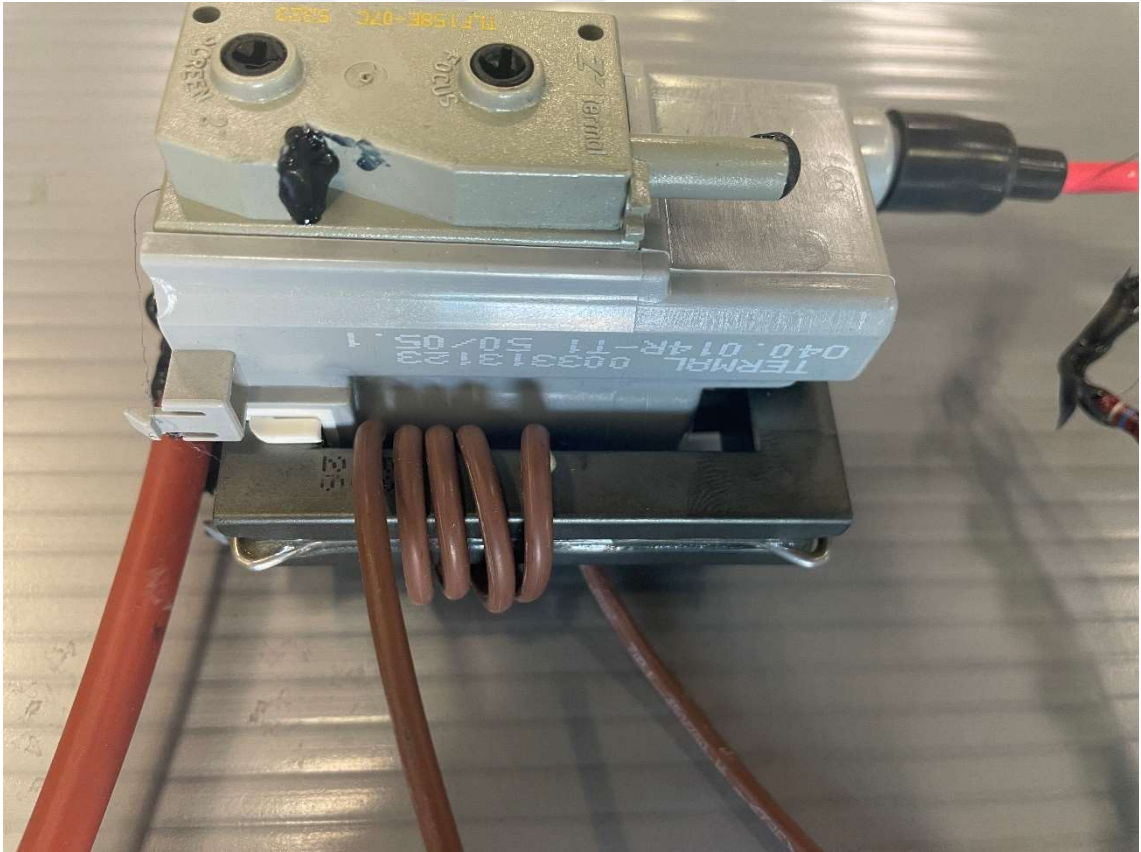


Şekil 4.2 %10 Duty PWM sinyali.



Şekil 4.3 %20 Duty PWM sinyali.

Üretilen PWM sinyalleri Şekil 4.4’te yer alan EHT trafosuna çeşitli sarım oranlarıyla uygulanmıştır. Yapılan denemeler sonucunda trafo sisteminin karakteristiği çıkarılmıştır.



Şekil 4.4 EHT trafosu ve sarım şekli.

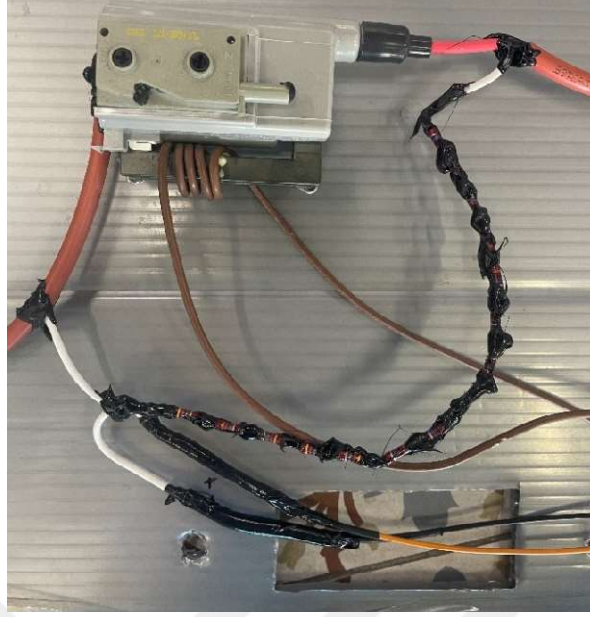
Çizelge 4.1’de kullanılan EHT trafosunun karakteristik bilgilerini görebilirsiniz.

Çizelge 4.1 EHT trafosunun karakteristiği.

Giriş Gerilimi	Sarım Sayısı	Duty Oranı (%)	Çıkış Gerilimi (kV)	Çıkış Akımı (A)
24	4	5	13,6	0,26
24	5	5	12,5	0,215
24	6	5	11,5	0,18
24	7	5	10,5	0,15
24	8	5	9,4	0,13
24	8	10	16,7	0,23
24	7	10	18,5	0,26
24	6	10	21,1	0,341
24	5	10	24,4	0,44
24	4	10	27,7	0,59
24	4	15	37,5	0,95
24	5	15	30,7	0,6
24	6	15	26,5	0,486
24	7	15	23	0,376
24	8	15	20,2	0,302
24	8	20	22,8	0,681
24	7	20	25,8	0,8
24	7	25	26,4	2,5
24	8	25	24	2,1

Yukarıdaki değerler incelendiğinde yüksek gerilim değeri ve uygun akım noktasına bakıldığı zaman “%10 duty” kullanarak “5 tur sarım” yapıldığında sistem için en optimal aralık olduğu gözlemlenmiştir.

