

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İKİ KATLI YÜKSELTİCİ TİP DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE  
UYGULAMASI**

**İSMAİL SÖYLEMEZ**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**




**İKİ KATLI YÜKSELTİCİ TİP DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE**  
**UYGULAMASI**

**İSMAİL SÖYLEMEZ**

**Dr. Öğr. Üyesi Tarık ERFİDAN**  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Birol ARİFOĞLU**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

**Prof. Dr. Mehmet BAYRAK**  
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi

.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 17.01.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü ile iki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün giriş akım dalgalılığı, çıkış gerilim dalgalılığı karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmamda hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, büyük özveri ve sabır ile beni teşvik eden ve çalışmalarımda beni yönlendiren danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Tarık ERFİDAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca görüşleri ile çalışmalarına katkıda bulunan, karşılaştığım her zorlukta zamanını, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen müdürüm Elk.Müh.Özgür BİLİZ'e, çalışma arkadaşlarım Elk.Müh.Hüseyin Cemre YILMAZ'a ve İlyas HALKEVİ'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın tüm aşamalarında gerek maddi gerek manevi desteğini esirgemeyen dayım Av.Ümit ÇETİN'e, Doç.Dr.Cenker ATILA'ya, arkadaşlarım Umut AKAR'a, Koray YILDIZ'a, Volkan TÜRKSOY'a, Mak.Müh.Halil ARAZ'a ve Engin BİLGE'ye ayrıca teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana güç veren en büyük destekçilerim, her aşamada sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan sevgili babam Halil SÖYLEMEZ, annem Satu SÖYLEMEZ ve kardeşim Z. İmge SÖYLEMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Ocak – 2020

İsmail SÖYLEMEZ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT .....	x
GİRİŞ .....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Literatür Taraması ve Özeti.....	4
1.2. Tezin Amacı ve Genel Yapısı .....	6
2. DOĞRU AKIM DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ VE SINIFLANDIRILMASI.....	8
3. KLASİK YÜKSELTİCİ TİP DOĞRU AKIM DÖNÜŞTÜRÜCÜLER .....	10
3.1. Çalışma Prensibi.....	10
3.2. Dönüştürücülerin Çalışma Modları .....	13
3.2.1. Süreksiz iletim modu.....	13
3.2.2. Sürekli-süreksiz iletim arasındaki kritik çalışma modu .....	14
3.2.3. Sürekli iletim modu .....	15
3.3. Devre Elemanlarının Belirlenmesi .....	15
3.3.1. Kritik endüktans değerinin belirlenmesi .....	15
3.3.2. Kritik kondansatör değerinin belirlenmesi .....	17
3.3.3. Anahtarlama güç elemanının ve diyotun seçim kriterleri.....	19
3.4. Dalgalılık Değerlerinin Hesaplanması .....	19
3.4.1. Giriş akımı dalgalılığının hesaplanması .....	20
3.4.2. Çıkış gerilimi dalgalılığının hesaplanması .....	20
4. İKİ KATLI YÜKSELTİCİ TİP DÖNÜŞTÜRÜCÜ .....	21
4.1. Kullanım Alanları ve Amaçları .....	21
4.2. Çalışma Prensibi.....	22
4.3. İki Katlı Yükseltici Tip Dönüştürücülerde Akım Paylaşımı .....	22
4.3.1. Anahtar paralelleme .....	22
4.3.2. Dönüştürücü paralelleme.....	23
4.3.3. Güç katı paralelleme.....	23
4.3.4. Faz farklı güç katı paralelleme .....	24
4.4. İki Katlı Yükseltici Tip Dönüştürücülerde Dalgalılık Değerlerinin Hesaplanması.....	24
4.4.1. Giriş akımı dalgalılığının hesaplanması .....	25
4.4.2. Çıkış gerilimi dalgalılığının hesaplanması .....	26
4.5. Klasik ve İki Katlı Yükseltici Tip Dönüştürücü Arasındaki Farklar.....	26
4.6. Devre Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi ve Benzeşim Çalışması .....	27
4.6.1. Seçilen parametreler .....	27
4.6.2. Matematiksel hesaplamalar .....	28
4.6.2.1. Endüktans değerinin hesaplanması .....	28
4.6.2.2. Kondansatör değerinin hesaplanması .....	29

4.6.2.3. Maksimum ve minimum bobin akımı değerlerinin hesaplanması .....	30
4.6.3. Anahtarlama güç elemanının ve diyotun belirlenmesi .....	31
4.6.4. Benzeşim sonuçları.....	32
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	39
5.1. Uygulama Devresi Tasarımı .....	39
5.1.1. Besleme devresi.....	39
5.1.2. Kontrol devresi tasarımı .....	40
5.1.2.1. STM32F103C8T6 mikrodnetleyicisi.....	40
5.1.2.2. STM32F103C8T6 mikrodnetleyicisi ile PWM sinyalinin üretilmesi .....	41
5.1.3. Sürücü devresi tasarımı .....	44
5.1.4. Güç devresi tasarımı .....	44
5.2. Baskı Devre Çizimleri .....	45
5.3. Deneysel Sonuçlar .....	45
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	51
KAYNAKLAR .....	53
EKLER .....	56
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	73

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Doğru akım dönüştürücü sistemi .....	8
Şekil 3.1.	Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü.....	10
Şekil 3.2.	Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü anahtar iletimde .....	11
Şekil 3.3.	Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü anahtar kesimde .....	12
Şekil 3.4.	Yükseltici tip da-da dönüştürücünün tetikleme sinyali, giriş akımı (endüktans akımı) ve çıkış geriliminin zamana göre değişimi .....	13
Şekil 3.5.	Doğru akım dönüştürücünün süreksiz iletim modunda tetikleme sinyali ve giriş akımının (endüktans akımı) zamana göre değişimi.....	14
Şekil 3.6.	Doğru akım dönüştürücünün sürekli-süreksiz arasındaki kritik çalışma modunda tetikleme sinyali ve giriş akımının (endüktans akımı) zamana göre değişimi.....	14
Şekil 3.7.	Doğru akım dönüştürücünün sürekli çalışma modunda tetikleme sinyali ve giriş akımının (endüktans akımı) zamana göre değişimi.....	15
Şekil 3.8.	Yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devre şeması .....	16
Şekil 4.1.	N katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü yapısı .....	24
Şekil 4.2.	(a) Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde tetikleme sinyallerinin, (b) her bir katın bobin akımlarının ve (c) toplam giriş akımının zamana göre değişimi .....	25
Şekil 4.3.	Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün tetikleme sinyali, giriş akımı ve çıkış geriliminin zamana göre değişimi.....	33
Şekil 4.4.	2 katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün her bir katı için ayrı ayrı anahtarlama sinyalleri.....	35
Şekil 4.5.	2 katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün her bir katı için ayrı ayrı endüktansların akımları ve toplam giriş akımı .....	35
Şekil 4.6.	2 katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün çıkış gerilim değerinin zamana göre değişimi .....	36
Şekil 4.7.	Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde giriş akımı dalgalanmasının doluluk-boşluk oranına göre değişimi .....	37
Şekil 4.8.	Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde çıkış gerilimi dalgalanmasının doluluk-boşluk oranı ve paralellenmiş güç katı sayısına göre değişimi.....	38
Şekil 5.1.	Program akış şeması.....	43
Şekil 5.2.	CubeMx programında faz farklı PWM üretme programı .....	43
Şekil A.1.	Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinin KiCad programında şematik çizimi .....	57
Şekil B.1.	Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinde 12V ve 5V besleme devreleri tasarımları.....	58

Şekil C.1.	STM32F103C8T6 geliştirme kartının pin konfigürasyonu .....	59
Şekil D.1.	CubeMx programında mikrodenetleyici seçimi.....	60
Şekil E.1.	CubeMx programında sistem konfigürasyonu.....	61
Şekil F.1.	CubeMx programında yüksek hızlı clock sinyali konfigürasyonu.....	62
Şekil G.1.	CubeMx programında üretilen 72MHz'lik clock sinyali konfigürasyonu.....	63
Şekil H.1.	CubeMx programında timer-1 konfigürasyonu .....	64
Şekil I.1.	CubeMx programında PWM sinyallerinin oluşturulması .....	65
Şekil J.1.	CubeMx programında pin konfigürasyonu .....	66
Şekil K.1.	Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinde sürücü entegresi devre şeması.....	67
Şekil L.1.	Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü güç devresi şeması.....	68
Şekil M.1.	Çok katlı yükseltici tip baskı devre tasarımı üst ve alt bakır kat şeması.....	69
Şekil N.1.	Çok katlı yükseltici tip baskı devre PCB ön ve arka yüz.....	70
Şekil O.1.	ACS 712 akım sensörünün giriş akımına karşı ürettiği çıkış gerilimi değerleri.....	71

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 4.1.	Klasik tip ve çok katlı (N) doğru akım dönüştürücüsü .....	27
Tablo 4.2.	Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü parametreleri .....	28
Tablo 4.3.	IRFZ44N mosfet'i için gerekli değerler.....	32
Tablo 5.1.	LM7805 gerilim regülatörünün genel özellikleri .....	40
Tablo 5.2.	STM32F103C8T6 geliştirme kartının genel olarak özellikleri.....	41
Tablo 5.3.	TLP251 optokuplör entegresi genel özellikleri.....	44
Tablo 5.4.	ACS 712 akım sensörü genel özellikleri.....	46





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\eta$	: Verim
$\tau$	: Giriş akımı dalgalanma süresi, (s)
$\tau_{ON}$	: Giriş akımı doluluk süresi, (s)
$\Delta I$	: Akım dalgalılığı, (A)
$\Delta I_L$	: Endüktans üzerindeki akım dalgalılığı, (A)
$\Delta V$	: Gerilim dalgalılığı, (V)
$\Delta V_c$	: Kondansatör üzerindeki gerilim dalgalılığı, (V)
$C$	: Kondansatör değeri, (F)
$C_c$	: Kritik kondansatör değeri, (F)
$D$	: Doluluk-boşluk oranı
$f_s$	: Anahtarlama frekansı, (Hz)
$I_c$	: Kondansatör akımı, (A)
$I_{D,max}$	: Maksimum diyot akımı, (A)
$I_i$	: Giriş akımı, (A)
$I_{i,max}$	: Giriş akımı maksimum değeri, (A)
$I_L$	: Endüktans akımı, (A)
$I_{L1}$	: L1 endüktansından akan akım değeri, (A)
$I_{L2}$	: L2 endüktansından akan akım değeri, (A)
$I_{L2}$	: L2 endüktansından akan akım değeri, (A)
$I_c$	: Kondansatör akımı, (A)
$L$	: Endüktans değeri, (H)
$L_c$	: Kritik endüktans değeri, (H)
$N$	: Paralel bağlanmış güç katı sayısı
$P_o$	: Çıkış gücü, (W)
$q$	: Giriş akımı doluluk-boşluk oranı
$R_{yük}$	: Yük direnci, ( $\Omega$ )
$T_s$	: Anahtarlama periyodu, (s)
$t_{off}$	: Anahtarlama elemanının kapatma süresi, (s)
$t_{on}$	: Anahtarlama elemanının açma süresi, (s)
$V_{gate}$	: IGBT kapı gerilimi, (V)
$V_i$	: Giriş gerilimi, (V)
$V_{i,rms}$	: Giriş geriliminin RMS değeri, (V)
$V_L$	: Endüktans gerilimi, (V)
$V_o$	: Çıkış gerilimi, (V)

### Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
BJT	: Bipolar Junction Transistor (İki Kutup Jonksiyonlu Transistör)
CPU	: Central Processing Unit (Merkezi İşlem Birimi)
DA	: Doğru Akım

DC	: Direct Current (Doğru Akım)
DSP	: Digital Signal Processing (Dijital Sinyal İşleme)
EV	: Electric Vehicle (Elektrikli Araç)
GFD	: Güç Faktörü Düzeltme
GKD	: Güç Katsayısı Düzeltme
GTO	: Gate Turn Off Transistor (Kapıdan Tıkanabilen Transistör)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Edilmiş Kapılı İki Kutuplu Transistor)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör)
PCB	: Printed Circuit Board (Baskılı Devre Plakası)
PFC	: Power Factor Correction (Güç Katsayısı Düzeltme)
PV	: Photovoltaic (Fotovoltaik)
PWM	: Pulse Width Modulation (Sinyal Genişlik Modülasyonu)
SCR	: Silicon Controlled Rectifiers (Silikon Kontrollü Doğrultucular)
SMPS	: Switch Mode Power Supply (Anahtarlamaalı Güç Kaynağı)

## İKİ KATLI YÜKSELTİCİ TİP DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI VE UYGULAMASI

### ÖZET

Güç elektroniği alanında gerçekleşen gelişmelerle birlikte, devre kayıplarının azaltılması, verimliliklerinin artırılması, özellikle 100W üzeri güçlerde maliyetin ve boyutların düşürülmesi hedeflenmektedir. Devrelerdeki kayıpların azalması, yüksek verimler elde edilebilmesi ve boyutlarının küçülebilmesi için, etkin anahtarlama frekansını arttırmak ve anahtarlama elemanının akımını azaltmak gerekmektedir. Klasik yükseltici DA dönüştürücülerde anahtarlama frekansının artırılması, pasif devre elemanlarının boyutlarının küçülmesini sağlar, fakat anahtarlama kayıpları artmaktadır. Anahtarlama elemanı akımını azaltmak için, toplam giriş akımı birden fazla anahtarlama elemanına paylaşılır. Birden fazla anahtarlama elemanı kullanılarak ve anahtarlama sinyalleri arasında faz farkı oluşturularak; giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılığının azalması, devre elemanlarında meydana gelen kayıpların azalması, yüksek verimler elde edilmesi, boyutlarının küçülmesi, etkin anahtarlama frekansının artması ve tüm anahtarlama elemanlarının akımlarının azalması mümkündür. Faz farklı anahtarlama sinyaline sahip, birden fazla anahtarlama elemanı kullanabilmek için güç katının paralellenmesi gerekmektedir. Çok katlı yapının dezavantajı ise devrede bulunan anahtarlama elemanı sayısının artmasıdır. Anahtarlama elemanlarında, yüksek güç ve yüksek anahtarlama frekansında oluşan kayıplar devrenin verimliliğini düşürmektedir.

Bu çalışmada, 25 kHz anahtarlama frekansına sahip, klasik doğru akım dönüştürücüsü ile etkin anahtarlama frekansı 50 kHz olan ve katlar arasında  $180^\circ$  faz farklı anahtarlama sinyaliyle kontrol edilen, iki katlı yapı benzeşim ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çok Katlı Yükseltici Dönüştürücü, DA-DA Dönüştürücü, Yükseltici Dönüştürücü.

## **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF TWO-LAYERED BOOST TYPE DC-DC CONVERTER**

### **ABSTRACT**

Associated with the developments in the field of power electronics, it is targeted to reduce circuit losses, increase their efficiency, reduce costs and dimensions, especially for power over 100W. In order to reduce the losses in the circuits and to obtain high efficiency, to reduce circuit dimensions it is indispensable to increase the effective switching frequency and reduce the current of the switching element. Increasing the switching frequency in conventional boost DC converters reduces the size of the passive circuit elements, however increases the switching losses. In an effort to reduce the switching element current, the total input current is distribute into several switching elements. By using more than one switching element and creating a phase difference between the switching signals; it is feasible to reduce the input current and output voltage fluctuations, decrease the losses occurring in the circuit elements, obtain high efficiency, reduce size, increase the effective switching frequency and reduce the currents of all switching elements. In order to use more than one switching element with different phase switching signals, the power layers should be paralleled. The disadvantage of multi-layers structure is that the number of switching elements in circuit increases. In switching elements, losses in high power and high switching frequency reduce circuit efficiency.

In this study, the conventional DC converter and two-layer structured with a switching frequency of 25 kHz, which has an effective switching frequency of 50 kHz and controlled by  $180^\circ$  phase different switching signal between the layers, is compared analogically and experimentally.

**Keywords:** Interleaved Boost Converter, DC-DC Converter, Boost Converter.

## GİRİŞ

Güç elektroniğinin görevi, tüketici yüklerine optimal olarak ayarlanmış bir biçimde gerilim ve akım sağlayarak elektrik enerjisi akışını işlemek ve kontrol etmektir. Güç elektroniği sistemlerindeki güç girişi genellikle 1 ya da 3 fazlı olarak 60 ya da 50 Hz'lik bir hat frekanslı elektrik şebekesinden gelmektedir. Son yıllarda, güç elektroniği alanında anahtarlama güç elemanı teknolojisi büyük bir gelişme göstermiştir. Anahtarlama güç elemanı yapım teknolojisi alanındaki gelişmeler, anahtarlama güç elemanı güç elemanlarının, anahtarlama (açma-kapama) hızlarının belirgin bir şekilde artmasını mümkün kılmıştır. Aynı zamanda güç elektroniği piyasası fark edilir bir biçimde genişlemiştir.

Güç elektroniği devrelerinden olan DA-DA dönüştürücü devrelerinde en önemli nokta, yükün ihtiyaç duyduğu doğru gerilimi dalgasız bir şekilde yüke aktarmak ve harmonik oluşumunu engellemektir. Dönüştürücünün giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılığını azaltarak, istenmeyen harmonikler ile birlikte çıkış gerilim dalgalılığı da azalmaktadır. Bu durum; klasik tip doğru akım dönüştürücülerinde pasif devre elemanlarının boyutları ve etkin anahtarlama frekansını arttırarak mümkündür. Klasik bir dönüştürücü yapısı tasarlanarak giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılığını azaltmak için pasif devre elemanlarının boyutlarını büyütüp, etkin anahtarlama frekansını arttırmak yerine; güç katında bulunan devre elemanları paralellenip, anahtarlama sinyalleri arasında faz kaydırılarak giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılığı azaltılabilir. Güç katı paralellenerek, çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü yapısı elde edilmiş olur. Çok katlı yapıda, giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılıklarının azaltılması, her bir güç katından eşit güç çekilerek, etkin anahtarlama frekansını arttırarak ve her katın anahtarlama sinyali arasında faz kaydırılarak sağlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, DA-DA dönüştürücülerinde giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılığının çok katlı yükseltici tip DA-DA dönüştürücü kullanılarak azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaçla 48W gücünde iki katlı yükseltici tip DA-DA dönüştürücü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilip gerekli sonuçlar alınmıştır.

Tez çalışması toplamda altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel olarak literatür araştırmalarına yer verilmiştir.

İkinci bölümde, genel olarak doğru akım dönüştürücüleri ve sınıflandırılması anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerin kullanım alanları, çalışma modları, çalışma prensipleri ve dönüştürücü devre elemanlarının nasıl seçildiği anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde, giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılıklarının azaltılması anlatılmış ve klasik tip ile çok katlı yükseltici tip arasındaki farklardan bahsedilmiş ve benzeşim sonuçları verilmiştir.

Beşinci bölüm, çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü uygulama devresi yapılmıştır ve uygulama sonuçları verilmiştir.

Son bölüm olan, altıncı bölümde ise; sonuçlar ve öneriler kısmından bahsedilerek çalışma tamamlanılmıştır.

## 1. GENEL BİLGİLER

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte doğru gerilim kullanımı günlük hayatımızda vazgeçilemez bir hal almaktadır. Günlük hayatımızda kullandığımız dizüstü bilgisayarlar, şarj aletleri, elektrik motorları, işlemciler ve tramvay uygulamaları vb. birçok cihaz veya sistem doğru gerilime ihtiyaç duyulmaktadır. Şebeke geriliminin sinüs formunda olması nedeniyle, bu gerilimin öncelikle denetimsiz doğrultucular ile doğru akıma daha sonra ise DA-DA dönüştürücü kullanılarak yükün gereksinim duyduğu gerilim ve akım seviyesine dönüştürülür [1].

Günümüzde verim ve anahtarlama kayıpları, doğru akım dönüştürücülerinin problemleri arasında gösterilmektedir. Doğru akım dönüştürücülerinin boyutlarını küçültmek için pasif devre elemanları olan endüktans ve kondansörlerin boyutlarının küçültülmesi gerekir. Yükseltici tip dönüştürücülerde; doluluk-boşluk oranı (duty cycle), etkin anahtarlama frekansının değeri, giriş akımı dalgalılık miktarı ve çıkış gerilimi dalgalılık miktarları, devredeki pasif elemanlardan olan endüktansın ve kondansatörün değerlerinin belirlenmesinde yer almaktadır. Özellikle yüksek güçlü uygulamalarda akım paylaşımının sağlanmasıyla; anahtarlama kayıplarının azaltılması, etkin anahtarlama frekansının artırılması, devrenin boyutlarının küçültülmesi, giriş akımı dalgalılığı ve çıkış gerilimi dalgalılığının azaltılması için çok katlı (sarmaşık) doğru akım dönüştürücüleri kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında; Klasik ve çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü kullanılmıştır. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünde kullanılacak olan pasif devre elemanlarının değerleri, klasik tip dönüştürücüde hesaplanan değerler ile aynı olacaktır. Pasif devre elemanlarının değerleri sabit tutularak giriş akımı dalgalılığı ve çıkış gerilimi dalgalılığının azaltılması amaçlanmıştır.

## 1.1. Literatür Taraması ve Özeti

Tez çalışmasının birinci aşamasını klasik yükseltici tip dönüştürücü tasarımı oluşturmaktadır. Güç elektroniğinin temel devrelerinden olan yükseltici tip dönüştürücüler üzerine, literatürdeki çok sayıda araştırma ile düşük olan veriminin artırılmasına çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, yükseltici tip dönüştürücünün güç katı paralelleme yöntemi uygulanarak, çok fazlı ya da çok katlı yapı kullanılması amaçlanmıştır. Çok katlı yükseltici tip dönüştürücüler genellikle, yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış gerilim seviyesini yükseltmek gibi uygulamalarda, DA-DA ya da AA-DA dönüştürücü sistemlerinde ve güç faktörü düzeltme devrelerinde kullanılmaktadır [3]. Dönüşümlü çalışma metodunda kontrol yöntemi olarak düşük güçlü uygulamalarda sınır akım modlu kontrol yöntemi, 1kW üzeri uygulamalarda ise sürekli iletim modlu kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Dönüşümlü çalışma metodu boyut, maliyet ve verim açısından devreye kattığı faydalı özelliklerden dolayı ve güç elektroniği entegre üreticilerinin yeni nesil yüksek verimli entegreleri piyasaya sunması beklenmektedir [4].

Genç ve İskender (2011) çalışmasında mevcut akımın paylaşımını sağlamak, giriş akımı dalgalılığını azaltıp güç kat sayısı düzeltme (Power Factor Correction) işlemi uygulanmıştır. Çalışmada dijital sinyal işleme (Digital Signal Processing) uygulaması kullanılarak, devreden giriş akımı ve çıkış gerilimi verileri alınmış güç katsayısı düzeltme (PFC) kontrolörü tarafından işleme alınarak birbirleri arasında 180 derece faz farkı olan iki tane tetikleme sinyali oluşturulmuştur. Elde edilen sinyaller anahtarlama güç elemanı tetikleme sinyali olarak verilmiş ve iki katlı yükseltici tip dönüştürücü tasarımı yapılmıştır [5].

Yapıcı ve diğ., (2014) yapılan bu çalışmada klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresi ile iki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresi tasarlanmıştır. Çok katlı dönüştürücünün pasif eleman değerleri (endüktans ve kondansatör), klasik dönüştürücünün pasif elemanları ile aynı seçilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda ise çok katlı dönüştürücü ile klasik dönüştürücünün giriş akımı dalgalılığı ve çıkış gerilimi dalgalılığının karşılaştırması yapılmıştır. Giriş akımı dalgalılığı ile çıkış gerilimi dalgalılığının çok katlı dönüştürücüde paralellenmiş güç katı sayısına bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir [1].



Çoruh ve diğ., (2011) yapılan bu çalışmada yükseltici tip doğru akım dönüştürücüleri için endüktans tasarımı üzerinde durulmuştur. Endüktans tasarımı yapılırken çekirdek seçimi, tel seçimi, hava boşluğu uzunluğu ve sarım sayısı gibi hesaplamalar yapılmıştır. Endüktans tasarım kriterleri, klasik ve iki katlı yükseltici tip dönüştürücü devrelerinde uygulanmıştır. Çalışmada sonuç olarak klasik yükseltici dönüştürücünün 120W gücünde %93 ve iki katlı yükseltici tip dönüştürücünün 120W çıkış gücünde %96 verimle çalıştığı gözlemlenmiştir [6].

Genç (2010) çalışmasında klasik ve çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüleri için yumuşak anahtarlama yöntemi üzerinde durmuştur. Bu tip dönüştürücülerde anahtarlama güç elemanı üzerinde anahtarlama dolayısı kayıpların fazla olması olağandır. Verimin yükseltilmesi için anahtarlama üzerinde yapılan çalışmalardan birisi de yumuşak anahtarlama yöntemidir. Bu çalışma kapsamında aynı zamanda dijital sinyal işleme yöntemi kullanılarak, güç katsayısı düzeltme işlemi yapılmıştır. Devrenin doluluk-boşluk oranının (duty cycle) 0,5'ten büyük veya küçük olması durumuna göre, toplamda 16 durum için çalışma modları incelenmiştir [7].

Dereje (2017), çalışmada güç faktörü düzeltme uygulamaları için sürekli iletim modunda çalışan, üç katlı yükseltici tip dönüştürücünün tasarım değerlendirmeleri ve kontrol teknikleri sunulmaktadır. Giriş endüktansları, çıkış kondansatörü ve anahtarlama güç elemanı için seçim prosedürleri kısaca açıklanmıştır. Anahtarlama güç elemanı kayıplarının tahmini, iletim kayıpları ve anahtar kayıpları anlatılmaktadır [8].

Nussbaumer (2009), çalışmasında klasik, iki katlı ve üç katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devreleri tasarlanmıştır. Bu devrelerin her biri için ayrı ayrı giriş akımının sürekli iletim, kritik iletim ve süreksiz iletim modu çalışma durumları incelenmiştir [9].

Erdoğan (2009), çalışmasında hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt pillerinin çıkışında çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün kullanılmasını araştırmış ve tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkışlarında bu yapıya ihtiyaç duyulduğunu belirtmiştir [13].

Naziya ile Rupesh (2016), Sheik ile Devaraj (2015), ve Kuo-Ching ile Chun-An (2016), çalışmalarında, güneş enerjisi panellerinin çıkışındaki düşük olan doğru gerilim seviyesini yükseltmek için yüksek verimde çalışan çok katlı yapının kullanılmasını açıklamışlardır [14–16].

Ramesh ve diğ., yaptığı çalışmada ise fotovoltaik sistemlerden elde ettiği elektriksel enerjiyi öncelikle verimli bir şekilde iki katlı yükseltici tip dönüştürücü ile gerilim seviyesini yükselttikten sonra indüksiyon motorunun beslemesinde kullanmıştır [17].

Yapılan çalışmalar, dönüştürücü devre yapısı ve kontrol yapıları olarak ikiye ayrılabilir. Çok katlı yükseltici tip dönüştürücüler, paralel bağlı klasik dönüştürücülerden oluştuğundan, devre yapısı üzerine yapılan çalışmalar genellikle pasif elemanlar üzerine olmuştur [3]. Bu çalışmalarda genel olarak pasif elemanların boyutlarının küçültülmesi, verimliliğin artırılması, giriş akımı dalgalılığı ile çıkış gerilimi dalgalılığının azaltılması ve anahtarlama güç elemanı üzerindeki anahtarlama kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır. Kontrol yapıları üzerine yapılan çalışmaların büyük kısmı dijital sinyal işleme (DSP) ve güç katsayısı düzeltme (GKD) kontrol kartları üzerinde yapılan çalışmalardır.

## **1.2. Tezin Amacı ve Genel Yapısı**

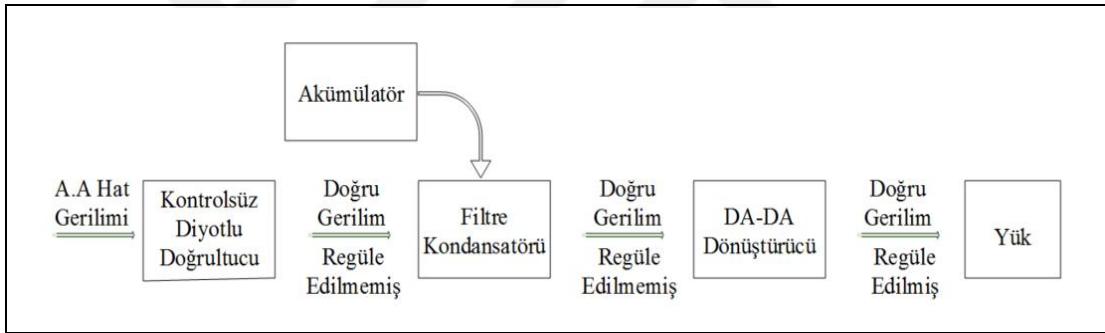
Doğru akım dönüştürücülerinin çıkışında sabit gerilim elde etmek ve bu gerilimi kontrol etmek son derece önemlidir. Doğru akım dönüştürücülerinde, girişten çekilecek gücün yüksek bir verim ile çıkıştaki yüke aktarabilecek kontrollü bir topolojinin tasarlanması büyük bir öneme sahiptir. Anahtarlama modlu güç kaynağı (SMPS), fotovoltaik (PV) sistemi ve elektrikli araç sistemi (EV) gibi çok geniş uygulamaları kapsayan doğru akım dönüştürücülerinde çok sayıda araştırma yapılmıştır. Verimlilik, sistemin cevap verme süresi, çıkış gerilimi ve giriş akımı dalgalanması, boyut ve ağırlık açısından performansı optimize etmek için çeşitli tasarımlar araştırılmıştır [10]. Çok katlı dönüştürücülerde, çıkış gerilimi ve giriş akımı dalgalanmalarının kat sayısına bağlı olarak sifıra yaklaştığı ve hatta belirli doluluk-boşluk oranlarında sıfır olduğu gözlenmiştir. Bu durum, devrenin klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerine karşılaştırıldığında, dalgalılık değerlerinin azalması en büyük avantajlarından biridir [10].

Çalışma kapsamında, iki katlı yükseltici tip dönüştürücü tasarımı yapıp, giriş akımı ve çıkış gerilim dalgalanmasının 0,5 doluluk-boşluk oranında sıfır olması amaçlanmaktadır. Anahtarlama sinyallerini üretmek amacıyla mikro denetleyici kullanılmıştır. Kullanılan mikro denetleyicide her bir kat için ayrı ayrı 180 derece faz farklı tetikleme sinyalleri üretilmiştir.



## 2. DOĞRU AKIM DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ VE SINIFLANDIRILMASI

DA-DA dönüştürücüler, bir doğru gerilimi, farklı bir doğru gerilime çeviren güç elektroniği devreleridir [11]. Bu dönüştürücülerin girişinde şebeke geriliminin doğrultulmasıyla elde edilmiş, genellikle ayarsız bir gerilim bulunmaktadır. Anahtarlamalı DA-DA dönüştürücüler, ayarsız DA girişi, istenilen gerilim kademesinde, kontrollü olarak DA çıkışa göndermek için kullanılır. DA dönüştürücülerinin giriş gerilimi pillerden sağlanabileceği gibi çoğunlukla, şebeke geriliminin kontrolsüz doğrultucular ile doğrultulup daha sonra doğru gerilim uçlarına paralel olarak büyük kapasiteli bir filtre kondansatörünün bağlanmasıyla düşük dalgalanmalı bir doğru gerilim elde edilir [2].



Şekil 2.1. Doğru akım dönüştürücü sistemi

DA dönüştürücülerinde anahtarlama güç elemanı devre elemanının iletimde olduğu sürenin ( $t_{on}$ ), anahtarlama periyoduna ( $T_s$ ) oranına, dönüştürücünün doluluk-boşluk oranı (duty cycle) denir ve Denklem (2.1) ile ifade edilmektedir.

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (2.1)$$

Temel DA-DA dönüştürücü tipleri iki gruba ayrılmaktadır.

Endüktanslı ve yalıtımsız doğru akım dönüştürücüleri;

- Yükseltici (Boost) DA-DA dönüştürücü
- Düşürücü (Buck) DA-DA dönüştürücü

- Düşürücü-yükseltici (Buck-Boost) DA-DA dönüştürücü
- Cuk türü yalıtımsız DA-DA dönüştürücü

Endüktanslı ve yalıtımlı dönüştürücüler ise;

- İleri yönlü (Forward) DA-DA dönüştürücü
- Geri dönüşlü (Flyback) DA-DA dönüştürücü
- Cuk türü yalıtımlı DA-DA dönüştürücü

Olarak bilinmektedir.

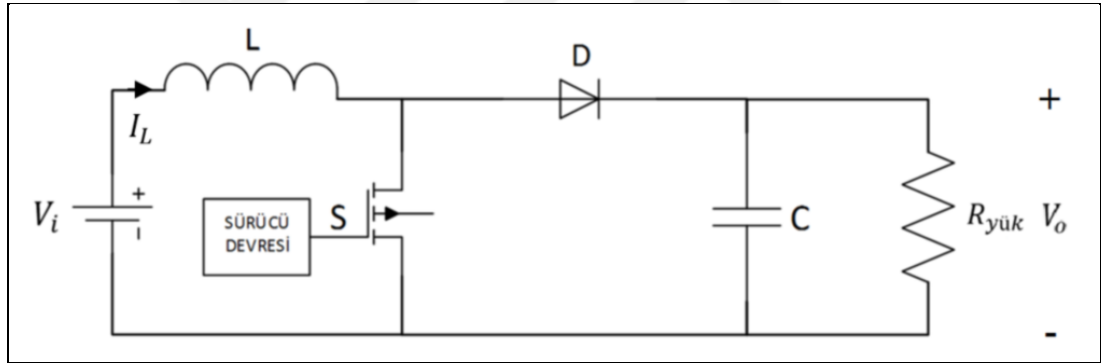
Endüktanslı dönüştürücülerde enerji aktarımı bobinler tarafından gerçekleştirilir. Anahtarlama güç elemanı iletimde olduğu süre boyunca bobinde depolanan enerji, anahtarlama güç elemanının kesime girmesiyle endüktansta depolanan enerji çıkıştaki yüke aktarılır. Bu tip dönüştürücülerde giriş ile çıkış arasında elektriksel yalıtım yoktur. Genellikle yüksek güçlü uygulamalarda elektriksel yalıtımsız dönüştürücüler kullanılmaktadır. Elektriksel yalıtımlı dönüştürücü devrelerinin çalışma prensibi bir önceki bölümde anlatılan elektriksel yalıtımsız dönüştürücülerden farklıdır. Fark olarak giriş ve çıkış devresi elektriksel olarak birbirinden yalıtılmaktadır. Yalıtım işlemi transformatör ile sağlanır [11].

### 3. KLASİK YÜKSELTİCİ TİP DOĞRU AKIM DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Yükseltici tip doğru akım (DA) dönüştürücüleri girişten aldığı doğru gerilimi belli bir oranda yükselterek çıkışa aktaran dönüştürücülerdir. Fotovoltaik sistemlerde, güç faktörünün düzeltilmesi devrelerinde ve özellikle anahtarlama güç kaynaklarında yaygın olarak kullanılır [11]. Yükseltici tip dönüştürücüler devrede bulunan anahtarlama güç elemanının konumu dolayısıyla girişten aldığı elektrik enerjisini kesintisiz olarak çıkışa aktaran dönüştürücülerdendir.

#### 3.1. Çalışma Prensipleri

Yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerinin devre şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü

Yükseltici tip DA dönüştürücülerde, giriş gerilimini yükselterek yüke aktarma işlemi, yapısındaki enerji depolayıcı olarak kullanılan endüktörün, üzerinden geçen akım değişimine karşı koyma eğilimi sayesinde gerçekleştirilir.

Endüktör enerjiyi, sargılarından geçen akımın yarattığı manyetik alan içerisinde saklayabilen bir pasif devre elemanıdır. Endüktörün sargılarından geçen akımdaki değişim, sargılarında meydana gelen manyetik alanda değişime, manyetik alandaki değişim ise endüktör sargıları arasında gerilim endüklenmesine sebep olur. Bu endüklenen gerilim ise, kendi çıkış kaynağı olan endüktör sargılarından geçen akımdaki değişime karşı koyar. Bu sayede endüktör şarj sırasında yük gibi davranıp enerji toplarken, deşarj sırasında topladığı enerjiyi bırakırken akım kaynağı gibi

davranır. Endüktör deşarj olurken üzerinde oluşan gerilim şarj olduğu gerilimden bağımsız olup, deşarj akımının değişim hızıyla doğru orantılıdır. Böylece endüktör üzerindeki gerilim şarj ve deşarj sırasında farklı olabilir [12]. Endüktans üzerinde endüklenen gerilim Denklem (3.1) ile ifade edilmiştir.

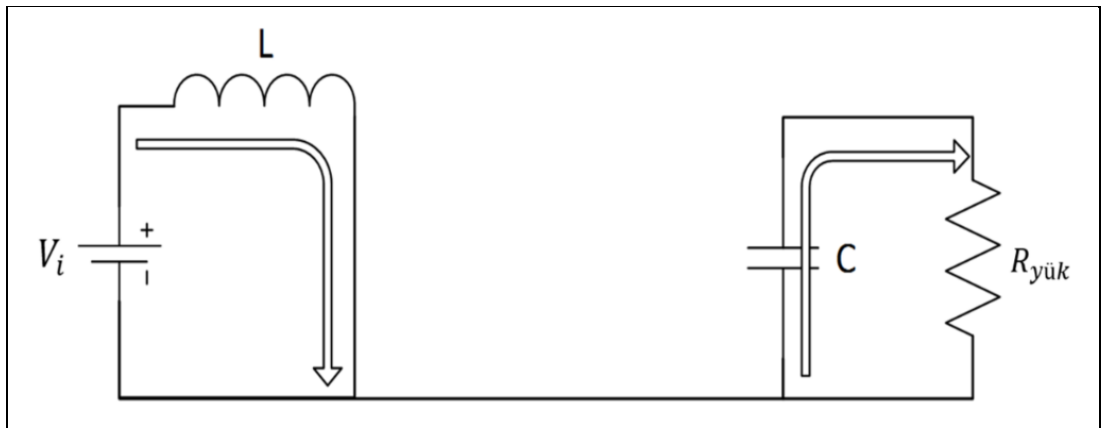
$$V_L = L \times \frac{di_t}{dt} \quad (3.1)$$

Kapasitör de endüktör gibi enerji depolayan pasif bir devre elemanıdır. Endüktörden farklı olarak kapasitör enerjii, manyetik alan içerisinde değil elektrik alan içerisinde depolar. Kapasitör üzerindeki gerilim değişimi, kapasitör terminalleri arasındaki elektrik alanda değişime, elektrik alandaki değişim ise, terminalleri arasında yük akışına sebep olur [12]. Çıkış kapasitör akımı Denklem (3.2) ile ifade edilmiştir.

$$I_c = C \times \frac{dv_C}{dt} \quad (3.2)$$

Devrenin çalışma prensibi anahtarlama güç elemanının iletimde veya kesimde olduğu duruma göre iki ayrı şekilde incelenir.