EHT trafosundan elde edilen yüksek gerilimin kontrol edilebilmesi için devre kartına geri dönüş vermesi gerekmektedir. Bu sebeple devre kartında yüksek gerilim olmaması adına gerilim bölücü oluşturulmuş ve bu şekilde gerilim okunmuştur. Şekil 4.5’te EHT trafosu ve gerilim bölücü tarafı gösterilmiştir.



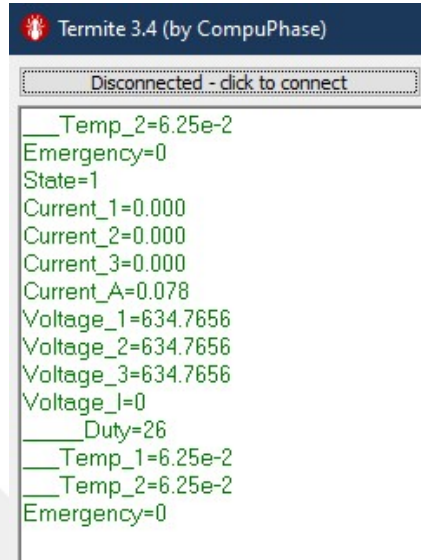
Şekil 4.5 EHT trafosu ve gerilim bölücü sistemi.

Sistemin çıkışında yüksek gerilim olduğu için uygun dirençlerin seçilmesi gerekmektedir. Yaklaşık olarak 125 mohm a 1mOhm luk bir gerilim bölücü yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda oluşturulan gerilim bölücünün katlama oranının “147.3” olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.6’da çıkış gerilimi (19.89 kV) ve gerilim bölücünden devreye gelen gerilim miktarı (135 V) gösterilmiştir.



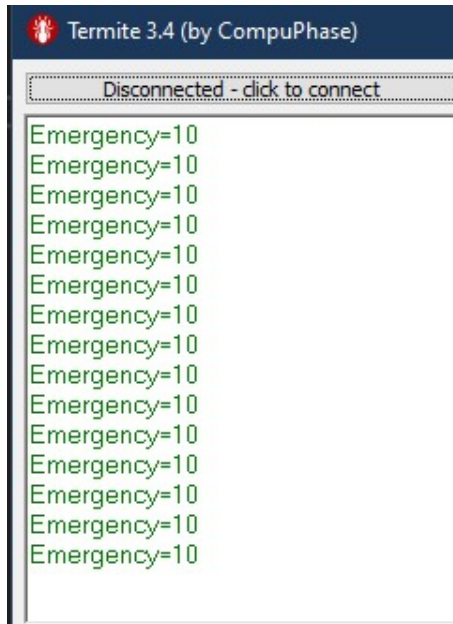
Şekil 4.6 EHT trafosu çıkış gerilimi ve gerilim bölücü çıkış gerilimi.

Devre kartının UART hattı TTL aracılığı ile kullanılmış ve sistem üzerinden anlık olarak bilgiler gözlemlenmiştir. Şekil 4.7’de sisteme dair haberleşme verileri gösterilmiştir.

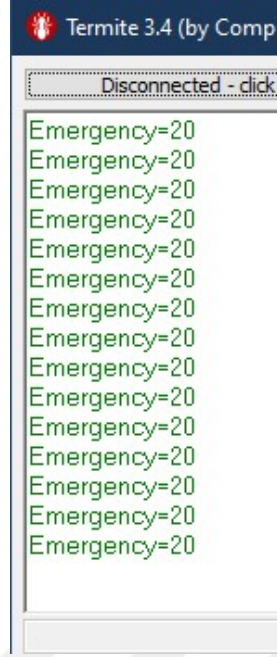


Şekil 4.7 Haberleşme verileri.

Koruma devreleri test edildiği esnada yazılımsal ve donanımsal olarak akım, gerilim ve sıcaklık değerinin belirtilen limitlerden fazla olması durumunda sistem kendisini kapatmış ve acil durum verisi göndermiştir. Şekil 4.8’ de fazla akım sınırı, Şekil 4.9’da fazla gerilim sınırı bilgilendirmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Fazla akım acil durum bilgilendirmesi.



Şekil 4.9 Fazla gerilim acil durum bilgilendirmesi.

Çizelge 4.2’de oluşturulan hata kodları listesi gösterilmektedir.

Çizelge 4.2 Hata kodları listesi.