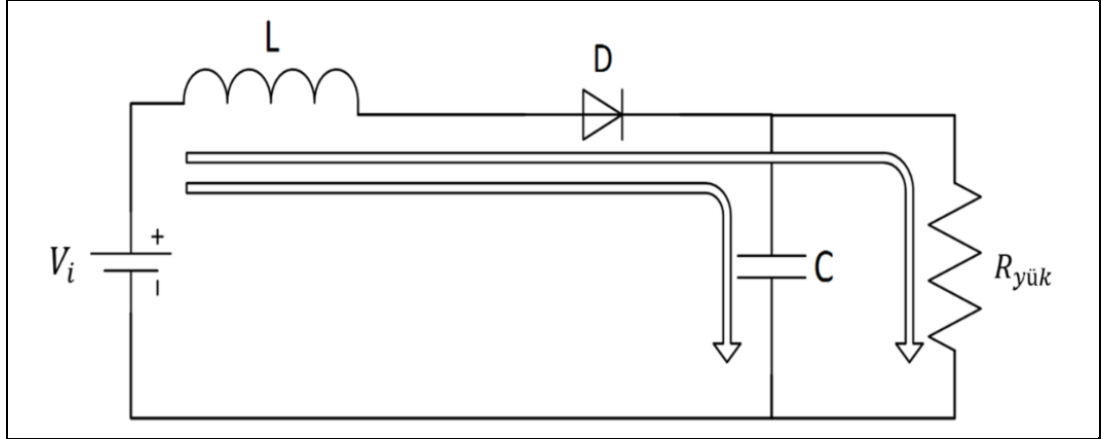
S anahtarının iletimde olduğu durum ( $t_{on}$ ) Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü anahtar iletimde

S anahtarının iletimde olduğu sürede giriş akımı, endüktans üzerinden geçerek endüktansın akımını lineer olarak artırır. Akımı artan endüktans içerisinde enerji depolanır. Bu süre zarfında çıkış yükünün ihtiyaç duyduğu enerji kondansatör tarafından karşılanır. Çıkış yükünün enerjisini karşılayan kondansatörün enerjisi ise azalır.

S anahtarının kesimde olduğu durum ( $t_{off}$ ) ise Şekil 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü anahtar kesimde

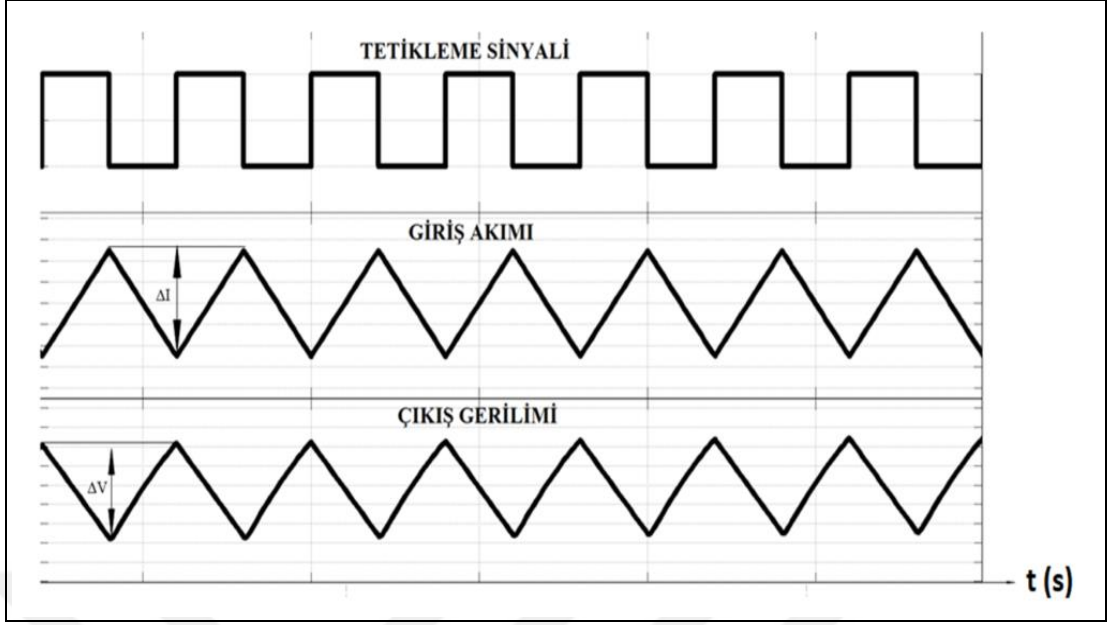
S anahtarının kesimde olduğu süre boyunca giriş akımı ve enerji ile depolanmış endüktansın akımı diyot üzerinden geçerek yükü ve kondansatörü besler. Bu süre boyunca endüktansın enerjisi azalırken, enerjisi azalmış olan kondansatör ise enerji depolar.

Anahtarlama elemanının iletimde ( $t_{on}$ ) ve kesimde ( $t_{off}$ ) olduğu sürelerin toplamı ise anahtarlama periyoduna eşittir. Toplam anahtarlama periyodu ise Denklem (3.3) ile ifade edilmektedir.

$$t_{on} + t_{off} = T_s \quad (3.3)$$

Bir periyotluk süre boyunca klasik tip doğru akım yükseltici dönüştürücünün tetikleme sinyali, giriş akımı (endüktans akımı) ve çıkış gerilimi grafikleri ise Şekil 3.4’te verilmiştir.





Şekil 3.4. Yükseltici tip da-da dönüştürücünün tetikleme sinyali, giriş akımı (endüktans akımı) ve çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde devrenin doluluk-boşluk oranı (D, duty cycle), giriş gerilimi ve çıkış gerilimi cinsinden, Denklem (3.4) ile ifade edilir.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3.4)$$

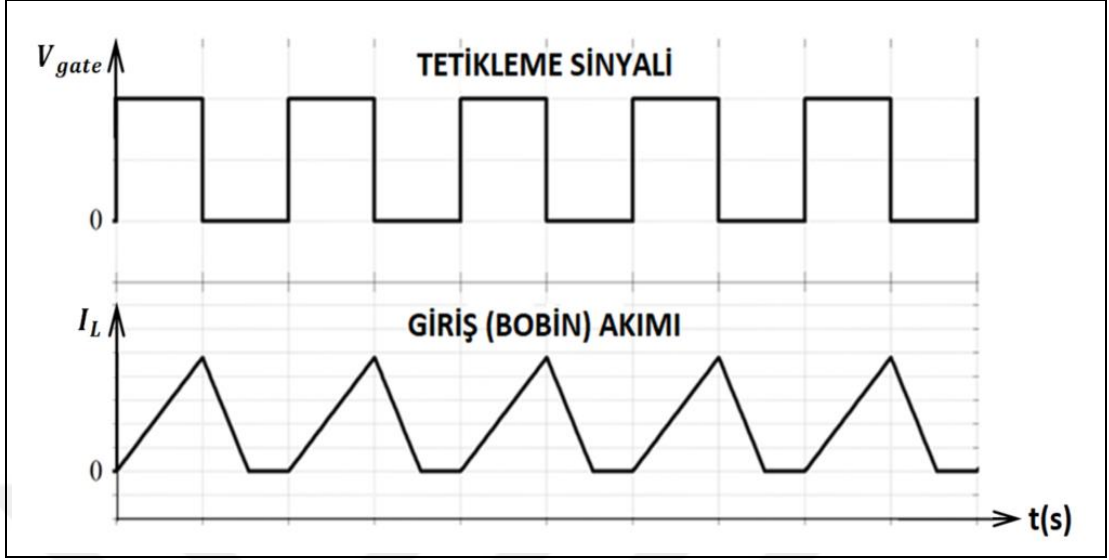
D'nin en düşük değeri 0, en yüksek değeri ise 1 olmaktadır. Teorik olarak D'nin aldığı değere göre dönüştürme oranı sonsuz olabilir. Fakat pratikte giriş gerilimini sonsuz oranda yükseltmek mümkün değildir. Pratikte giriş geriliminin değeri 8-10 kata kadar yükseltilebilir.

### 3.2. Dönüştürücülerin Çalışma Modları

Doğru akım dönüştürücülerinde giriş akımının aldığı değerlere göre üç farklı çalışma modu vardır. Çalışma modları, süreksiz iletim modu, sürekli-süreksiz arasındaki kritik iletim modu ve sürekli iletim modu olarak isimlendirilir.

#### 3.2.1. Süreksiz iletim modu

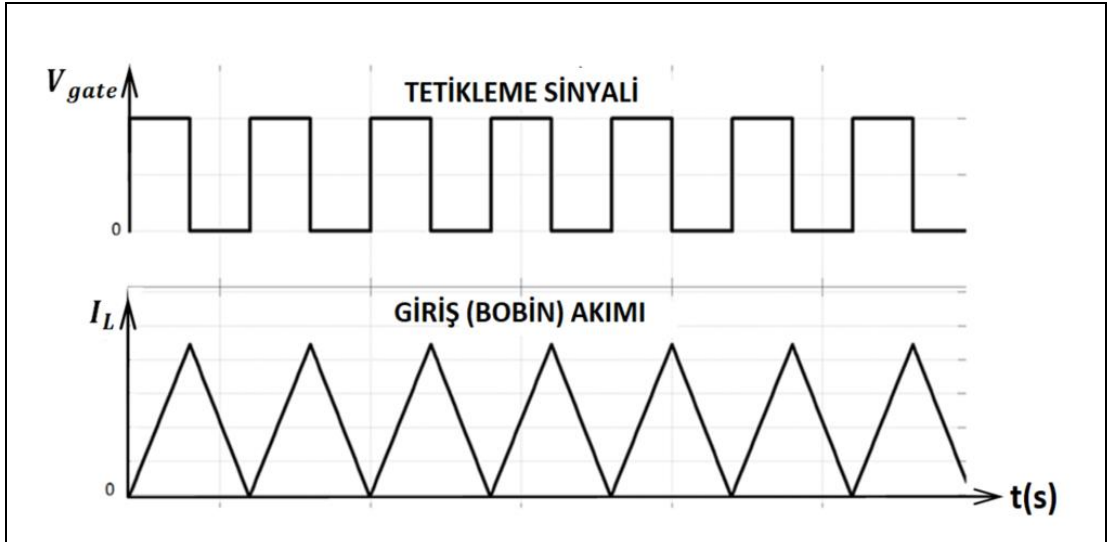
Doğru akım dönüştürücülerinde süreksiz iletim modu, dönüştürücünün giriş akım değerinin bir anahtarlama periyodu süresince sıfıra düşmesi ve belirli bir süre boyunca sıfırda kalmasıdır.



Şekil 3.5. Doğru akım dönüştürücünün süreksiz iletim modunda tetikleme sinyali ve giriş akımının (endüktans akımı) zamana göre değişimi

### 3.2.2. Sürekli-süreksiz iletim arasındaki kritik çalışma modu

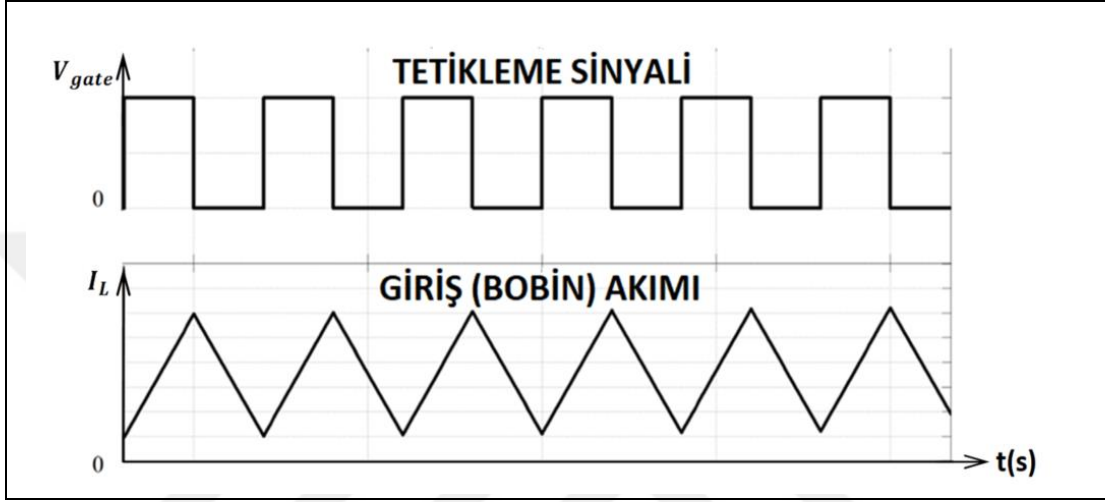
Doğru akım dönüştürücülerinde sürekli-süreksiz iletim arasındaki kritik çalışma modu, dönüştürücünün giriş akım değerinin bir anahtarlama periyodu süresince anlık olarak sıfıra düşmesidir. Verimleri, endüktans değerleri ve boyutları diğer çalışma modlarına göre daha küçüktür.



Şekil 3.6. Doğru akım dönüştürücünün sürekli-süreksiz arasındaki kritik çalışma modunda tetikleme sinyali ve giriş akımının (endüktans akımı) zamana göre değişimi

### 3.2.3. Sürekli iletim modu

Doğru akım dönüştürücülerinde sürekli iletim modu, dönüştürücünün giriş akımı değerinin bir anahtarlama periyodu süresince hiçbir zaman sıfıra düşmemesidir. Verimleri, endüktans değerleri ve boyutları diğer çalışma modlarına göre daha yüksektir.



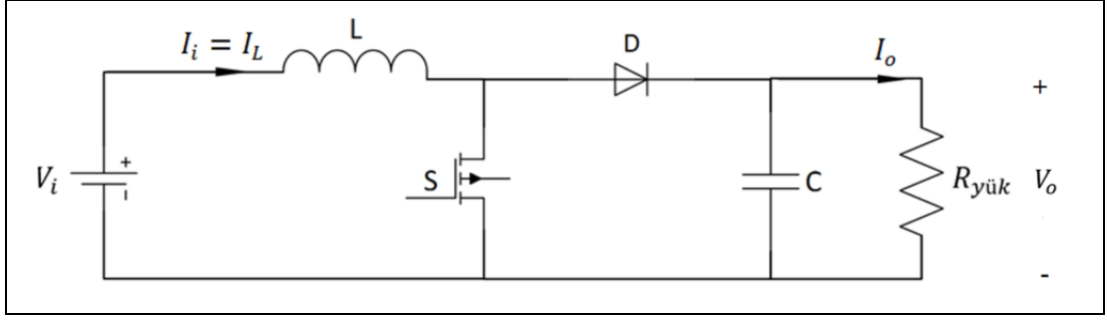
Şekil 3.7. Doğru akım dönüştürücünün sürekli çalışma modunda tetikleme sinyali ve giriş akımının (endüktans akımı) zamana göre değişimi

### 3.3. Devre Elemanlarının Belirlenmesi

Çoğu yüksek güçlü uygulamada; harmoniklerin azaltılması, giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılığının minimum değerlere indirilebilmesi için sürekli iletim modu tercih edilmektedir. Çalışma kapsamında yapılacak devre tasarımında, sürekli iletim modu referans alınarak hesaplamalar yapılacaktır.

#### 3.3.1. Kritik endüktans değerinin belirlenmesi

Kritik endüktans değeri, dönüştürücünün giriş akımının sürekli akım modunda çalışabilmesi için uygun olan en küçük endüktans değeridir. Kritik endüktans değerinden küçük endüktans seçimi yapılacak olursa, anahtarlama güç elemanı iletimde iken endüktansın yeterli miktarda enerjiyi depolayamaması demektir. Yeterli miktarda enerjiyi depolayamayan endüktans ise anahtarlama güç elemanının kesimde kaldığı süre boyunca enerjisini tüketecek ve akım değeri 0'a düşecektir. Kritik endüktans değerini hesaplayabilmek için öncelikle giriş ve çıkış arasındaki güç eşitliği ilkesinden faydalanmak gerekir.



Şekil 3.8. Yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devre şeması

Kritik endüktans değerini hesaplamak için Denklem (3.5)'teki güç eşitliği referans alınmalıdır.

$$D \times V_i \times I_o = V_i \times I_i = V_o \times I_o \quad (3.5)$$

$$I_i = \frac{V_o \times I_o}{V_i} \quad (3.6)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7), Denklem (3.6)'da yerine yazılırsa;

$$I_i = \frac{I_o}{1-D} \quad (3.8)$$

Denklem (3.7)'den  $V_o$  yalnız bırakılırsa;

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} \quad (3.9)$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (3.10)$$

Denklem (3.9), Denklem (3.10)'da yerine yazılırsa;

$$I_o = \frac{V_i}{(1-D) \times R} \quad (3.11)$$

Denklem (3.11), Denklem (3.8)'de yerine yazılırsa;

$$I_i = \frac{V_i}{(1-D) \times R} \quad (3.12)$$

Giriş akımı değeri Denklem (3.13) ile hesaplanmaktadır.

$$I_i = \frac{V_i}{(1-D)^2 \times R} \quad (3.13)$$

Sürekli akım modunda çalışabilmek için, giriş akımı dalgalılık değeri, giriş akımı değerinin iki katına eşit olması gerekir ve Denklem (3.14) ile ifade edilmektedir.

$$\Delta I_i = 2 \times I_L \quad (3.14)$$

Giriş akımı dalgalılık değeri ise Denklem (3.15) ile ifade edilmektedir.

$$\Delta I_i = \frac{V_i \times D}{f \times L} \quad (3.15)$$

Giriş akımı dalgalılık değeri Denklem (3.14)'te yerine yazılırsa, yeni oluşturulan eşitlik Denklem (3.16) ile ifade edilmektedir.

$$\frac{V_i \times D}{f \times L} = 2 \times I_L = 2 \times I_o = 2 \times \frac{V_i}{(1-D)^2 \times R} \quad (3.16)$$

$$\frac{V_i \times D}{f \times L} = \frac{2 \times V_i}{(1-D)^2 \times R} \quad (3.17)$$

Denklem (3.17) referans alınarak, Kritik endüktans değeri ise Denklem (3.18) ile hesaplanmaktadır [18].

$$L_c = \frac{D \times (1-D)^2 \times R}{2 \times f} \quad (3.18)$$

### 3.3.2. Kritik kondansatör değerinin belirlenmesi

Kritik kondansatör değeri, dönüştürücünün çıkış akımının sürekli akım modunda çalışabilmesi için uygun olan en küçük kondansatör değeridir. Kritik kondansatör değerinden küçük kondansatör seçimi yapılacak olursa, anahtarlama güç elemanı kesimde iken kondansatörün yeterli miktarda enerjiyi depolayamaması demektir.

Yeterli miktarda enerjiyi depolayamayan kondansatör ise anahtarlama güç elemanının iletimde kaldığı süre boyunca enerjisini tüketecek ve kondansatörün akım değeri 0'a düşecektir.

Kritik kondansatör değerini hesaplamak için Denklem (3.19)'dan yola çıkılacak olursa;

$$\Delta V_o = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} I_c dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} I_o dt = \frac{I_o \times t_{on}}{C} \quad (3.19)$$

$$(1-D) = \frac{V_i}{V_o} \quad (3.20)$$

$$D \times \frac{t_{on}}{T} = t_{on} \times f \quad (3.21)$$

$$t_{on} = \frac{V_o - V_i}{V_o \times f} \quad (3.22)$$

Denklem (3.22), Denklem (3.19)'da yerine yazılırsa [18];

$$\Delta V_o = \frac{I_o \times (V_o - V_i)}{V_o \times f \times C} \quad (3.23)$$

$$\Delta V_o = \frac{I_o \times D}{f \times C} \quad (3.24)$$

Çıkış akımının sürekli olabilmesi için, çıkış akımı dalgalılık değeri, çıkış akımı değerinin iki katına eşit olması gerekir ve Denklem (3.25) ile ifade edilmektedir [18].

$$\frac{I_o \times D}{f \times C} = 2 \times V_o = 2 \times I_o \times R \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'ten yola çıkılacak olursa, Kritik kondansatör değeri ise Denklem (3.26) ile hesaplanmaktadır [18].

$$C_c = \frac{D}{2 \times f \times R} \quad (3.26)$$

### 3.3.3. Anahtarlama güç elemanının ve diyotun seçim kriterleri

Bir güç elektroniği devresi tasarımında en önemli unsurlardan birisi anahtarlama güç elemanı ve diyotun belirlenmesidir. Tasarlanan devreler endüstriyel uygulamalarda kullanılacak ve seri üretim yapılacaksa önemli olan elemanların maliyetidir. Araştırma geliştirme çalışmalarında ise maliyet konusuna bakılmaksızın tasarım yapılmaktadır. Bu çalışma kapsamında devre elemanlarının maliyetine bakılmaksızın seçimler yapılacaktır. Anahtarlama güç elemanı ve diyotun belirlenmesi için iki önemli değerin hesaplanması gerekir. Anahtarlama güç elemanı iletimdeyken maksimum devre akımını üzerinden akıtacak, kesimde iken de maksimum çıkış gerilimine maruz kalacaktır. Diyot ise, anahtarlama güç elemanı iletimde iken maksimum çıkış gerilimine maruz kalacak, anahtarlama güç elemanı kesimde iken de maksimum giriş akımını üzerinden akıtmak durumunda kalacaktır. Diyot için başka bir önemli durum ise anahtarlama frekansıdır. Dönüştürücü devrelerinde anahtarlama frekansları yüksek olması sebebiyle ultra hızlı bir diyot kullanılması gerekmektedir. Devre elemanlarını belirlemek için öncelikle maksimum akım ve maksimum gerilim değerleri hesaplanmalıdır. Yükseltici tip DA-DA dönüştürücülerde maksimum akım, devrenin giriş akımıdır. Devredeki maksimum gerilim ise, devrenin çıkış gerilimidir. Devredeki maksimum akım ve maksimum gerilim değerleri hesaplandıktan sonra devrenin sağlıklı ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için bu değerlere ek olarak %20 oranında bir artırma yapılması yeterlidir. Maksimum akım değeri Denklem (3.27) ile hesaplanmaktadır. Denklemde verim ( $\eta$ ) ile ifade edilmiştir. Yükseltici tip DA-DA dönüştürücülerde ortalama verim değeri  $\eta = \%95$  olarak alınmaktadır [7].

$$I_{D,max} = \sqrt{2} \times \frac{P_o}{\eta \times V_{i,rms}} \times 1,2 \quad (3.27)$$

### 3.4. Dalgalılık Değerlerinin Hesaplanması

Doğru akım dönüştürücüleri tasarlanırken en önemli unsurlardan birisi de dönüştürücünün dalgalılıklarının hesaplanmasıdır. Dönüştürücülerde toplamda giriş akımı dalgalanması ve çıkış gerilimi dalgalanması olmak üzere iki tane dalgalılık hesabı yapılmalıdır.

### 3.4.1. Giriş akımı dalgalılığının hesaplanması

DA dönüştürücülerinde giriş akımı dalgalılık değeri, dönüştürücünün bir periyot boyunca şebekeden çektiği toplam akımın, maksimum ve minimum değeri arasındaki farktır. Genel olarak bu akım farkı (akım dalgalılığı) ortalama giriş akımı referans alınarak yüzdesel olarak ifade edilmektedir. Doğru akım dönüştürücülerinde giriş akımı dalgalılığı dönüştürücüler için önemli bir değerdir. Genel olarak şebekeden çekilen akımın faz farksız sinüs şeklinde olması veya dalgasız doğru akım olması istenir. Şebekelerden çekilen akımın doğru akım ve dalgalı olması şebekeye harmonik kazandırmaktadır. Şebekeye harmonik kazandırmak ise şebeke akımı ve geriliminin saf sinüs formundan uzaklaşması demektir. Şebekelere harmonik kazandırmamak adına doğru akım dönüştürücülerini ve diğer tüm güç dönüştürücülerini gibi, çekilen akımın dalgasız olması gerekir. Güç dönüştürücülerini tasarlanırken giriş akımının dalgalılık değeri, minimumlarda tutulmalıdır. Doğru akım yükseltici tip dönüştürücülerde giriş akımı dalgalılığı ise Denklem (3.15) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta I_i = \frac{V_i \times D}{f \times L} \quad (3.15)$$

### 3.4.2. Çıkış gerilimi dalgalılığının hesaplanması

Doğru akım dönüştürücülerinde çıkış gerilimi dalgalılık değeri, dönüştürücünün toplamda çıkışından verdiği maksimum gerilim ile minimum gerilim değeri arasındaki farktır. Genel olarak bu gerilim farkı (gerilim dalgalılığı) ortalama çıkış gerilimi referans alınarak yüzdesel olarak ifade edilmektedir. Doğru akım dönüştürücülerinde çıkış gerilimi dalgalılığı, dönüştürücüler için önemli bir değerdir. Doğru akım dönüştürücülerinin çıkışlarındaki yükler veya cihazlar genel olarak akım dalgalılık toleransları düşük olan yükler ve cihazlardır. Yüke aktarılmak üzere dalgasız bir doğru gerilim gerekmektedir. Doğru akım dönüştürücülerinde çıkış gerilim dalgalılığı ise Denklem (3.24) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta V_o = \frac{I_o \times D}{f \times C} \quad (3.24)$$



#### **4. İKİ KATLI YÜKSELTİCİ TİP DÖNÜŞTÜRÜCÜ**

Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüleri tasarlanırken en önemli konu tasarlanacak olan dönüştürücünün güç değeridir. Devre elemanları seçilirken dönüştürücünün giriş ve çıkış akım değerleri referans alınarak seçilmektedir. Devrede akan akım değerlerinin artması; anahtarlama güç elemanının boyutunu, maliyetini ve endüktansın doyuma girmemesi için anahtarlama elemanının anahtarlama frekansını artırır. Anahtarlama frekansını arttırmak ise anahtarlama güç elemanı üzerindeki anahtarlama kayıplarının da artması demektir. Aynı zamanda diyot ve anahtarlama elemanı üzerindeki akım stresinin de artmasında sebep olmaktadır. Tüm bu dezavantajlı durumları azaltmak adına doğru akım dönüştürücülerinde özellikle yüksek güçlü uygulamalarda güç dönüştürücüsü tasarımı yapılırken klasik doğru akım dönüştürücü yapısı (tek katlı yapı) yerine çok katlı doğru akım dönüştürücü (sarmaşık yapı) doğru akım dönüştürücüsü) tasarımı tercih edilmektedir.

##### **4.1. Kullanım Alanları ve Amaçları**

Çok katlı DA dönüştürücü yapısı, genel olarak yüksek güçlü uygulamalar için, klasik tek katlı dönüştürücüye göre birçok avantaja sahiptir. DA dönüştürücü, şebeke tarafında meydana gelecek harmonikleri, harmoniği oluşturan devrenin kendi içerisinde azaltmaktadır. Dönüştürücü yapısının; maliyetini düşürmek, verimini arttırmak, boyutlarını küçültmek, dönüştürücünün girişindeki akım dalgalanması ile çıkışındaki gerilim dalgalanmasını ve anahtarlama güç elemanı üzerinde oluşacak akım streslerini azaltmak adına tercih edilen yöntemdir. Yapı olarak tüm dönüştürücülere uygulanabilir olması ile birlikte yaygın olarak yükseltici tip dönüştürücülerde kullanılır [19-21]. Çok katlı yapı; bahsedilen avantajlarından dolayı güç faktörü düzeltme (GFD) uygulamaları, fotovoltaik sistem uygulamaları, elektrikli araçların şarj edilmesinde gerekli dönüştürücü uygulamaları gibi birçok uygulama için popüler hale getirmiştir. Ek olarak çok katlı yapı sisteme modülerlik ve bakım avantajları sağlamaktadır [19-21].

## 4.2. Çalışma Prensibi

Çok katlı dönüştürücü yapısı genel olarak birden fazla klasik tip dönüştürücünün paralel şekilde çoklanması olarak adlandırılabilir. Bire bir aynı yapıda birden çok dönüştürücünün paralellenmesi ile birlikte kaç adet dönüştürücünün paralellendiği de önemli bir konudur. Çok katlı yapının diğer bir önemli noktası da her katın arasında kat sayısına bağlı olarak faz kaydırma işlemi uygulanmasıdır. Faz kayması ise Denklem (4.1) ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{2 \times \pi}{N} \quad (4.1)$$

Burada N değeri çok katlı yapılarda paralellenen dönüştürücü sayısıdır. 2 katlı bir dönüştürücü tasarlanacak ise her bir kat için oluşturulması gereken faz farkı Denklem (4.2) ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{2 \times \pi}{N} = \frac{2 \times \pi}{2} = 180^\circ \quad (4.2)$$

## 4.3. İki Katlı Yükseltici Tip Dönüştürücülerde Akım Paylaşımı

Doğru akım dönüştürücülerini paralellerken birkaç farklı yol izlenebilir. Bunlar; Anahtarlama güç elemanı paralellemek, dönüştürücü paralellemek, güç katı paralellemek ve faz farklı güç katı paralellemektir.

### 4.3.1. Anahtar paralelleme

Birden fazla anahtarın paralellenerek kullanılması anahtarlar üzerinden akacak olan toplam akım kapasitesini artırır. Anahtar paralelleme yönteminin uygulanması ve kontrol edilmesi basit olduğundan sıkça tercih edilen yöntemlerden biridir. Yöntemin kullanılması için faz kaydırmalı PWM sinyaline ihtiyaç duyulmaz. Kontrolcü tarafından tek bir tane PWM sinyali üretilir ve bu sinyal tüm anahtarlara uygulanır.

Anahtar paralelleme yöntemi uygulamasının basit olmasının yanı sıra bazı dezavantaj durumları vardır. Özellikle anahtarlama güç elemanının ısınmaya bağlı olarak iç direncinin nasıl değiştiği önemli bir konudur.

Bu yöntem, pozitif sıcaklık katsayılı (ısındıkça iç direnci artan devre elemanı) anahtarlama güç elemanı kullanılırsa (örn. MOSFET) kolayca uygulanabilir. Herhangi bir anahtarlama güç elemanı ısındığında iç direnci artacak, üzerinden akan akım değeri zamanla azalacak ve diğer paralellenmiş anahtarlama güç elemanından akacaktır. Bu sayede anahtarlama güç elemanlarının akım paylaşımı sağlıklı bir şekilde yapılmaktadır. Eğer negatif sıcaklık katsayılı (ısındıkça iç direnci azalan devre elemanı) anahtarlama güç elemanı kullanılırsa (örn. IGBT) bu yöntemin uygulanması zordur. Herhangi bir anahtarlama güç elemanı ısındığında iç direnci azalacak, üzerinden geçen akım zamanla artacak ve daha çok ısınarak deforme olacaktır. Anahtar paralelleme yöntemi bu sebepten ötürü her uygulama için uygun değildir [4].

#### **4.3.2. Dönüştürücü paralelleme**

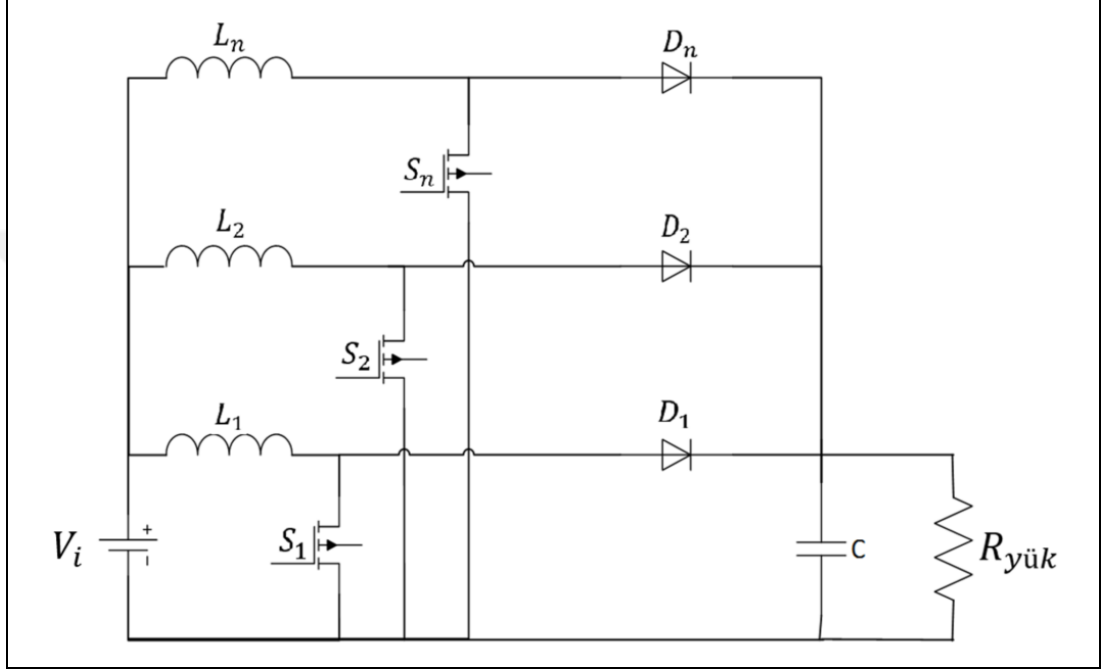
Klasik tip doğru akım dönüştürücüsün güç konusunda yetersiz kaldığı bazı uygulamalarda birden fazla dönüştürücünün paralellenerek kullanılması söz konusudur. Bu durumun en büyük dezavantajları ise dönüştürücü yapısının boyutunu ve maliyetini arttırmasıdır. Bu yöntemde akımın kontrol edilmesi ve her bir dönüştürücü arasında akımın eşit şekilde paylaşılması zordur [23].

#### **4.3.3. Güç katı paralelleme**

Genel olarak yükselten tip doğru akım dönüştürücülerin güç katı; anahtarlama güç elemanı, diyot ve endüktanstan oluşmaktadır. Güç katı paralelleme yönteminde her bir kat için sadece güç katı elemanları kullanılarak paralelleme yapılmaktadır. Her bir katın anahtarlama güç elemanına aynı PWM sinyali uygulanır. Faz kaydırmak için ek kontrol devresine ihtiyaç duyulmaz. Güç katı paralelleme yönteminde endüktanslardaki en küçük farklılıklar, her katın eşit şekilde akım paylaşımı yapmasını zorlaştırır. Diğer yöntemlere göre avantajı ise, birden fazla endüktans kullanıldığından küçük boyutlu endüktans kullanılmasıdır. Toplam enerjiyi büyük boyutlu tek bir endüktansta endükleme yerine, birden fazla küçük boyutlu birkaç endüktansta endükleme imkân sağlar. Bu durumun büyük bir avantaj sağlamasına rağmen tüm güç katlarının anahtarlama sinyalleri aynı olduğundan, dönüştürücünün girişinde çekilen akımın dalgalılığı çok yüksek olur. Güç katı paralelleme yöntemi için giriş akımı dalgalılığının giderilmesi büyük bir sorundur [7].

#### 4.3.4. Faz farklı güç katı paralelleme

Faz farklı güç katı paralelleme yönteminde yine bir önceki yöntemde olduğu gibi güç katı paralelleme yapılır. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi buna ek olarak her bir güç katı tetikleme sinyali arasında, güç katı sayısına bağlı olarak hesaplanan faz farkı ile faz kaydırılarak farklı tetikleme sinyalleri oluşturulmaktadır.



Şekil 4.1. N katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü yapısı

Her bir kat için oluşturulan tetikleme sinyali arasında eşit faz farkı olmalıdır. Bu sayede her kat ayrı ayrı zamanlarda devreye girecek, eşit süre devrede kalacak ve ayrı ayrı zamanlarda devreden çıkacaktır. Bu durum dönüştürücünün girişinden çekilen akımın sürekli olmasını ve dalgalanma miktarının azalması anlamına gelir. Teorik olarak bu yöntem için kat sayısının bir sınırı olmasa da, pratikte iki veya üç güç katına sahip faz farklı yükseltici tip dönüştürücü yapısı tercih edilmektedir.

#### 4.4. İki Katlı Yükseltici Tip Dönüştürücülerde Dalgalılık Değerlerinin Hesaplanması

Klasik tip doğru akım dönüştürücüleri için dalgalılık hesabı daha önceki bölümlerde yapılmıştır. Bu bölümde ise çok katlı doğru akım dönüştürücüleri için giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılık değerleri hesaplanacaktır.

#### 4.4.1. Giriş akımı dalgalılığının hesaplanması

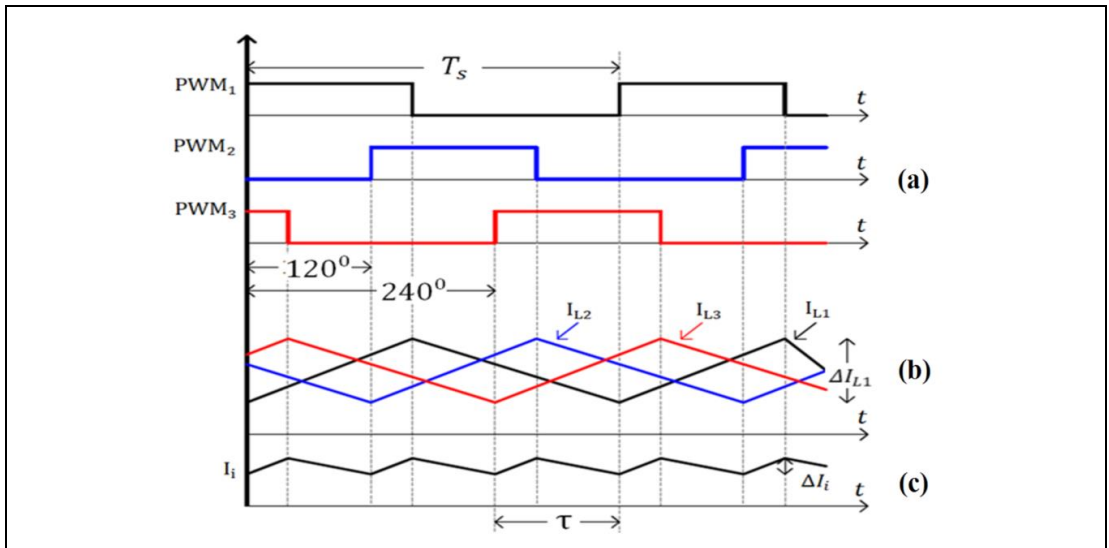
Çok katlı doğru akım dönüştürücülerinin giriş akımı, dönüştürücüyü oluşturan her bir katta bulunan endüktans akımlarının toplamına eşittir. Çok katlı doğru akım dönüştürücülerinde giriş akımı dalgalılığı frekansı, dönüştürücünün kat sayısı ile doğru orantılı olarak artacaktır. Her bir katı oluşturan dönüştürücülerin anahtarlama güç elemanları ayrı ayrı anahtarlanır. Burada anahtarlama yapılrken kat sayısı (N) önemlidir. Çok katlı doğru akım dönüştürücülerde ( $\tau$ ) giriş akımının dalgalanma periyodu olarak ifade edilir ve Denklem (4.3) ile hesaplanmaktadır.

$$\tau = \frac{T_s}{N} \quad (4.3)$$

Çok katlı doğru akım dönüştürücülerinde giriş akımı dalgalılığı hesaplanırken giriş akımının doluluk-boşluk oranı dikkate alınmalıdır. Giriş akımı doluluk oranı ( $\tau_{ON}$ ) ve giriş akımı doluluk-boşluk oranı (q) ile ifade edilir ve Denklem (4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$q = \frac{\tau_{ON}}{\tau} \quad (4.4)$$

Genel olarak çok katlı doğru akım dönüştürücülerinde her bir kat için anahtarlama sinyali, her bir kat için çekilen akım ve toplam giriş akımı Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. (a) Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde tetikleme sinyallerinin, (b) her bir katın bobin akımlarının ve (c) toplam giriş akımının zamana göre değişimi

Çok katlı doğru akım dönüştürücülerinde giriş akımı dalgalılık değeri; Giriş gerilimi, toplam giriş akımı doluluk-boşluk oranı, her bir katın doluluk-boşluk oranı (D), her bir güç katında ayrı ayrı bulunan endüktansın değeri (L) ve giriş akımı dalgalanma periyoduna ( $\tau$ ) bağlı olarak değişmektedir.