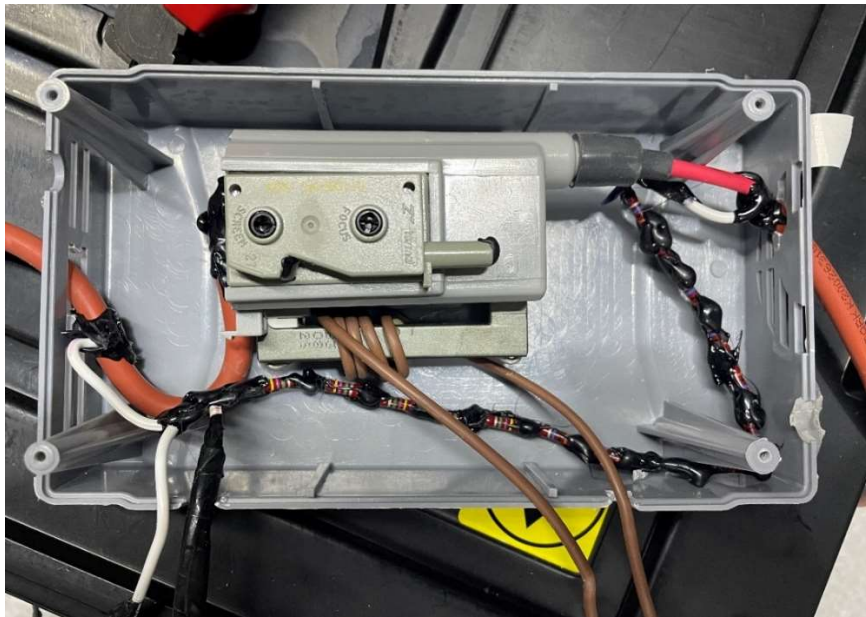
Hata Kodu	Açıklama
10	Giriş akımından fazla akım geçti.
11	Trafo 1 akımından fazla akım geçti.
12	Trafo 2 akımından fazla akım geçti.
13	Trafo 3 akımından fazla akım geçti.
20	Giriş geriliminden fazla gerilim geçti.
21	Trafo 1 geriliminden fazla gerilim geçti.
22	Trafo 2 geriliminden fazla gerilim geçti.
23	Trafo 3 geriliminden fazla gerilim geçti.
30	Donanımsal “Fault” pini aktif oldu.
41	Sıcaklık 1’den fazla sıcaklık geçti.
42	Sıcaklık 2’den fazla sıcaklık geçti.
99	Kullanıcı acil stop verdi.

Sistem verilerinin anlık olarak kontrolü için Şekil 4.10’da gösterilen kullanıcı arayüz programı geliştirilmiştir.



Şekil 4.10 Kullanıcı arayüz programı.

Sistem test edilirken yüksek gerilim 30kV üzerine çıktığı esnada EHT trafosu üzerinde atlamalar meydana gelmiştir. Bu noktada izolasyon gerekliliği tespit edilmiştir. Özellikle EHT trafosunun iç kısmında ve gerilim bölücü tarafında atlamalar meydana gelmiştir. Şekil 4.12’de gösterildiği gibi trafolar kutu içerisine yerleştirilmiştir, izolasyon amacı ile silikon kullanılmıştır ve izolasyon malzemesi (reçine) dökülmüş ve sistem kapatılmıştır.



Şekil 4.11 EHT trafo kutusu.

Sistem izolasyonu tamamlandıktan sonra sıcaklık, gerilim, akım kontrolleri tekrar test edilmiştir. Korumaların düzgün bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. Sistem genel hatlarıyla hazır olduğu düşünülmüş ve ark işlemi için + ve – kısımları birbirine yaklaştırılmıştır. Sistemin ark oluşturduğu gözlemlenmiş ve Şekil 4.12’de üretilen ark, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’te ark üretiminden önce ve ark üretim esnasında elde edilen değerler gösterilmiş, karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4.12 Ark oluşumu.

Çizelge 4.3 Ark üretiminden önce oluşan değerler.

Materyal	Giriş Gerilimi	Çıkış Gerilimi	Akım Değeri
Trafo 1	24 V	20,41 kV	0,368 A
Trafo 2	24 V	20,24 kV	0,364 A
Trafo 3	24 V	20,35 kV	0,366 A
Sistem	24 V	20,33 kV (ortalama)	1,1 A

Çizelge 4.4 Ark üretim esnasında oluşan değerler.

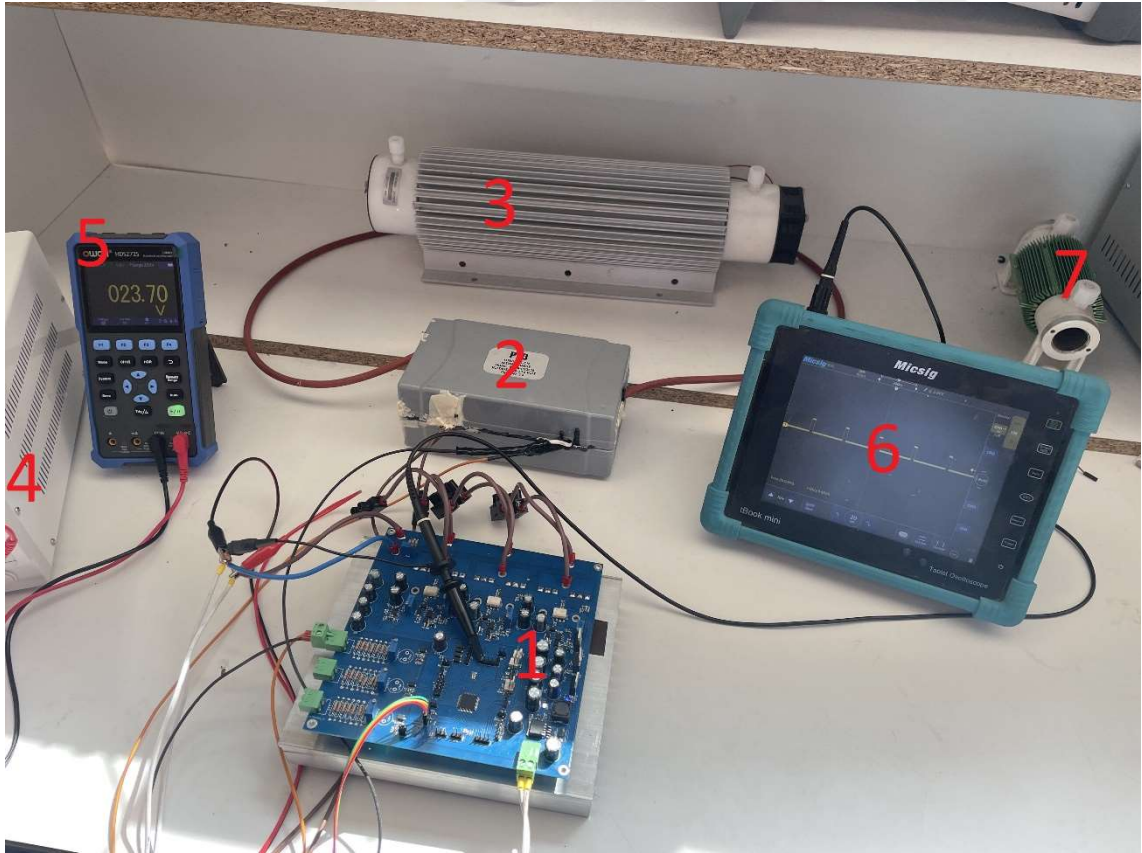
Materyal	Giriş Gerilimi	Çıkış Gerilimi	Akım Değeri
Trafo 1	24 V	10,88 kV	0,690 A
Trafo 2	24 V	10,80 kV	0,682 A
Trafo 3	24 V	10,84 kV	0,687 A
Sistem	24 V	10,85 kV (ortalama)	2,1 A