Çok katlı doğru akım dönüştürücülerinde giriş akımı dalgalılığı ise Denklem (4.5) ile hesaplanmaktadır [24].

$$\Delta I_i = \frac{V_o \times (1-q)}{L \times (1-D)} \times q \times \tau \quad (4.5)$$

#### 4.4.2. Çıkış gerilimi dalgalılığının hesaplanması

Çok katlı yapıda çıkış gerilimi dalgalılık değeri ( $V_o$ ); toplam giriş akımı doluluk-boşluk oranına (q), güç katı sayısına (N), her bir katın anahtarlama frekansına (f), her bir katın doluluk-boşluk oranına (D), yük direncine (R) ve bu yüke paralel olarak bağlı olan çıkış filtre kondansatörünün değerine bağlı olarak değişmektedir.

Çok katlı doğru akım dönüştürücülerinde çıkış gerilimi dalgalılık değeri ise Denklem (4.6) ile hesaplanmaktadır [24].

$$\Delta V_o = \frac{V_o \times q \times (1-q)}{N^2 \times f_s \times R \times C \times (1-D)} \quad (4.6)$$

#### 4.5. Klasik ve İki Katlı Yükseltici Tip Dönüştürücü Arasındaki Farklar

Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücü ile çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüyü; aynı güçte, aynı doluluk-boşluk oranında, aynı anahtarlama frekansında, aynı pasif devre elemanları kullanılarak, aynı giriş gerilimi ve aynı çıkış gerilimi altında kıyaslayarak Tablo 4.1 oluşturulmuştur.

Tablo 4.1.Klasik tip ve çok katlı (N) doğru akım dönüştürücüsü

<b>Klasik Tip Doğru Akım Dönüştürücüsü</b>	<b>Çok Katlı (N) Doğru Akım Dönüştürücüsü</b>
1 adet güç katı vardır.	N adet güç katı vardır.
Giriş akımı dalgalılığı fazladır.	Giriş akımı dalgalılığı azdır.
Çıkış gerilimi dalgalılığı fazladır.	Çıkış gerilimi dalgalılığı azdır.
Küçük güçlü uygulamalar için idealdır.	Yüksek güçlü uygulamalar için idealdır.
Devre elemanlarının boyutları büyüktür.	Devre elemanlarının boyutları küçüktür.
Etkin anahtarlama frekansı $f$ dir	Etkin anahtarlama frekansı $N.f$ dir.
Devre boyutu büyüktür.	Devre boyutu küçüktür.
Devre maliyeti yüksektir.	Devre maliyeti düşüktür.
Anahtarlama kayıpları yüksektir.	Anahtarlama kayıpları düşüktür.
Dönüştürücünün verimi düşüktür.	Dönüştürücünün verimi yüksektir.
Fazla harmonik oluşturur.	Az harmonik oluşturur.
Diyot ve anahtarlama elemanı üzerindeki akım stresi fazladır.	Diyot ve anahtarlama elemanı üzerindeki akım stresi azdır.

#### **4.6. Devre Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi ve Benzeşim Çalışması**

Çalışmanın bu bölümünde, tasarlanacak olan çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün parametreleri belirlenecektir. Tasarlanacak olan dönüştürücü yapısı iki katlı olacaktır. Tasarım yapılırken ilk adım olarak klasik tip doğru akım dönüştürücüsü referans alınmaktadır. Klasik tip dönüştürücünün tasarımı yapıldığında faz farklı güç katı paralelleme yöntemi ile diğer kat oluşturulacaktır. Belirlenen tasarım parametreleri doğrultusunda devrenin MATLAB/Simulink programında benzeşimi yapıp sonuçlar sunulacaktır.

##### **4.6.1. Seçilen parametreler**

Çalışma kapsamında tasarlanacak olan çok katlı yükseltici tip dönüştürücü yapısının ilk adımı olan klasik tip doğru akım dönüştürücüsü için belirlenmiş olan bazı değerler Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü parametreleri

<b>DÖNÜŞTÜRÜCÜ PARAMETRELERİ</b>	
<b>Çıkış Gücü</b>	48 W
<b>Giriş Gerilimi</b>	12 V
<b>Çıkış Gerilimi</b>	24 V
<b>Yük Direnci</b>	12Ω
<b>Anahtarlama Frekansı</b>	25kHz
<b>Giriş Akımı Dalgalılığı (maks)</b>	%100
<b>Çıkış Gerilimi Dalgalılığı (maks)</b>	%0.6

#### 4.6.2. Matematiksel hesaplamalar

Doğru akım dönüştürücülerinde gerekli parametreler belirlendikten sonra ilk olarak dönüştürücülerde doluluk-boşluk (duty cycle) oranının belirlenmesi gerekmektedir. Tasarlanacak olan devrenin doluluk-boşluk oranı hesaplandıktan sonra diğer matematiksel hesaplamalar yapılabilmektedir. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devrelerinde doluluk-boşluk oranı Denklem (4.7) ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (4.7)$$

$$\frac{24V}{12V} = \frac{1}{1-D} \quad (4.8)$$

Çalışma kapsamında tasarlanacak olan doğru akım dönüştürücü için hesaplanan doluluk-boşluk oranı Denklem (4.9) ile ifade edilmektedir.

$$D = 0,5 \quad (4.9)$$

##### 4.6.2.1. Endüktans değerinin hesaplanması

Devrede kullanılacak endüktansın değeri dönüştürücülerde hesaplanacak en önemli parametrelerden birisidir. Hesaplanacak olan endüktans değeri, devre tasarlama aşamasında Tablo 4.2’de kabul edilmiş bazı değerlerden ve devrenin doluluk-boşluk oranından yola çıkılarak hesaplanmaktadır. Hesaplanacak olan endüktans değeri devrede oluşacak maksimum giriş akımı dalgalılığı için gerekli olan minimum endüktans değeri olduğu da göz ardı edilmemelidir. Devrede kullanılacak olan



endüktans değerini hesaplamak için Denklem (4.10)'da verilen devrenin giriş akımı dalgalılığı formülünden yola çıkılmaktadır [18].

$$\Delta I_L = \frac{V_i \times D}{f \times L} \quad (4.10)$$

Denklem (4.10)'da hesaplanacak olan endüktans (L) değeri yalnız bırakılırsa devrede kullanılacak endüktans değeri Denklem (4.11) ile hesaplanmaktadır.

$$L = \frac{V_i \times D}{f \times \Delta I_L} \quad (4.11)$$

Hesaplanan endüktans değeri ise Denklem (4.12) ile ifade edilirse;

$$L = \frac{12 \times 0,5}{25000 \times 4} = 60 \mu H \quad (4.12)$$

Hesaplanan endüktans değeri; çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün her bir katında ayrı ayrı kullanılacak olan endüktans değeridir. Çalışma kapsamında iki katlı doğru akım dönüştürücüsü tasarlanacağından dolayı her kat için ayrı ayrı minimum 60 $\mu$ H değerinde endüktans kullanılmadadır.

#### **4.6.2.2. Kondansatör değerinin hesaplanması**

Devrede kullanılacak endüktansın değeri dönüştürücülerde hesaplanacak en önemli parametrelerden bir diğeridir. Hesaplanacak olan kondansatör değeri, devre tasarlama aşamasında Tablo 4.2'de kabul edilmiş bazı değerlerden ve devrenin doluluk-boşluk oranından yola çıkılarak hesaplanmaktadır. Hesaplanacak olan kondansatör değeri devrede oluşacak maksimum çıkış gerilimi dalgalılığı için gerekli olan minimum kondansatör değeri olduğu da göz ardı edilmemelidir. Devrede kullanılacak olan kondansatör değerini hesaplamak için Denklem (4.13)'de verilen devrenin çıkış gerilimi dalgalılığı formülünden yola çıkılmaktadır [18].

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{f \times R \times C} \quad (4.13)$$

Denklem (4.13)'de hesaplanacak olan kondansatör (C) değeri yalnız bırakılırsa devrede kullanılacak kondansatör değeri Denklem (4.14) ile hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{D}{f \times R \times \frac{\Delta V_o}{V_o}} \quad (4.14)$$

Hesaplanan kondansatör değeri ise Denklem (4.15) ile ifade edilirse;

$$C = \frac{0,5}{25000 \times 12 \times \frac{6}{1000}} = 277,78 \mu\text{F} \quad (4.15)$$

Hesaplanan kondansatör değeri, çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün çıkışında kullanılacak olan filtre kondansatörünün minimum değeridir.

#### 4.6.2.3. Maksimum ve minimum bobin akımı değerlerinin hesaplanması

Klasik tip doğru akım dönüştürücülerinde maksimum endüktans akımı Denklem (4.16) ile hesaplanmaktadır.

$$I_{L_{\text{mak}}} = I_{i_{\text{mak}}} = I_i + \frac{\Delta I_i}{2} \quad (4.16)$$

$$I_{L_{\text{mak}}} = I_{i_{\text{mak}}} = \frac{V_i}{(1-D)^2 \times R} + \frac{V_i \times D}{f \times L} \quad (4.17)$$

Hesaplanan maksimum akım değeri Denklem (4.18) ile ifade edilmektedir.

$$I_{L_{\text{mak}}} = I_{i_{\text{mak}}} = \frac{12}{(1-0,5)^2 \times 12} + \frac{12 \times 0,5}{25000 \times 60 \mu\text{H}} = 6\text{A} \quad (4.18)$$

Minimum endüktans akımı ise Denklem (4.19) ile hesaplanmaktadır.

$$I_{L_{\text{min}}} = I_{i_{\text{min}}} = I_i - \frac{\Delta I_i}{2} \quad (4.19)$$

$$I_{L_{\text{min}}} = I_{i_{\text{min}}} = \frac{V_i}{(1-D)^2 \times R} - \frac{V_i \times D}{f \times L} \quad (4.20)$$

Hesaplanan minimum akım değeri Denklem (4.21) ile ifade edilmektedir.

$$I_{L_{\min}} = I_{i_{\min}} = \frac{12}{(1-0,5)^2 \times 12} - \frac{12 \times 0,5}{25000 \times 60 \mu\text{H}} = 2\text{A} \quad (4.21)$$

#### 4.6.3. Anahtarlama güç elemanının ve diyotun belirlenmesi

Tasarlanacak olan devre için belirlenmesi gereken son devre elemanları ise anahtarlama güç elemanı ve diyottur. Anahtarlama güç elemanını seçerken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalar; Drain-Source gerilim değeri, Gate-Source gerilim değeri ve Drain akımı değeridir.

Seçilecek anahtarlama güç elemanının drain-source geriliminin değeri, devredeki maksimum gerilim değeri olan çıkış geriliminden yüksek olmalıdır. Denklem (4.22) ile ifade edilmiştir.

$$V_{DS} \geq 24\text{V} \quad (4.22)$$

Drain akımı ise; kritik anahtarlama modunda çalışıldığı düşünülerek hesaplanmalıdır. Kritik çalışma modunda anahtarlama güç elemanından akacak maksimum akım değeri ise Denklem (4.23) ile hesaplanmaktadır.

$$I_D \geq 2 \times I_L = 2 \times 4 = 8\text{A} \quad (4.23)$$

Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile anahtarlanan, anahtarlama güç elemanları için (drain current single pulse), drain'den akabilecek anlık maksimum akım değeri referans alınabilir. Bu çalışma kapsamında darbe genişlik modülasyonu uygulanması olmasına rağmen drain akım değeri referans alınmıştır. Seçilen anahtarlama güç elemanı olarak N kanal IRFZ44N mosfet'i uygun görülmüştür.

Seçilen IRFZ44N mosfeti için seçim aşamasında referans alınan değerler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3.IRFZ44N mosfet'i için gerekli değerler

IRFZ44N			
$V_{DS}$ (V)		Drain-Source Voltajı	60V
$V_{GS}$ (V)		Gate-Source Voltajı	$\pm 20V$
$I_D$ (A)	25°C	Drain Akımı	50A
	100°C		36A
$I_{DM}$ (A)		Drain Single Pulse Akımı	200A

Son olarak devrede kullanılacak olan diyot belirlenmelidir. Diyot belirlenirken dikkat edilmesi gereken durum ise diyotun üzerinden akacak olan maksimum akımın hesaplanmasıdır. Denklem (3.27)'den yola çıkacak olursak;

$$I_{D,max} = \sqrt{2} \times \frac{P_o}{\eta \times V_{i,rms} \times N} \quad (3.27)$$

Maksimum diyot akımı Denklem (4.24) ile ifade edilmektedir.

$$I_{D,max} = \sqrt{2} \times \frac{48W}{0,95 \times 12V \times 2} = 2,977A \quad (4.24)$$

Denklem (4.24) ile hesaplanan maksimum akım değeri %20 arttırılarak, Denklem (4.25) ile ifade edilmektedir.

$$I_{D,max} \times 1,2 = 2,977 \times 1,2 = 3,57A \quad (4.25)$$

Maksimum gerilim değeri ise, çıkış geriliminin değeri %20 arttırılarak Denklem (4.26) ile hesaplanmaktadır [7].

$$V_o \times 1,2 = 24 \times 1,2 = 28,8V \quad (4.26)$$

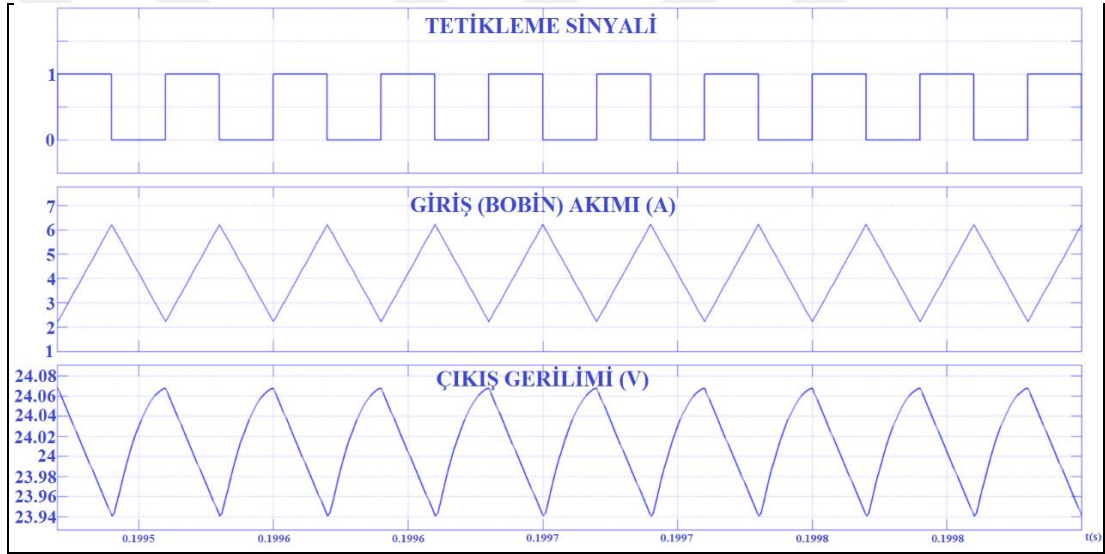
Maksimum akım değeri 3,57A'de ve maksimum gerilim değeri 28,8V'da çalışabilecek devre elemanları seçimi yapılmaktadır. Bu değerler doğrultusunda diyot olarak ise MUR420 (4 A, 50 V - 600 V, Ultrafast) çok hızlı diyotu seçilmiştir.

#### 4.6.4. Benzeşim sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde Tablo 4.3'te verilen klasik yükseltici tip dönüştürücü yapısı referans alınarak hesaplanan parametreler doğrultusunda klasik ve çok katlı dönüştürücü yapıları oluşturulmuştur. Tasarlanan klasik tip doğru akım dönüştürücüsü

için hesaplanan parametrelerde değişiklik yapılmaksızın faz farklı güç katı paralelleyerek çok katlı doğru akım dönüştürücü yapısına geçilmiştir. Çok katlı doğru akım dönüştürücüsü tasarımının ve klasik tip doğru akım dönüştürücüsü tasarımının ayrı ayrı benzeşim çalışmaları yapılmıştır. Son olarak benzeşim çalışması yapılan iki tip dönüştürücü için sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Benzeşim çalışmalarına ilk olarak Tablo 4.2’de verilen klasik tip doğru akım dönüştürücüsü parametreleri ve Şekil 3.1’de bulunan klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devre yapısı referans alınarak başlanmıştır. Bu parametreler ve devre yapısı referans alınarak yapılan benzeşim çalışması sonucunda Şekil 4.3’te görülen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün tetikleme sinyali, giriş akımı ve çıkış geriliminin zamana göre değişimi

Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün benzeşim sonuçları incelendiğinde;

- Giriş akımı dalgalılığının 3,8A civarında olduğu görülmektedir.
- Ortalama giriş akımı değerinin 4A olduğunu kabul edilirse, giriş akımı dalgalılık değerinin %95 olduğu görülmektedir.
- Çıkış gerilimi dalgalılığının 140mV civarında olduğu görülmektedir.
- Ortalama çıkış gerilimi değerinin 24V olduğunu kabul edilirse, çıkış gerilimi dalgalılık değerinin %0,583 olduğu görülmektedir.

Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü yapısına ek olarak faz farklı güç katı paralellenerek çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü yapısına geçilmiştir.

Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü yapısından çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü yapısına geçilirken öncelikle, çok katlı yapıdaki giriş akımı dalgalılık değeri ve çıkış gerilimi dalgalılık değeri hesaplanmıştır.