Sistemden gelen verilere bakıldığında ark üretimi esnasında gerilimin yaklaşık olarak %47 azaldığını ve akım miktarının yaklaşık olarak %50 arttığı gözlemlenmiştir. Devre kartı üzerinde bulunan MOSFET’lerde sıcaklık artışı tespit edilmiş ve soğutucu blok yerleştirilmiştir. Ark oluşumu esnasında GND hattında gürültülerin olduğu, haberleşme bağlantısının koptuğu, verilerin karıştığı tespit edilmiştir.

Bu noktada EHT trafolarından gerilim bölücü ile sisteme gelen gerilimi izolasyon trafosu ile okuması sağlanabilir, çeşitli filtreler yapılarak sistem geliştirilebilir.

Sistem test ortamı hazırlanmış ve Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Şekile bakıldığı zaman;

- 1 numara ile gösterilen kısımda kontrol devresi,
- 2 numara ile gösterilen kısımda reçine ile kaplanmış EHT trafosu,
- 3 numara ile gösterilen kısımda ozon oluşturmak için gereken tüpü,
- 4 numara ile gösterilen kısımda güç kaynağını,
- 5 numara ile gösterilen kısımda giriş voltajını multimetre ile ölçüldüğü,
- 6 numaralı kısımda oluşan PWM sinyallerini gözlemlemek için osiloskop kullanılmıştır.



Şekil 4.13 Test ortamı.

Gereken test ortamı oluşturulduktan sonra çeşitli frekans değerleri ile testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler esnasında %10 duty kullanılmış olup trafo sarım oranı 5 olarak sabitlenmiştir.

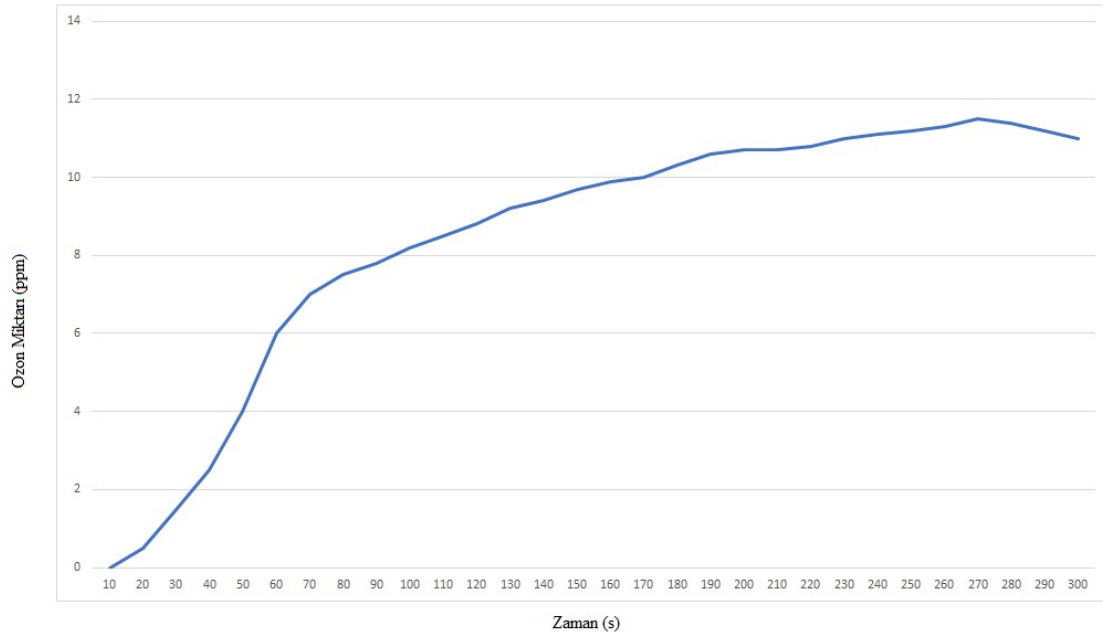
Çizelge 4.5 Frekansa göre oluşan değerler.

Frekans	Duty	Giriş Gerilimi	Çıkış Gerilimi	Akım Değeri
5000	%10	24 V	29 kV	2,5 A
7500	%10	24 V	27,7 kV	2,2 A
10000	%10	24 V	30,34 kV	1,3 A
12500	%10	24 V	30,66 kV	1,8 A
15000	%10	24 V	28 kV	1 A
17500	%10	24 V	15 kV	1,4 A
20000	%10	24 V	23,8 kV	0,75 A
22500	%10	24 V	13,8 kV	1,5 A
25000	%10	24 V	9,5 kV	1,1 A
30000	%10	24 V	17,2 kV	0,5 A
40000	%10	24 V	3,9 kV	0,8 A