Giriş akımı dalgalanma periyodu ( $\tau$ ) Denklem (4.3) ile hesaplanmaktadır.

$$\tau = \frac{360}{2} = 180 \quad (4.3)$$

Giriş akımı doluluk-boşluk oranı ( $q$ ) Denklem (4.4) ile hesaplanmaktadır.

$$q = \frac{180}{180} = 1 \quad (4.4)$$

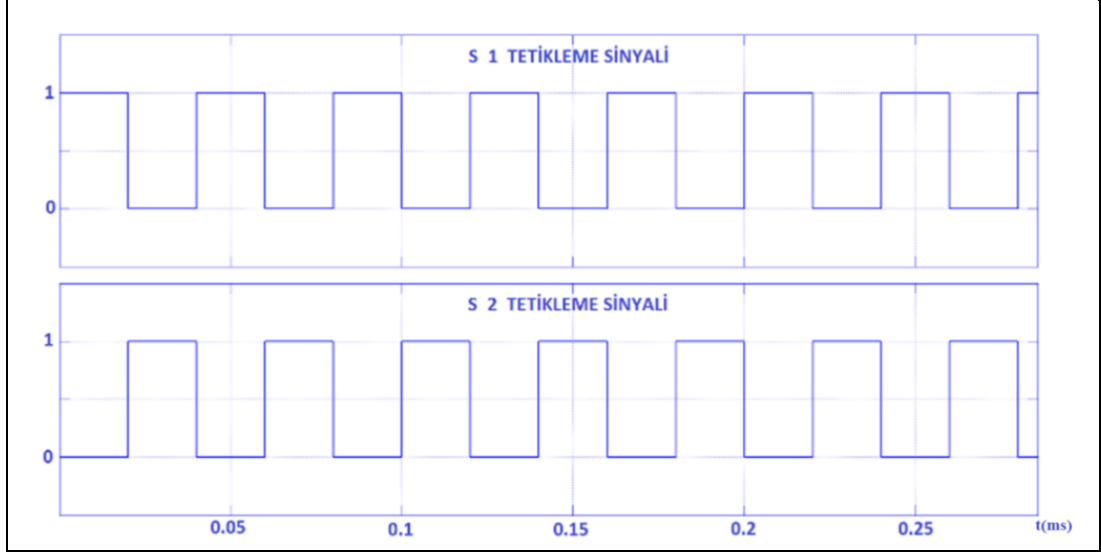
Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünde giriş akımı dalgalılığı ( $\Delta I_i$ ) Denklem (4.5) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta I_i = \frac{12 \times (1-1)}{240 \times 10^{-6} (1-0,5)} \times 1 \times 180 = 0 \quad (4.5)$$

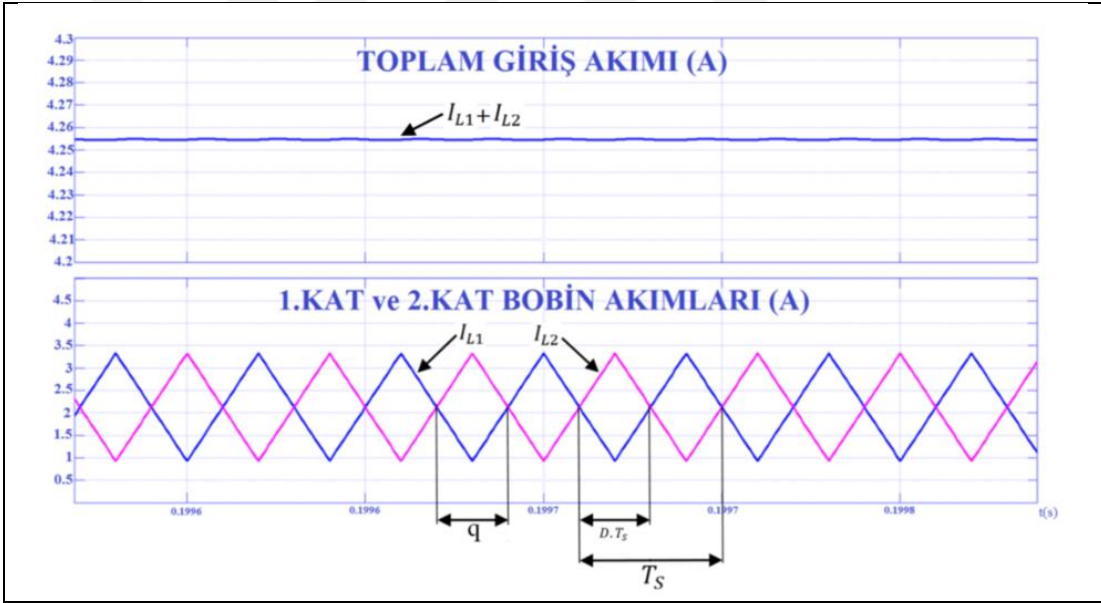
Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünde çıkış gerilimi dalgalılığı ( $\Delta V_o$ ) Denklem (4.6) ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta V_o = \frac{24 \times 1 \times (1-1)}{2^2 \times 25 \times 10^3 \times 12 \times 1,667 \times 10^{-3} (1-0,5)} = 0 \quad (4.6)$$

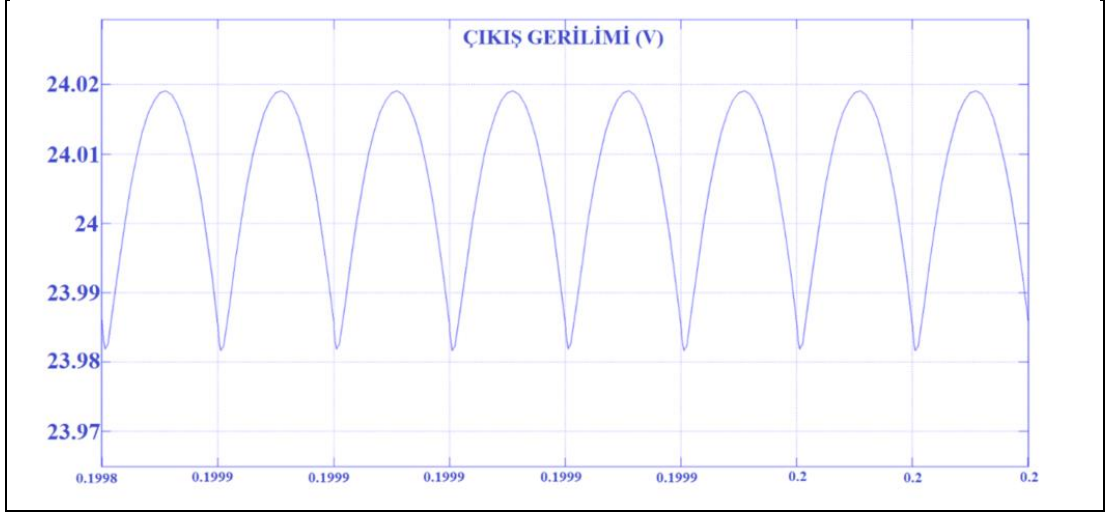
Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü için giriş akımı dalgalılık değeri ve çıkış akımı dalgalılık değerleri hesaplandıktan sonra benzeşim çalışması yapılmıştır.



Şekil 4.4. 2 katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün her bir katı için ayrı ayrı anahtarlama sinyalleri



Şekil 4.5. 2 katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün her bir katı için ayrı ayrı endüktansların akımları ve toplam giriş akımı



Şekil 4.6. 2 katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücünün çıkış gerilim değerinin zamana göre değişimi

Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün benzeşim sonuçları incelenirse;

- Giriş akımı dalgalılığının  $\cong 0A$  civarında olduğu görülmektedir.
- Ortalama giriş akımını  $4,25A$  ve giriş akımı dalgalılık değeri  $0A$  olduğunu kabul edersek, giriş akımı dalgalılık değerinin  $\cong \%0$  olduğu görülmektedir.
- Çıkış gerilimi dalgalılığının  $40mV$  civarında olduğu görülmektedir.
- Ortalama çıkış gerilimi değerinin  $24V$  olduğunu kabul edersek, çıkış gerilimi dalgalılık değerinin  $\%0,167$  olduğu görülmektedir.

Her bir dönüştürücü yapısının benzeşim sonuçlarına bakarak;

- Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünde endüktans akımı, toplam giriş akımına eşittir ve Denklem (4.27) ile ifade edilmektedir.

$$I_i = I_L \quad (4.27)$$

- Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünde her bir katta bulunan endüktansların akımları toplamı, giriş akımına eşittir ve Denklem (4.28) ile ifade edilmektedir.

$$I_i = I_{L1} + I_{L2} + \dots + I_{Ln} \quad (4.28)$$

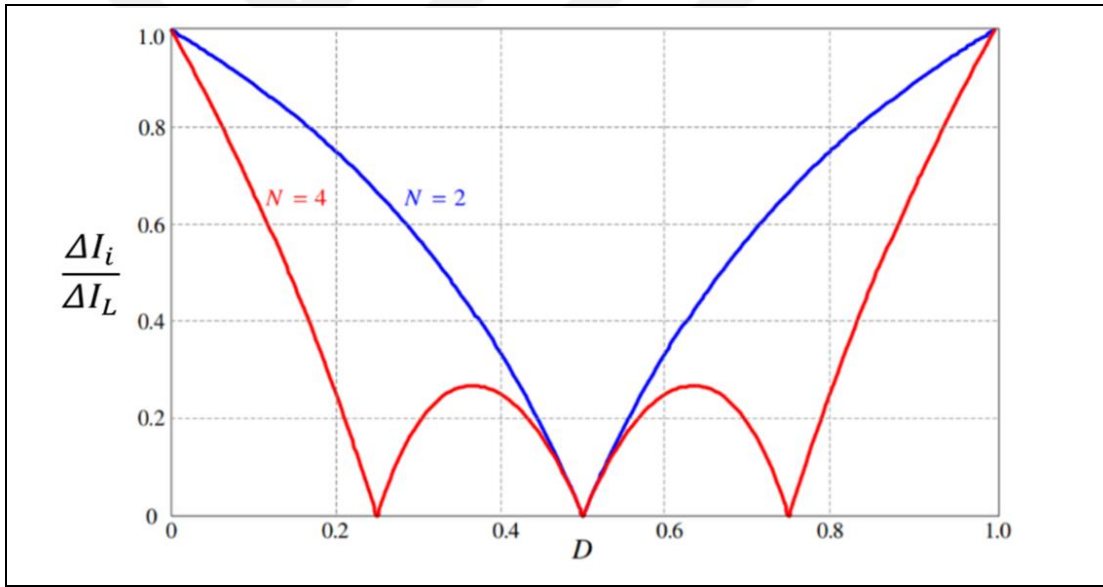
- Klasik yükseltici tip dönüştürücünün giriş akımı dalgalanması yaklaşık olarak  $3,8A$  ( $\%95$ ) iken, iki katlı yükseltici tip dönüştürücüde  $\cong 0A$  civarındadır.



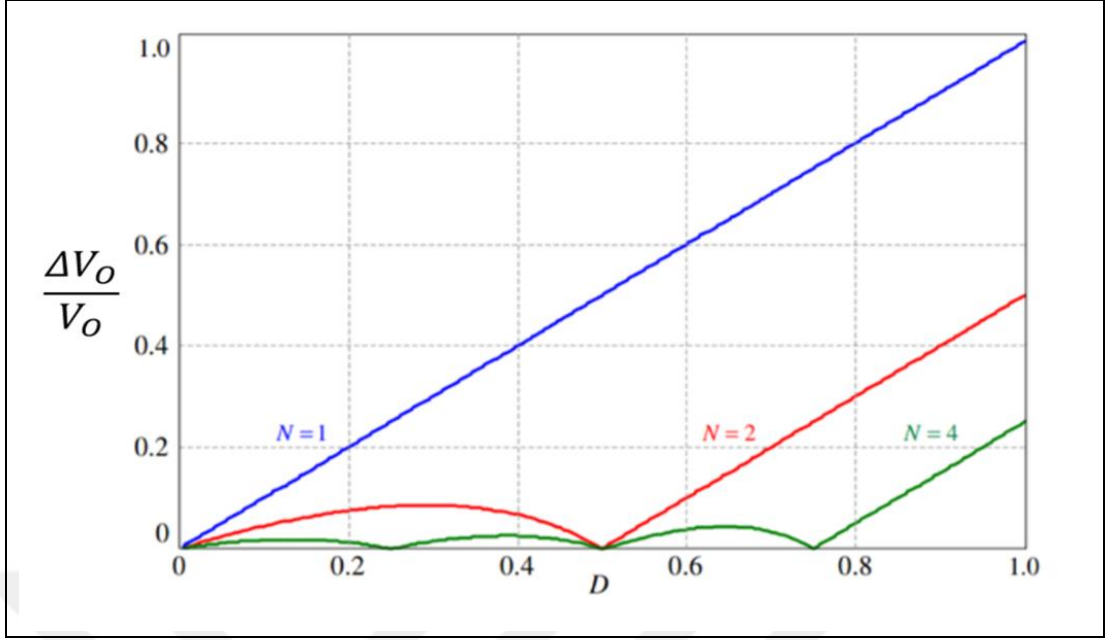
- Klasik yükseltici tip dönüştürücünün çıkış gerilimi dalgalılığı 140mV (%0,583) civarında iken, iki katlı yükseltici tip dönüştürücüde 40mV (%0,167) olmaktadır.
- Klasik yükseltici tip dönüştürücünün etkin anahtarlama frekansı (giriş akımı dalgalanma frekansı) 25 kHz iken, iki katlı yükseltici tip dönüştürücünün etkin frekansı (giriş akımı dalgalanma frekansı) ise 50 kHz olmaktadır.

Benzetim çalışması yapılmış olan iki katlı yükseltici tip dönüştürücüde Şekil 4.3, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'daki sonuç grafiklerinden yola çıkarak, kat sayısı (N) arttıkça giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılığının azaldığı görülmektedir.

Çok katlı doğru akım dönüştürücüsünün kat sayısına ve anahtarlama sinyalinin doluluk-boşluk oranına göre giriş akımı ve çıkış geriliminin dalgalılık grafikleri Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde giriş akımı dalgalanmasının doluluk-boşluk oranına göre değişimi



Şekil 4.8. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerde çıkış gerilimi dalgalanmasının doluluk-boşluk oranı ve paralellenmiş güç katı sayısına göre değişimi

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, önceki bölümlerde analizi ve tasarımı gerçekleştirilen çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinin pratik gerçekleştirilmesi sunulmuştur. Çalışma kapsamı boyunca çok katlı yapı olarak bahsedilen yükseltici tip dönüştürücünün gerçekleştirilmesinde iki katlı yapı ele alınmıştır.

İki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü gerçekleştirilmesi; besleme devresi, kontrol devresi, sürücü devresi ve güç devresinden oluşmaktadır.

### 5.1. Uygulama Devresi Tasarımı

İki katlı yükseltici tip dönüştürücüsü gerçekleştirilmesi yapılırken; PCB devre tasarımı ve şematik çizimler sırasında KiCad programı kullanılmıştır. Tasarımı yapılmış olan devrenin KiCad programında oluşturulmuş olan şematik çizimi ise Ek-A'da gösterilmektedir.

#### 5.1.1. Besleme devresi

Doğru akım ile beslenecek olan birimler için doğrultucu (rectifier) tasarlanmalıdır. Doğrultucular genel olarak alternatif akıma sahip olan şebekeyi önce transformatör ile alternatif akım olarak istenilen gerilim seviyesine dönüştürülür. Daha sonra istenilen gerilim seviyesindeki bu alternatif gerilim tam dalga köprü doğrultucu yardımıyla tam dalga doğrultulur. Tam dalga doğrultulduktan sonra filtre kondansatörü ile istenilen gerilim seviyesinde bir doğru akım kaynağı elde edilmiş olur.

Bu çalışma kapsamında doğrultucu tasarlanmamıştır. Besleme kaynağı olarak hazır olarak alınmış olan 12V ve 12,5A güç kaynağı (SMPS) kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında tasarlanan besleme devresinin KiCad çizimi ise Ek-B'de gösterilmektedir.

Besleme devresi tasarımında 12V-5V dönüşümü için Fairchild firmasının ürettiği LM7805 gerilim regülatörü kullanılmıştır. Genel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1.LM7805 gerilim regülatörünün genel özellikleri

<b>LM7805 Gerilim Regülatörü</b>	
<b>Maksimum Çıkış Akımı</b>	1 A
<b>Minimum Giriş Gerilimi</b>	7 V
<b>Maksimum Giriş Gerilimi</b>	35 V
<b>Çıkış Gerilimi</b>	5 V

### **5.1.2. Kontrol devresi tasarımı**

Kontrol devresi, PWM sinyallerinin üretilmesi için kullanılmıştır. 2 katlı yükseltici tip dönüştürücü için gerekli anahtarlama sinyallerin üretilmesi için mikrodnetleyici de en az 2 kanal PWM sinyali oluşturmak gerekir. Bu devrede PWM sinyali üretmek için yeterli sayıda PWM çıkışı kullanımına izin veren STM32F103C8T6 mikrodnetleyicisi kullanılmıştır.

#### **5.1.2.1. STM32F103C8T6 mikrodnetleyicisi**

STM32F103C8T6 geliştirme kartı, 32 bitlik bir işlemci mimarisine sahip ARM 32 Cortex-M3 CPU çekirdeğinin üzerine inşa edilmiş bir geliştirme kartıdır. Endüstriyel uygulamalarda oldukça tercih edilmesinin sebebi çekirdeğin fiyat ve performans grafiğidir. Çalışma kapsamında STM32F103C8T6 mikrodnetleyicisinin tercih edilmesinin sebebi ise, işlemcide çok sayıda PWM çıkışı alınabilecek pinin bulunmasıdır [25]. STM32F103C8T6 geliştirme kartının genel olarak özellikleri Tablo 5.2’de listelenmiştir.

Tablo 5.2.STM32F103C8T6 geliştirme kartının genel olarak özellikleri

<b>STM32F103C8T6</b>	
<b>Çekirdek</b>	Cortex-M3
<b>Çalışma Frekansı (Maks.)</b>	72MHz
<b>Depolama Alanı</b>	64K Byte Flash 20KByte SRAM
<b>Arayüz Kaynakları</b>	2 x SPI 3 x USART 2 x I2C 1 x CAN 37 x I/O Port
<b>Analog / Dijital Çevrim</b>	2 x ADC
<b>Timer</b>	3 x Genel Timer 1 x Gelişmiş Timer
<b>Güç Girişi ve Çıkışı</b>	3.3V – 5V
<b>Çıkış Akımı (Maks.)</b>	300mA
<b>IDE</b>	Keil IAR

STM32F103C8T6 geliştirme kartının pin konfigürasyonu ise Ek-C’de gösterilmiştir [25].

#### 5.1.2.2. STM32F103C8T6 mikrodenetleyicisi ile PWM sinyalinin üretilmesi

STM32F103C8T6 mikro denetleyicisi ile PWM sinyali üretmenin birçok yolu vardır. Çalışma kapsamında yukarı-aşağı sayıcı kullanılmıştır. Bir periyot içerisinde sıfırdan başlayarak belirlenen bir değere kadar lineer yükselen ve daha sonra belirlenen maksimum değerden başlayarak tekrar sıfıra gelene kadar lineer azalan bir sayıcı kullanılmıştır. Kullanılan bu sayıcı tipi üçgen dalga formuna sahiptir. Faz kaydırmalı PWM sinyali ise üçgen dalga formundan yola çıkarak elde edilmiştir. PWM sinyalinin doluluk-boşluk oranını belirlemek için maksimum değer (0,85) ile sıfır arasında bir değer seçilmiştir. Daha sonra seçilen bu değerden yola çıkarak mikro denetleyicinin iki ayrı çıkışından 180 derece faz farklı ve eşit doluluk-boşluk oranına sahip iki tane PWM sinyali oluşturulmuştur.

İstenilen PWM sinyallerini mikro denetleyicide oluşturmak için CubeMx programı kullanılmıştır. PWM sinyalinin oluşturulma aşamaları Ek-D, Ek-E, Ek-F, Ek-G, Ek-H ve Ek-I’da gösterilmiştir.

PWM sinyali oluştururken dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan birisi sayıcının modudur. Sayıcı sadece yukarı sayıcı, sadece aşağı sayıcı veya yukarı-aşağı sayıcı olarak 3 şekilde konfigüre edilebilmektedir. İki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerinde, PWM sinyalinin oluşturulmasında en kolay yöntemlerden birisi üçgen dalga kullanılarak duty cycle için belirlenen bir set değeri kıyaslaması yapmaktır. Mikro denetleyici tarafında üçgen dalga oluşturmak için kullanılması gereken sayıcı tipi ise yukarı-aşağı sayıcı tipidir.

PWM sinyali oluşturulurken bir diğer önemli konu ise PWM frekansının ayarlanmasıdır ve Denklem (5.1) ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Clock Sinyal Frekansı} = (\text{Prescaler}+1) \cdot (\text{Sayıcı Periyodu}+1) \times f_{\text{PWM}} \quad (5.1)$$

25kHz'lik PWM sinyali için Denklem (5.1) ve üçgen dalga periyodu için 2 çarpanı dikkate alınacak olursa Denklem (5.2) ile hesaplanmaktadır.

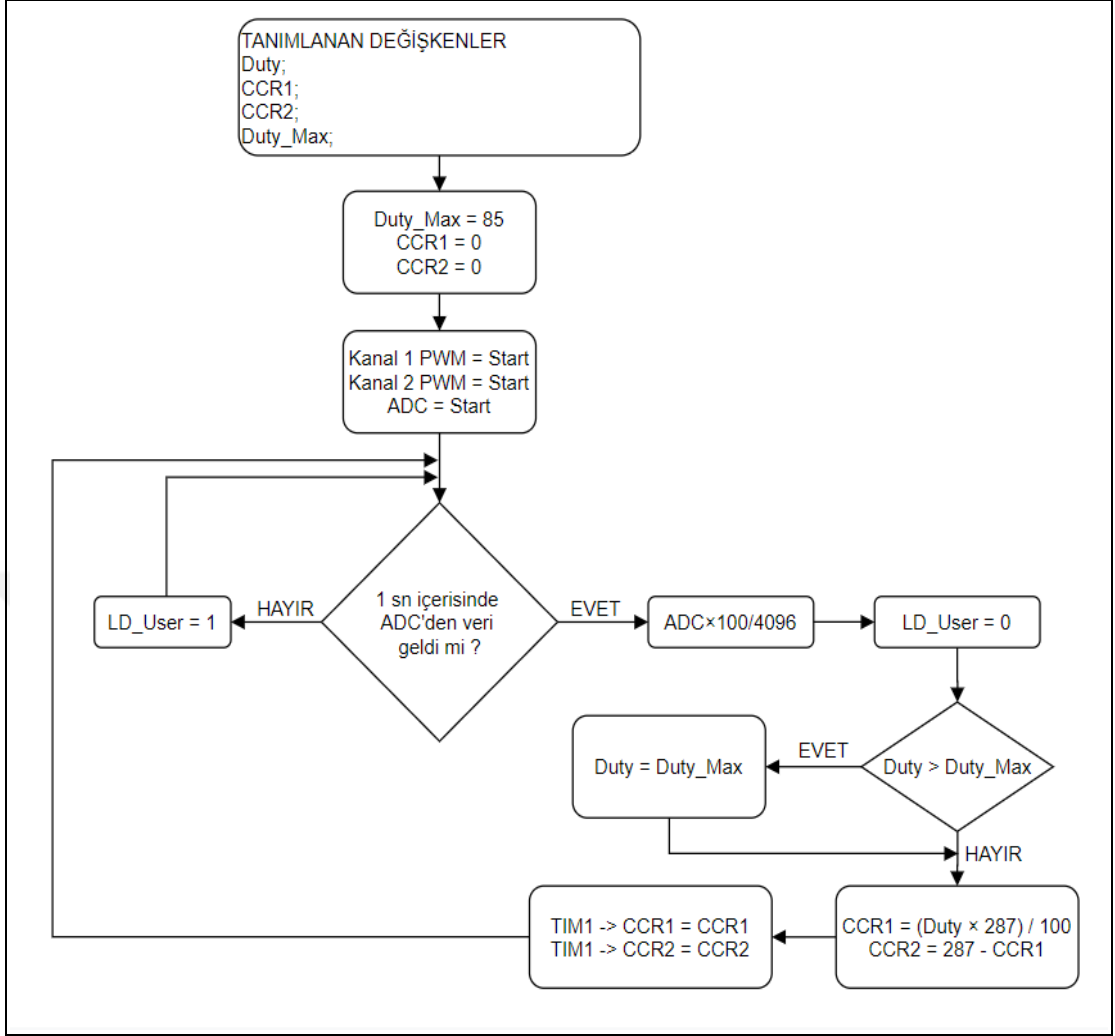
$$72000000 = (4+1) \times (287+1) \times 25000 \times 2 \quad (5.2)$$

Çalışma kapsamında 1. PWM set değeri ile 2. PWM set değerleri ise Denklem (5.3) ile ifade edilmektedir.

$$287 = 1.\text{PWM Set değeri} + 2.\text{PWM Set değeri} \quad (5.3)$$

CubeMx programında oluşturulan pin konfigürasyonu ise Ek-J'de görüldüğü gibidir.

Tüm konfigürasyonlar yapıldıktan sonra son olarak mikro denetleyicinin analog girişinden, doluluk-boşluk oranını ayarlamak için gerekli olan set değerini okuyan ve birbirinden 180 derece faz farklı 2 ayrı PWM sinyalinin üreten program yazılmıştır. Geliştirilen akış şeması Şekil 5.1'de ve kaynak kod parçası Şekil 5.2'de verilmektedir.



Şekil 5.1. Program akış şeması

```

while (1)

    if(HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1000) != HAL_OK)
    {
        HAL_GPIO_WritePin(LD_User_GPIO_Port, LD_User_Pin, GPIO_PIN_SET);
    }
    else
    {
        Duty = (HAL_ADC_GetValue(&hadc1) * 100) / 4096;
        HAL_GPIO_WritePin(LD_User_GPIO_Port, LD_User_Pin, GPIO_PIN_RESET);
        if(Duty > Duty_Max) Duty = Duty_Max;
        CCR1 = (Duty * 287) / 100;
        CCR2 = 287 - CCR1;
        TIM1->CCR1 = CCR1;
        TIM1->CCR2 = CCR2;
        HAL_ADC_Start(&hadc1);
    }
  
```

Şekil 5.2. CubeMx programında faz farklı PWM üretme programı

### 5.1.3. Sürücü devresi tasarımı

Çalışma kapsamında tasarımı yapılan iki katlı yükseltici tip dönüştürücülerde anahtarlama güç elemanı iletime ve kesime sokabilmek için PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sinyaline ihtiyaç duyulmaktadır. PWM sinyali mikro denetleyiciler tarafından üretilmektedir. Fakat mikro denetleyicilerde üretilen bu sinyalin, anahtarlama güç elemanına iletilmesi aşamasında yalıtım problemi ve anahtarlama güç elemanı sürmek için uygun gerilim seviyesini ulaşamamak gibi problemler meydana gelmektedir. Bu problemleri ortadan kaldırmak için, mikro denetleyiciden elde edilen PWM sinyali ile anahtarlama güç elemanı arasında sürücü devresi kullanmak gerekir. Sürücü devresi anahtarlama güç elemanı ile mikro denetleyici arasındaki gerekli yalıtımı sağlamakla birlikte anahtarlama güç elemanını anahtarlayabilmek için gerekli gerilim seviyesinde anahtarlama yapmayı sağlamaktadır.

Çalışma kapsamında tasarlanan devrenin KiCad çizimi ise Ek-K'de gösterilmektedir.

Çalışma kapsamında sürücü entegresi olarak TOSHIBA markasının ürettiği TLP251 optokuplör entegresi kullanılmıştır. TLP251 entegresinin genel özellikleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3. TLP251 optokuplör entegresi genel özellikleri

TLP251 Optokuplör	
<b>Maksimum Sinyal Akımı</b>	5 mA
<b>Maksimum Besleme Akımı</b>	11 mA
<b>Besleme Gerilimi</b>	10-35 V
<b>Maksimum Çıkış Akımı</b>	$\pm 0.4A$
<b>Anahtarlama Frekansı</b>	25 kHz
<b>İzolasyon Gerilimi</b>	$2500V_{rms}$

### 5.1.4. Güç devresi tasarımı

Temel olarak klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü devre tasarımı referans alınmaktadır. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü üzerinde güç katı devre elemanları olan endüktans, anahtarlama güç elemanı ve diyot paralellenecek çok katlı yapı oluşturulmaktadır.



Çalışma kapsamında tasarlanan devrenin KiCad çizimi ise Ek-L’de görülmektedir.

Güç devresinde bulunan anahtarlama güç elemanı ve diyot için gerekli seçim kriterleri ve bu devre elemanlarının genel özellikleri (4.6.3. Anahtarlama güç elemanının ve diyot’un belirlenmesi) önceki bölümlerde anlatılmıştır.

## **5.2. Baskı Devre Çizimleri**

Çalışma çerçevesinde tasarlanan devrenin prototipinin yapılabilmesi için ilk aşama olan baskı devre tasarımı KiCad programında çizilmiş ve 2 katlı olmak üzere 10cm-10cm bakır plakaya baskı yapılmıştır. Tasarlanan devrenin baskı devre kartı görselleri Ek-M ve Ek-N’de gösterilmiştir.

## **5.3. Deneysel Sonuçlar**

Tez çalışması için Şekil 5.3’te görülen düzenek gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen devre düzeneğinde birbirinden bağımsız iki ayrı güç katı bulunmaktadır. Karşılaştırma için, devrede bulunan iki ayrı güç katından herhangi birisi devreye alınarak tek katlı klasik tip doğru akım dönüştürücüsü yapısı çalıştırılmıştır. Güç katlarından diğeri de faz kaydırılarak devreye alındığında iki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü yapısına geçilmektedir. Her iki durum için devrenin anahtarlama güç elemanı anahtarlama sinyalleri, giriş akımları, giriş akımı dalgalılığı, çıkış gerilimi ve çıkış gerilimi dalgalılığı görüntüleri alınmıştır. Görüntülerin alınmasında RTH1002 ROHDE SCHWARZ osiloskobu kullanılmıştır.

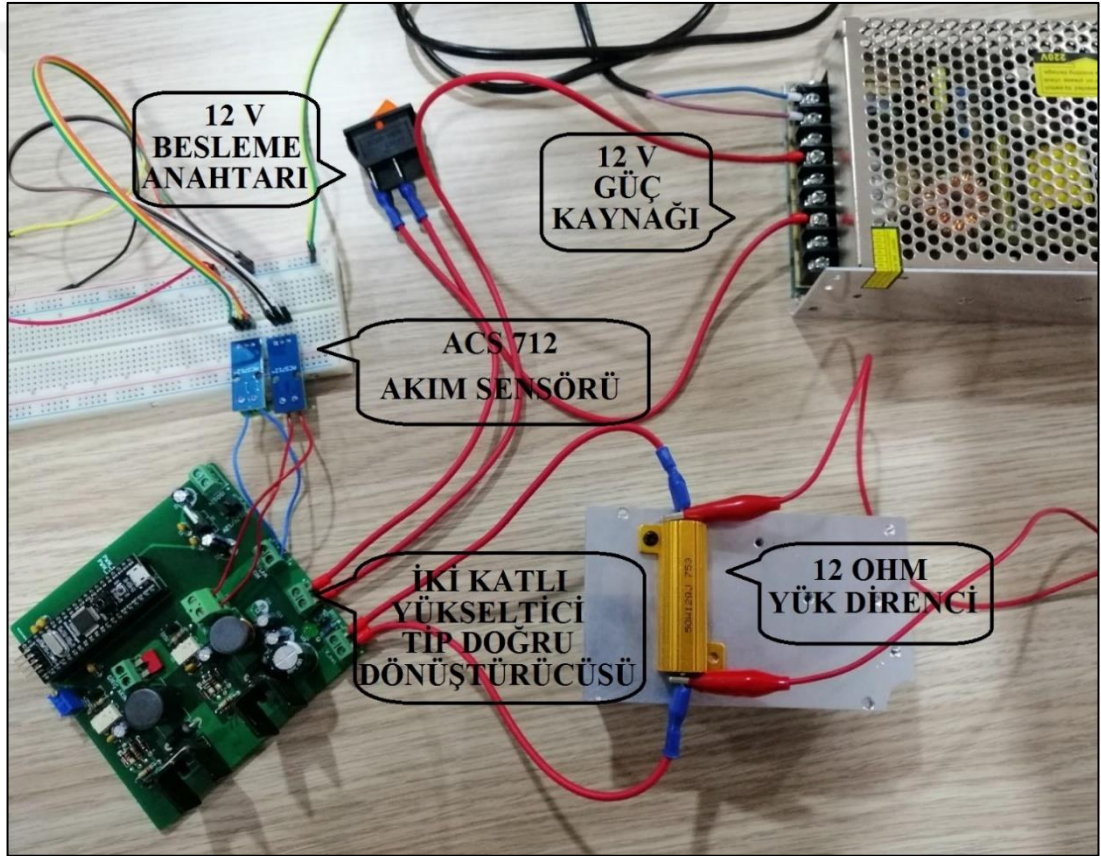
Anahtarlama sinyalleri ayarlanırken; teorik olarak hesaplanan doluluk-boşluk değeri 0,5 tir. Devre kayıpları göz önünde bulundurulduğunda ise çıkış gerilimi olarak 24 V gerilim elde edilebilmesi için doluluk-boşluk oranı 0,538 olarak alınmıştır.

Akım ölçümlerinin alınabilmesi için ACS712 akım sensörü (5A) kullanılmıştır.

Tablo 5.4.ACS 712 akım sensörü genel özellikleri

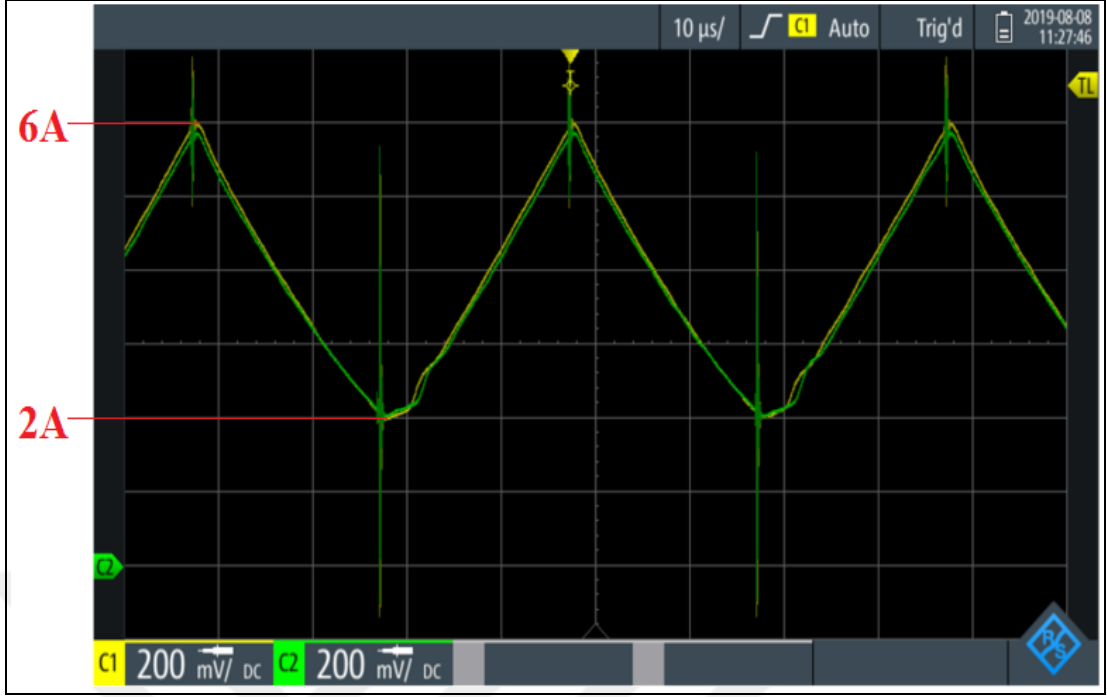
ACS 712 Akım Sensörü	
Ölçülebilen Minimum Akım	-5A
Ölçülebilen Maksimum Akım	+5A
Besleme Gerilimi	5 V
1 A için Çıkış Gerilimindeki Gerilim Artışı	185 mV
Maksimum Çıkış Gerilimi	5 V

ACS 712 akım sensörünün giriş akımına karşı ürettiği çıkış gerilimi değerleri ise Ek-O'da yer almaktadır [27].

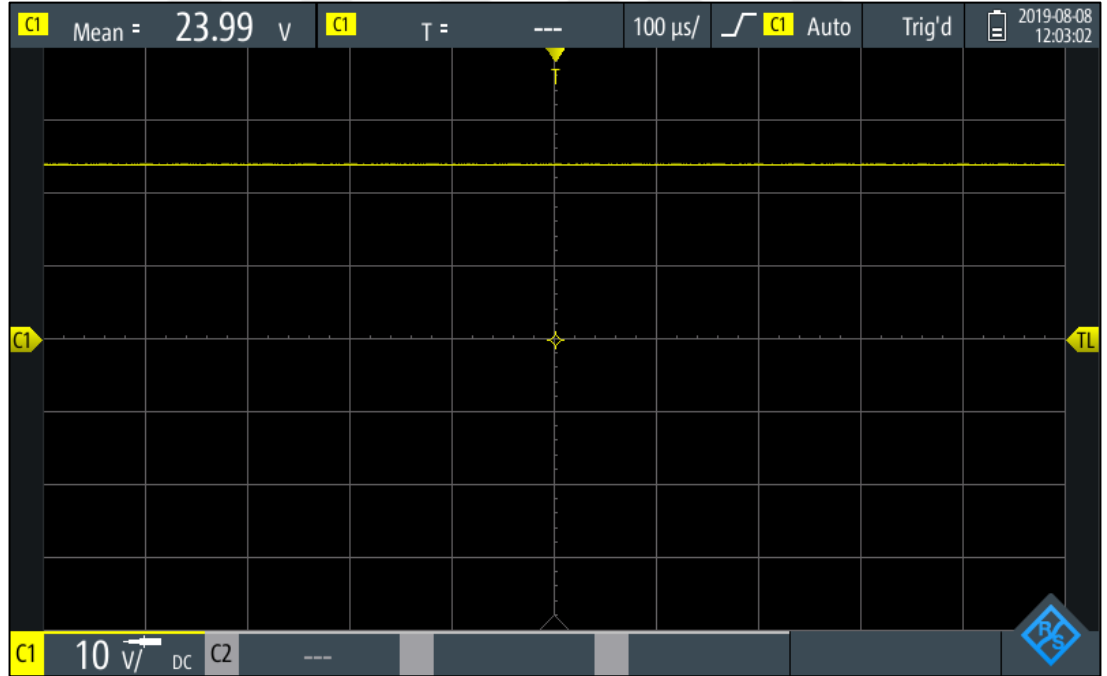


Şekil 5.3. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü için gerçekleştirilen düzenek

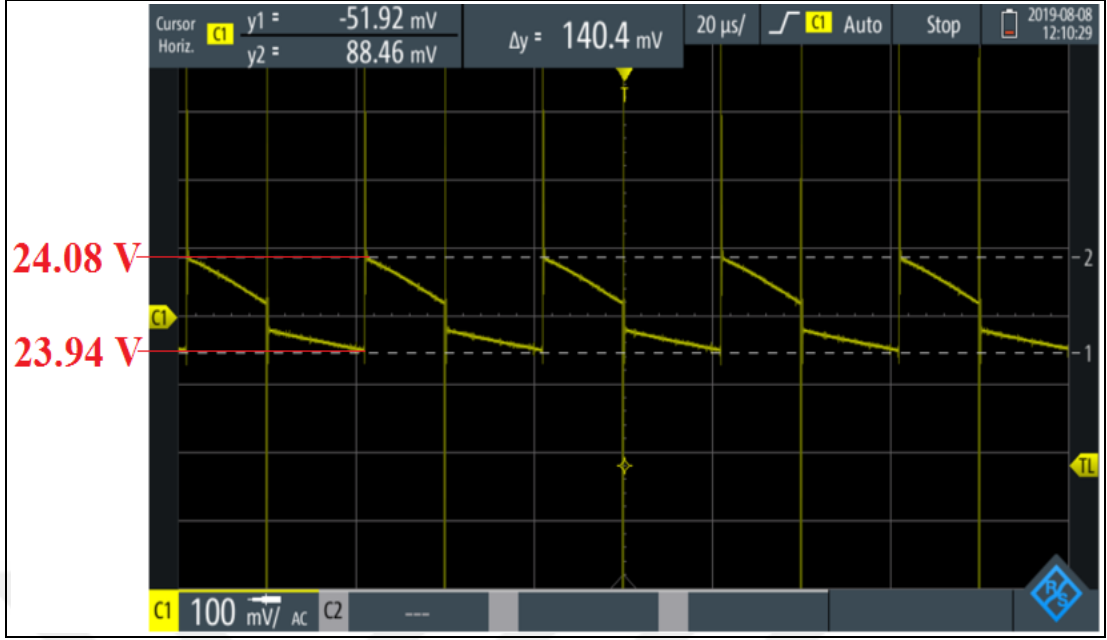
Gerçekleştirilen dönüştürücü yapısı öncelikle klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücü olarak çalıştırılmıştır. Şekil 5.4'te klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinin giriş akımı ve Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da çıkış gerilimi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.4. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün giriş akımı (sarı) ve güç katında bulunan endüktans üzerinden akan akımının (yeşil) zamana bağlı değişimleri