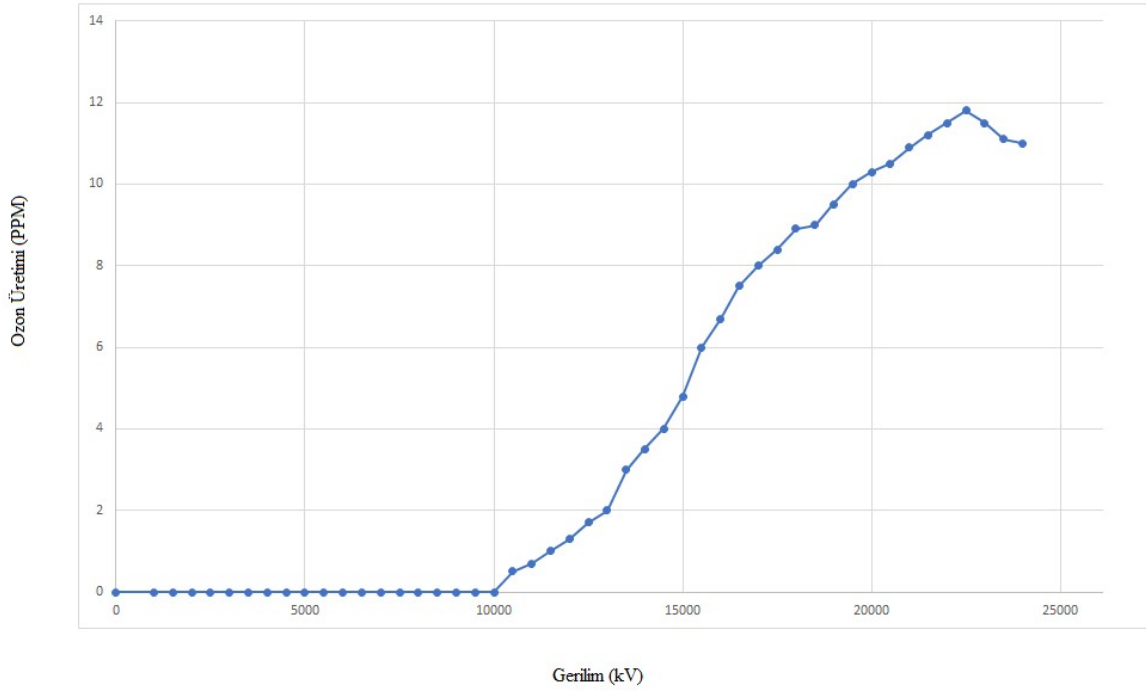
Sistemden gelen verilere bakıldığında frekans değerinin trafo üzerinde çeşitli etkileri olduğu tespit edilmiştir. Bu veriler incelendiğinde frekansın 20kHz uygulandığı esnada daha uygun bir sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Test ortamında kullanılan ölçüm sistemine bağlı olarak ozon üretim miktarı 24 kV uygulandığı esnada 1 trafo için ortalama 11ppm şeklinde ölçülmüştür elde edilen veriler Şekil 4.14’ve Şekil 4.15’te gösterilmiştir.

Referans ölçüm cihazı Şekil 4.16’da ve referans cihaz özellikleri çizelge 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Ölçüm değerleri.



Şekil 4.15 Ölçüm değerleri.



Şekil 4.16 Referans ölçüm cihazı.

Çizelge 4.6 Referans ölçüm cihazı özellikleri.

Materyal	Değer
Ozon ölçüm aralığı	0-50 ppm
Ozon ölçüm çözünürlüğü	0.001 ppm
Ozon ölçüm sensör tipi	Elektrokimya
Nem ölçüm aralığı	20-85% RH
Nem ölçüm çözünürlüğü	0.1 RH
Sıcaklık ölçüm aralığı	-10 ~ 50 °C
Sıcaklık ölçüm çözünürlüğü	0.1 °C

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Ozon gazının iyonize olduğu ve yüksek reaktif hale geldiği bir maddenin durumu ozon plazması olarak adlandırılır. Bu plazma, yüksek enerjili bir elektrik deşarjına maruz kalan ozon gazından oluşan ozon iyonları ve serbest radikallerden oluşur. Güçlü oksitleyici özellikleri nedeniyle, tehlikeli mikroorganizmaları ve kirletici maddeleri etkili bir şekilde ortadan kaldıracaktır. Ozon plazması, tıp, su arıtma ve endüstriyel işlemler gibi çok çeşitli alanlarda kullanılabilir.

Ozon gazını üretmek için özel olarak tasarlanmış bir cihaz ozon jeneratörü olarak bilinir. Oksijen moleküllerini ozon moleküllerine dönüştürmek için elektroliz, korona deşarjı veya ultraviyole radyasyon gibi birçok farklı yöntem kullanır. Daha sonra üretilen ozon, hava temizleme, koku giderme ve dezenfeksiyon gibi birçok amaç için kullanılabilir. Ozon jeneratörleri, hava kalitesini iyileştirmek ve istenmeyen kokuları ortadan kaldırmak için kimyasal içermeyen etkili bir çözümdür.

Ozon jeneratörlerindeki elektronik topolojilerin akademik olarak çeşitli çalışmalara ve bilimsel değerlendirmelere göre analiz etmek, bunların farklılıklarını anlamak, performanslarını ve çevresel etkilerini optimize etmek gerekmektedir.

Geri dönüş, yarım köprü ve tam köprü dönüştürücüler arasındaki elektronik topoloji farklılıkları, devre konfigürasyonlarında ve çalışma özelliklerinde yatmaktadır. Geri dönüş dönüştürücü, enerjiyi girişten çıkışa aktarmak için bir transformatör kullanan bir tür izole edilmiş güç kaynağıdır. Basitliği ve uygun maliyetli olması nedeniyle düşük güçlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Yarım köprü dönüştürücü ise iki anahtar ve bir transformatörden oluşur ve geri dönüş dönüştürücüye kıyasla daha yüksek güç seviyelerine ve gelişmiş verime olanak tanır.

Son olarak, tam köprü dönüştürücü dört anahtar ve bir transformatör kullanarak, voltaj regülasyonu ve güç faktörü düzeltilmesi açısından daha da yüksek güç seviyeleri ve daha iyi performans sağlar.

Akademik araştırmalar incelendiğinde bu topolojilerin çeşitli uygulamalar için kullanıldığı görölmektedir. Yüksek enerjili uygulamalar için tam köprü topolojisinin, düşük enerjili uygulamalar için ise flyback topolojisinin kullanıldığı görölmüştür. En yüksek ozon üretiminin dielektrik bariyer metoduyla üretildiği incelenmiştir. Güvenilirlik ve izolasyon açısından flyback topolojisinin tercih edildiği, tam köprü topolojisinin en yüksek maliyete sahipken flyback topolojisinin en düşük maliyete sahip olduğu görölmüştür.

Üretim hacmindeki dezavantajların yanı sıra çeşitli avantajlara sahip olduğu için akademik çalışmalarda son zamanlarda flyback topolojisi ile çalışmaların arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.1 Akademik topoloji karşılaştırma tablosu.

Referans	Topoloji	Gerilim	Frekans	Ozon Üretimi
Zainal Salam, 2013, Design and implementation of a low cost, high yield dielectric barrier discharge ozone generator based on the single switch resonant converter	Full-Bridge DBD	3.5 kV	27.5 kHz	3800
Siseerot Ketkaew, 2007, The Case Study of 5 kHz – 25 kHz High Frequency Adjustment in Converter Circuit to Generate Ozone Gas	High Volt Transformer	3 kV	25 kHz	153
Anuwat Singhapuntu, 2016, The Study of Ozone Generator by Corona Discharge with High Voltage High Frequency Technique	Flyback	20 kV	10 kHz	7.58
Roberto Diaz, 2001, High Frequency Ozone Generation System	High Frequency Pulse	1 kV	12.2 kHz	3158
Siseerot Ketkaew, 2020, High Density Cold Corona Generator For Increase Oxygen In Water Storage	Flyback	3.15 kV	15 kHz	5.7
Yapılan Uygulama	Flyback	24 kV	20 kHz	11

Akademik çalışmaların yanı sıra piyasada birçok alanda kullanılmak üzere çeşitli ozon jeneratörleri vardır.

Çizelge 5.2 Piyasa cihazların özelliklerinin karşılaştırma tablosu.

Özellik	O3Elite Single Ozone Generator	O3Elite Dual Ozone Generator	Stratus 2.0 Ozone Generator	Önerilen Sistem
Fiyat	\$899.00	\$1295.00	\$1215.00	\$300.00
Ağırlık	1,5 kg	1,8 kg	1,2 kg	3 kg
Giriş Gerilimi	110-240 VAC	110-240 VAC	110-240 VAC	24 VDC
Tüketim	360 W	480 W	240 W	15W
Kontrol	Cihaz üzerinde	Cihaz üzerinde	Cihaz üzerinde	Cihaz üzerinde / Uzaktan
Kablosuz Haberleşme	Yok	Yok	Yok	Var
Veri Kaydı	Yok	Yok	Yok	Var

Ozon üretme sistemi muadil ürünlere göre farklılık göstermektedir. Bu sistemde kullanılan EHT trafo topolojisine bakıldığı zaman muadil cihazlardan farklı olarak DC gerilim ile çalıştığı için sistem gözle görülür bir şekilde enerji tüketiminde avantajlı ve daha verimli olduğu gözlenmiştir. Kontrol kapsamında muadil ürünlere bakıldığında hem cihaz üzerinden hem de uzaktan kontrol sağlanmaktadır. Diğer cihazlardaki gibi kontrol ve güvenlik durumları sadece cihaz üzerinde olmadığından uzaktan bağlantı ile sisteme müdahale edilebilmektedir, buda kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Aynı şekilde muadil cihazlarda olmayan verilerin kayıt edilebilmesi ve anlık olarak izlenebilmesi kullanıcı açısından kolaylık sağlamak ve cihaz hakkında daha çok bilgi vermektedir.

Ağırlık ve ölçü bakımından muadil ürünler daha avantajlı olmaktadır. Burada kullanılan EHT trafodan dolayı hem boyutlar hem de ağırlık çok daha yüksek olmaktadır ve sistemin dezavantajı haline gelmektedir. Burada amaca göre özel sistem üretilirse ölçüler ve ağırlık bakımından da uygun hale gelecektir.

Maliyet açısından, cihazın tasarımı ve üretimi yerli sermaye kullanılarak yapıldığından, mevcut rakipleri ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 1/4 oranında daha ucuz olacaktır.

Bu oran seri üretim halinde 1/6 oranına düşecektir. Bu durumda hem üretim maliyetleri hem de iç ekonomiye katacağı katma değer açısından oldukça yüksek bir avantaj sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu sistemin üretilmesi için yaptığımız araştırma geliştirme çalışmaları sonucunda geliştirilen sistemin ozon üretimi için gerekli koşulları sağladığı, daha dayanıklı olduğu ve daha az enerji tükettiği belirlenmiştir. Aynı zamanda diğer çalışmalara göre kullanıcılar açısından daha uygun ve kullanışlı olduğu anlaşılmıştır. Devre yapısını korumaya yönelik sistem güvenilirliği artırılmıştır. Sisteme uzaktan kontrol edilebilecek şekilde bir altyapı oluşturarak veri kaydetme ve raporlama gibi fonksiyonlar eklenmiştir.

Günümüzde kullanımı ve yapımı yaygınlaşan ozon cihazı için birçok uygulama ve araştırma yapılmıştır. Bu araştırmada yerli, maliyeti düşük ve kullanışlı bir cihaz olması amacıyla yapılmıştır. Yurt dışından gelen maliyeti yüksek, tüketimi yüksek ve ömrü kısa olan ürünlerin yerini alabilecek kalite ve performansta olan cihazın laboratuvar test işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uzaktan kontrol ve veri kaydı sayesinde rakiplerine kıyasla test koşullarında kullanılıp rapor verebilecektir. Uzaktan kontrol edilebilmesiyle de oluşabilecek herhangi bir hayati tehlikenin gerçekleşmemesi sağlanmıştır.

Gelecek çalışmalarda yapılabilecek iyileştirme ve eklemeler;

- Cihaz tasarımı yapılırken ağırlık ve ölçü olarak daha kullanışlı hale getirilmesi sağlanabilir.
- Uygun aparatlar kullanılarak laboratuvar ortamının dışında birden çok alanda kullanımı gerçekleştirilebilir.
- Uzaktan kontrol ve kullanıcı arayüz kısımları güncellenerek test sistemi haline getirilebilir.
- Daha yüksek gerilim seviyelerine çıkartılabilir.
- Anlık olarak üretilen ozon miktarı gösterilebilir.
- Kullanıcıya çıkış gerilimini seçmesi için arayüz programında yüzdelik periyotlarla istediği enerji seviyesini seçmesi sağlanabilir.
- Çeşitli filtreler kullanılarak gürültü azaltması sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Açikel S M, Kaygusuz M, 2018, Plazma Yüzey Modifikasyonu İle Tekstil Ve Derideki Uygulamalar, 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, 865-880.
- Adler S, Scherrer M, Daschner F D, 1998, Costs of low-temperature plasma sterilization compared with other sterilization methods, Journal of Hospital Infection, 40, 125-134.
- Akan T, 2016, DC Glow Deşarj Plazmaları Ve Teknolojide Bazı Uygulamaları.
- Akishev Y, Grushin M, Karalbek V, Trushkin N, Kholodenko V, Chugunov V, Kobzev E, vd, 2008, Atmospheric-pressure, nonthermal plasmasterilization of microorganisms in liquids and on surfaces, Pure Appl. Chem., 80, 1953-1969.
- Aktop S, 2016, Soğuk Plazma Tekniğinin Et Ürünlerindeki Bazı Patojenler Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi.
- Chang J S, Lawless P A, Yamamoto T, 1991, Corona Discharge Processes, IEEE Transactions on plasma science, 19.
- Choi S, Lee H S, Kim S, Hong SH, 2009, Thermal Plasma Analysis for the Pyrolysis of PFCs on a Large Scale, Journal of the Korean Physical Society, 55, 1819-1824.
- Dinçmen M, 2017, Multifunctional Finishing Of Textiles By Plasma Treatment, Ph.D. Thesis.
- Dobrynin D, Wasko K, Friedman G, Fridman A, Fridman G, 2011, Cold Plasma Sterilization of Open Wounds: Live Rat Model, Plasma Medicine, 2, 109-114.
- Doğan T, 2017, Fotokatalitik Kaplama Yapılan Reaktör İle Dielektrik Bariyer Deşarjı Yapılarak Sulardan Diklofenak Giderimi.
- Du C, Gong X, Lin Y, 2019, Decomposition of volatile organic compounds using corona discharge plasma technology, Journal of the Air & Waste Management Association.
- Ekimci G D, Özdemir M A, Yeşilkaya B, Unay M, Ercan U K, Akan A, 2018, Plazma Deşarjı Sırasında Ortaya Çıkan Akustik Verilerin İşlenmesi ve Karakterizasyonu, IEEE.

- Gadri R B, Roth J R, Montie T C, Winterberg K K, Tsai Y, Helfritsch J, Karakaya Fuat vd., 2000, Sterilization and plasma processing of room temperature surfaces with a one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP), *Surface and Coatings Technology*, 131, 528-542.
- Geyter N D, Morent R, 2012, Nonthermal Plasma Sterilization of Living and Nonliving Surfaces, *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 14, 255-274.
- Giao T N, Jordan J B, 1968, Modes of Corona Discharges in Air, *IEEE transactions on power apparatus and system*, 87.
- Guangming Huang, 2016, Dielectric Barrier Discharges For Ozone Generation
- Han L, Patil S, Boehm D, Milosavljevic V, Cullen P J, Bourke P, 2015, Mechanisms of Inactivation by High-Voltage Atmospheric Cold Plasma Differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, *Appl Environ Microbiol*, 82, 450-458.
- Han L, Ziuzina D, Heslin C, Boehm D, Patange A, Sango D M, Valdramidis V P, Cullen P J, Bourke P, 2016, Controlling Microbial Safety Challenges of Meat Using High Voltage Atmospheric Cold Plasma, *frontiers in microbiology, Microbiol*, 7, 977.
- Hashim S S, 2012, Design an Atmospheric Pressure Non-Thermal Plasma Device for Killing Bacteria, Msc. Thesis.
- Hayashi N, Nakashima T, Yonesu A, 2011, Sterilization of Medical Equipment Using Air Torch Plasma Produced by Microwave Discharge, *IEEE Transactions on plasma science*, 39.
- Itarashiki T, Hayashi N, Yonesu A, 2014, Sterilization effect of nitrogen oxide radicals generated by microwave plasma using air, *Vacuum*, 110, 213-216
- Kandemir H, Kandemir F A, Güler B, Gürel A, 2020, Soğuk Plazma Teknolojisi ve Tarımdaki Çeşitli Uygulama Alanları, *Bursa Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 35, 217-245.
- Karthik Palanisamy, Rajasundrapandiyanleebanon.T and Ashok Rangaswamy, 2013, A Study on Transformer Less Full Bridge Inverter for Ozone Generator, *International Conference on Computer Communication and Informatics*

- Kasih T P, 2007, Development of Novel Potential of Plasma Polymerization Techniques For Surface Modification, Ph.D. Thesis.
- Kostov K G, Rocha V, Koga-Ito C Y, Matos B M, Algatti M A, Honda R Y, Kayama M E, Mota R P, 2010, Bacterial sterilization by a dielectric barrier discharge (DBD) in air, *Surface & Coating Technology*, 204, 2954-2959.
- Lerouge S, Wertheimer M R, Yahia L H, 2001, Plasma Sterilization: A Review of Parameters, Mechanisms, and Limitations, *Plasmas and Polymers*.
- Masaoka S, 2007, Plasma Sterilization of Polyethylene Terephthalate Bottles by Pulsed Corona Discharge at Atmospheric Pressure, *Biocontrol Science*, 12, 59-63.
- Mohamed El Hanash, Mohamed I. Youssef, Magdy M. Zaky, 2023, A proposed optimized equivalent circuit and performance analysis of dielectric barrier discharge ozone generator, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*
- Moisan M, Barbeau J, Crevier M C, Pelletier J, Philip N, Saoudi B, 2002, Plasmasterilization. Methods and mechanisms, *Pure Appl. Chem*, 74, 349-368.
- Mok C, Puligundla P, 2012, Microwave and radio-frequency powered cold plasma applications for food safety and preservation, *Advances in Cold Plasma Applications for Food Safety and Preservation*.
- Mutlu M, Sen Y, 2012, Sterilization of Food Contacting Surfaces via Non-Thermal Plasma Treatment: A Model Study with Escherichia coli-Contaminated Stainless Steel and Polyethylene Surfaces, *Food Bioprocess Technol*, 6, 3295–3304.
- Özdemir A, 2021, Soğuk Atmosferik Plazma ve Kanser, Ankara Science University, Researcher
- Reçber D, Kayserilioğlu B, Koçum İ C, Serdaroğlu D Ç, 2018, Medikal Plazma Tabanlı Mikrocerrahi Cihazında Donanımsal Özellikler ve Yapılandırılma, *Tıp Tekno'18*.
- Reeves E A, Barton D C, Fitzpatrick D P, Fisher J, 2000, Comparison of gas plasma and gamma irradiation in air sterilization on the delamination wear of the ultra-high molecular weight polyethylene used in knee replacements, *Institution of Mechanical Engineers*.

- Sakudo A, Yagyu Y, Onodera T, 2019, Disinfection and Sterilization Using Plasma Technology: Fundamentals and Future Perspectives for Biological Applications, International Journal of Molecular Sciences.
- Sakudo A, Higa M, Maeda K, Shimizu N, Imanishi Y, Shintani H, 2013, Sterilization mechanism of nitrogen gas plasma: induction of secondary structural change in protein Microbiol Immunol, 57, 536-542.
- Sharma A, Sharma S K, 2020, Sterilization of Microorganisms Contaminated Surfaces and its Treatment with Dielectric Barrier Discharge Plasma, Indian National Academy of Engineering, 5, 321–326.
- Siseerot Ketkaew 2007, The Case Study of 5 kHz – 25 kHz High Frequency Adjustment in Converter Circuit to Generate Ozone Gas
- Sung S J, Huh J B, Yun M J, Chang B M W, Jeong C M, Jeon Y C, 2013 , Sterilization effect of atmospheric pressure non-thermal air plasma on dental instruments, J Adv Prosthodont, 5, 2-8.
- Tanino M, Xilu W, Takashima K, Katsura S, Mizuno A, 2007, Sterilization using Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure, International Journal of Plasma Environmental Science & Technology, 1.
- Tsai-Fu Wu, Ling-Chia Yu and Jou-Wen Chen, 2019, Design and Implementation of Ozone Generators with Area-graph Method to Model DBD Chamber, International Conference on Power Electronics
- Umair M, Jabbar S, Nasiru M M , Sultana T, Senan A M, Awad F N, Hong Z, Zhang J, 2019, antibiotics, 8, 235.
- Victor Phoa, Hariyono Rakhmad, 2020, Cold Plasma Generator Using Economical High Frequency High Voltage Flyback Transformer With Straight and L-Shaped Needles, Advances in Social Science, Education and Humanities Research,
- Wang H, Zhang L, Luo H, Wang X, Tie J, Renb Z, 2019, Sterilizing Processes and Mechanisms for Treatment of Escherichia coli with Dielectric-Barrier Discharge Plasma, Applied and Environmental Microbiology.

Winterberg K K , Sherman D M, Karakaya F, Gadri R B, vd, 2000, Air Filter Sterilization Using a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (the Volfilter), IEEE Transactions On Plasma, 28.

Yun G, Miao H, 2011, The sterilization of Escherichia coli by dielectric-barrier discharge plasma at atmospheric pressure, Applied Surface Science, 257, 7065-7070.

İnternet Kaynakları

1- https://www.st.com/content/ccc/resource/sales_and_marketing/promotional_material/new_sletter/group0/21/17/50/02/5e/1d/49/a2/Wurth_Transformer_2018_Milan/files/Wurth_Transformer_2018_Milan.pdf/jcr:content/translations/en.Wurth_Transformer_2018_Milan.pdf, 20.04.2023

2- <https://www.ti.com/lit/ml/slup127/slup127.pdf>, 10.05.2023

3- <https://www.ti.com/seclit/ug/slyu036/slyu036.pdf>, 15.05.2023

4- <https://cds.cern.ch/record/987498/files/p13.pdf>, 02.06.2023

5- https://www.fujielectric.com/products/semiconductor/model/power_supply/tool/box/pdf/Fly-Back_transformer_Design_Rev_1_0_E.pdf, 05.06.2023

6- <https://www.infineon.com/dgdl/an-1024.pdf?fileId=5546d462533600a401535591115e0f6d>, 07.06.2023

7- https://www.ti.com/lit/ml/slua618a/slua618a.pdf?ts=1700645580871&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, 10.06.2023

8- https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Gate_drive_for_power_MOSFETs_in_switchtin_applications-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c80027ecd0180467c871b3622, 12.06.2023