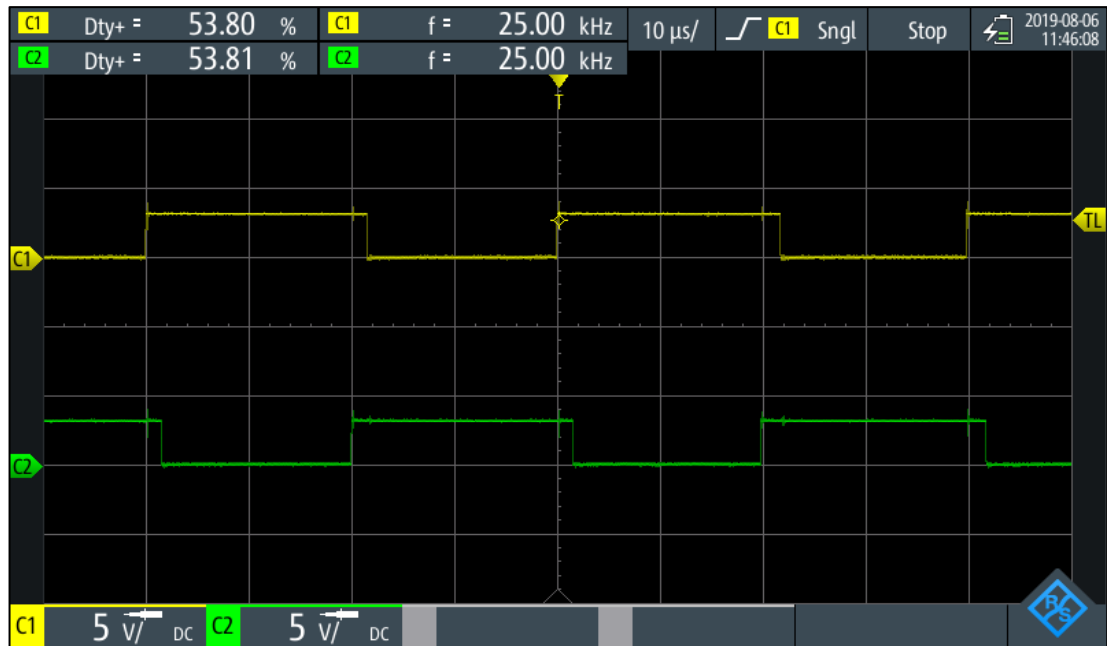


Şekil 5.5. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü çıkış geriliminin zamana bağlı değişimi

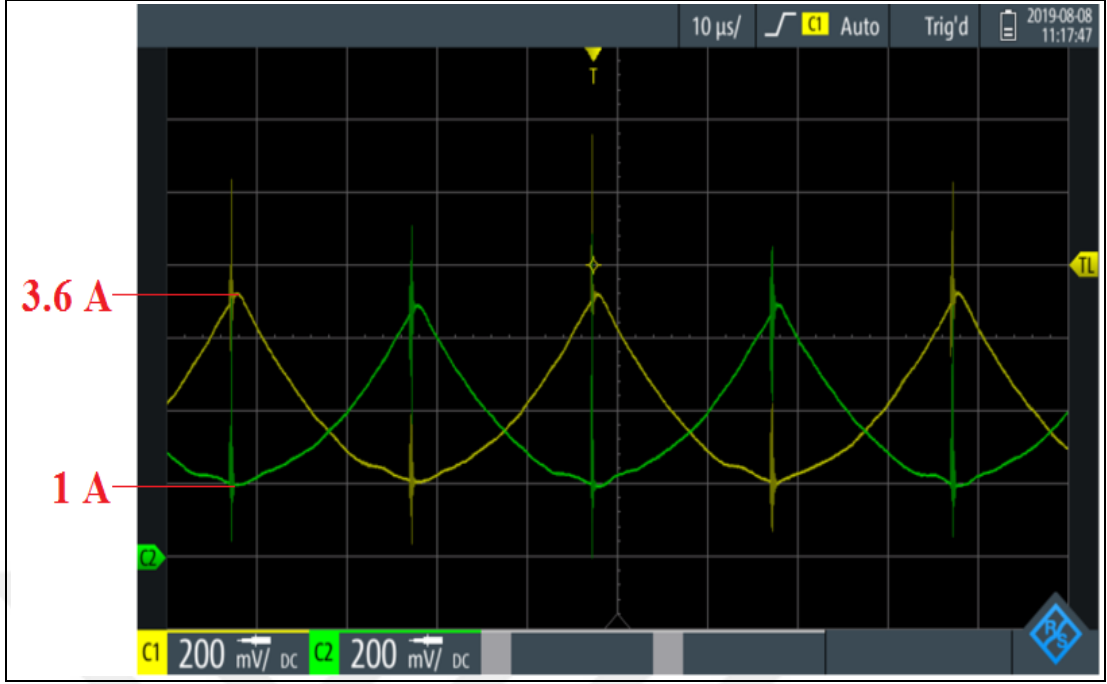


Şekil 5.6. Klasik yükseltici tip doğru akım dönüştürücü çıkış gerilimi dalgalılığının zamana bağlı değişimi

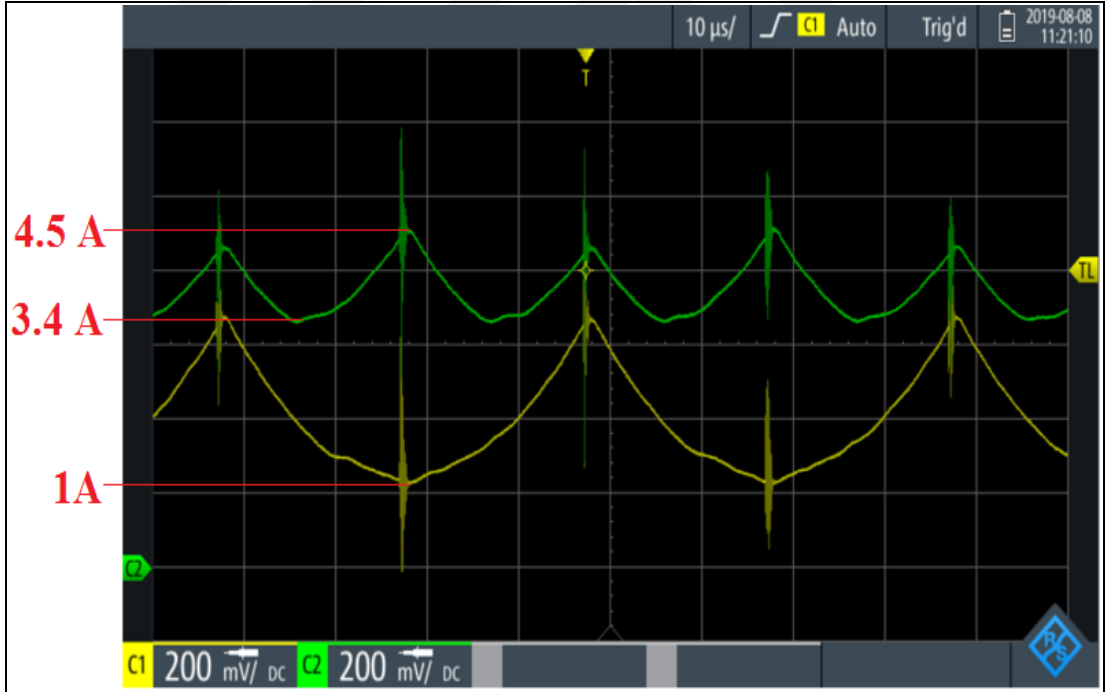
2. Katın devreye alınması ile gerçekleştirilen dönüştürücü yapısı daha sonra iki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü olarak çalıştırılmıştır. Şekil 5.7’de iki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinin 180 derece faz farklı anahtarlama güç elemanı anahtarlama sinyalleri, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da giriş akımları, Şekil 5.10’da çıkış gerilimi dalgalılığı verilmiştir.



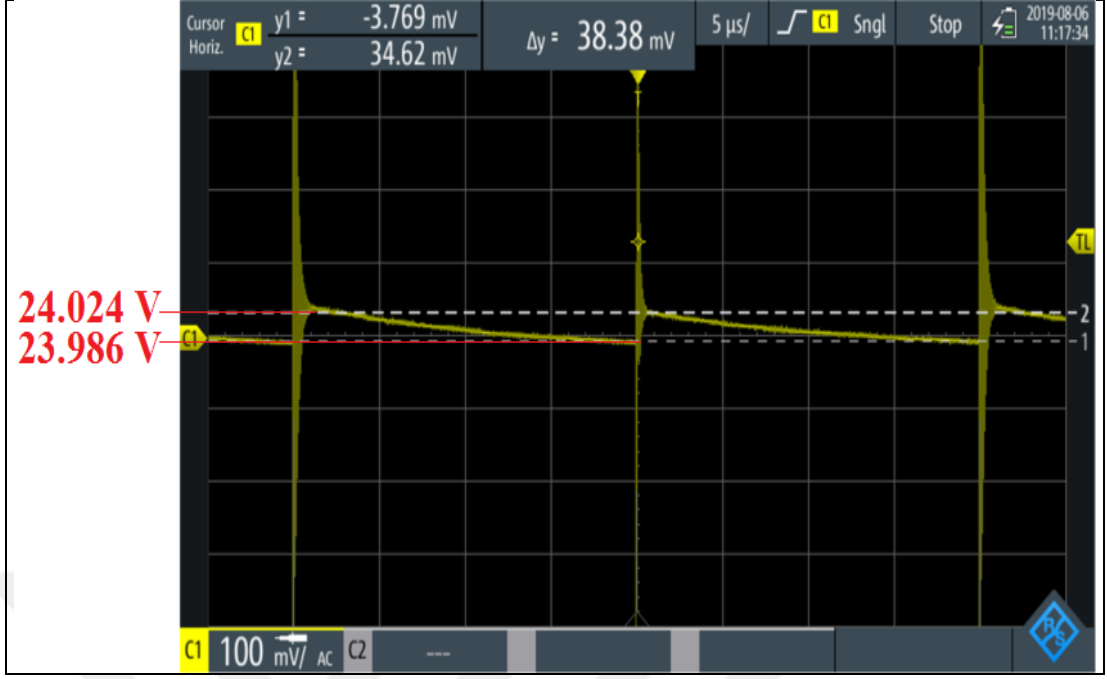
Şekil 5.7. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü anahtarlama güç elemanı anahtarlama sinyallerinin zamana bağlı değişimleri



Şekil 5.8. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün 1.kat ( $I_{L1}$ ) giriş akımı (sarı) ve 2. kat giriş akımı ( $I_{L2}$ ) akımının (yeşil) zamana bağlı değişimleri



Şekil 5.9. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsünün toplam giriş akımı ( $I_g$ ) giriş akımı (yeşil) ve 1. kat giriş akımı ( $I_{L1}$ ) akımının (sarı) zamana bağlı değişimleri



Şekil 5.10. Çok katlı yükseltici tip doğru akım çıkış gerilimi dalgalılığının zamana bağlı değişimi

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde doğru akım kullanılan sistemlerin yaygınlaşması ile birlikte yüksek verimli ve yüksek anahtarlama frekanslarında çalışan küçük boyutlu doğru akım dönüştürücülere olan gereksinim artmaktadır. Bunun yanı sıra, doğru akım dönüştürücüleri için 100W ve üzeri güçlerde, tek bir dönüştürücü kullanmak yerine, güç paylaşımı yapılarak toplam gücün her bir güç katına eşit olarak dağıtılacak şekilde, daha düşük güçlü dönüştürücülerin paralellenenerek kullanımı birçok açıdan avantaj sağlamaktadır. Çok katlı yapıda, paralel bağlı doğru akım dönüştürücülerdeki güç anahtarlarının anahtarlama sinyalleri arasında faz kaydırma işlemi yapılarak, giriş akımı ve çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarı azaltılır ve dönüştürücülerin çalışma frekansı değiştirilmeden etkin anahtarlama frekansı yükseltilmiş olur. Giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalanmasındaki değişim sayesinde dönüştürücülerde kullanılan pasif devre elemanlarının (endüktans ve kondansatör) ve dolaylı yoldan da anahtarlama elemanının ve diyotun boyutları küçültülebilmektedir. Paralel bağlı dönüştürücüler, yüksek anahtarlama frekansları ile çalıştırıldığında ise, yapısındaki fazla sayıda güç anahtarı ve çıkış diyotu kayıp güç miktarını arttırmaktadır. Bu çalışma kapsamında, basit yapısı ile birçok güç elektroniği uygulamasında kullanılan yükseltici tip doğru akım dönüştürücü, hem klasik hem de çok katlı olarak analiz edilmiş ve deneysel uygulaması yapılmıştır [3].

Çalışma kapsamında tasarlanan klasik yükseltici tip ve iki katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücülerinin sonuçları kıyaslandığında,

- Etkin anahtarlama frekansı klasik yükseltici tip dönüştürücüde 25 kHz iken, iki katlı yükseltici tip dönüştürücüde 50 kHz olmuştur.
- Her iki çalışma durumu için; Anahtarlama sinyalinin doluluk-boşluk (duty cycle) oranının 0,538 olarak alındığı görülmektedir.
- İki katlı yapının anahtarlama sinyalleri arasında 180 derece faz farkı olduğu görülmektedir.

- İki katlı yapı için; kat akımlarının grafiklerine bakılırsa, her bir kat için eşit güç paylaşımı yapıldığı görülmektedir.
- Giriş akımı dalgalılık değeri klasik yükseltici tip dönüştürücüde 4A (%100) civarında iken, iki katlı yükseltici tip dönüştürücüde 1,1A (%27,8) civarındadır.
- Çıkış gerilimi dalgalılık değeri klasik yükseltici tip dönüştürücüde 140mV (%0,58) civarında iken; iki katlı yükseltici tip dönüştürücüde 38mV (%0,159) civarındadır.

Sonuçlara bakılacak olursa, klasik tip doğru akım dönüştürücüsüne kıyasla; iki katlı yapıda, etkin anahtarlama frekansının arttığı, giriş akımı dalgalılığının ve çıkış gerilimi dalgalılığının azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlar çalışmanın başarılı olduğunu göstermektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda çok katlı yapı kullanılarak giriş akımı ve çıkış gerilimi dalgalılıkları sabit tutularak devrede kullanılan elemanların boyutlarının küçültülmesi de amaçlanabilir. Kontrol devresi için, kat akımlarından sürekli şekilde bilgi alarak doluluk-boşluk oranlarının düzenlendiği bir devre yapısı uygulanabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] Yapıcı R., Erfidan T., Çoruh N., Bilgin M.Z., Çok Katlı Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması Design and Application of Interleaved Boost Converter. *Eleco 2014 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 298-301, 27 - 29 Kasım 2014.
- [2] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., *Güç Elektroniği: Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım*, Çevirenler: N. Tuncay, M. Gökaşan, S. Boğosyan, Literatür Yayıncılık, 2010.
- [3] Çoruh N., Yumuşak Anahtarlamalı Sarmaşık Tip DA-DA Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348738.
- [4] Karakaya A.M., Aktif Güç Faktörü Düzeltme Devrelerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 322633.
- [5] Genç N., İskender I., DSP-Based Current Sharing of Average Current Controlled Two-Cell Interleaved Boost Power Factor Correction Converter. *IET Power Electronics*, 2011, **4**(9), 1015-1022.
- [6] Coruh N., Urgan S., Erfidan T., Ozturk S.A., Simple and Efficient Implementation of Interleaved Boost Converter, *2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2364-2368, 2011.
- [7] Genç N., Birim Güç Katsayılı ve Sıfır-Gerilim-Geçişli Yeni Bir Sarmaşık Yükselten Dönüştürücünün Tasarımı ve Gerçeklenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 269138.
- [8] Woldegiorgis D.L., *Design and Control of Three - Channel Interleaved Boost Power Factor Correction (PFC) Converter*, 2017, DOI: 10.13140/RG.2.2.20230.06724.
- [9] Nussbaumer T., Raggl K., Kolar J.W., Design Guidelines for Interleaved Single-Phase Boost PFC Circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**(7), 2559-2573, 2009.
- [10] Ghaderi D., PI Kontrollü Kaskat DA/DA Boost Dönüştürücülerinin Yük Paylaşımı Metodu ile Verim Analizi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2017, 470897.

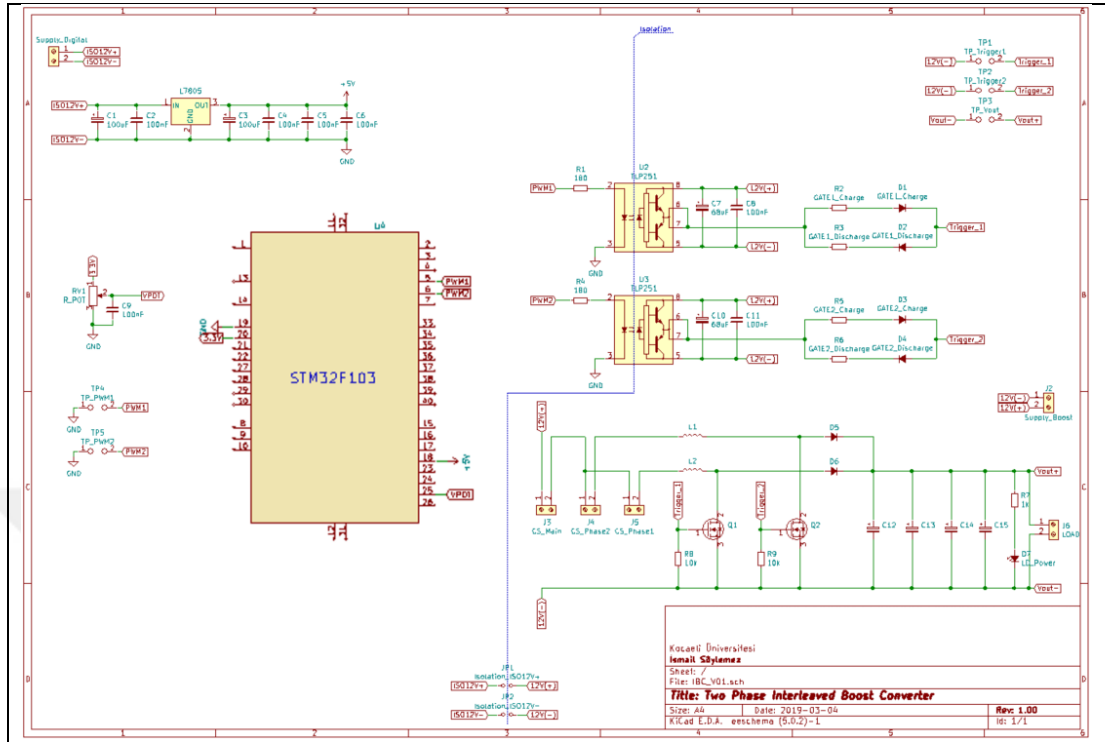
- [11] Başoğlu M.E., Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılan Maksimum Güç Noktası İzleyicili Yükseltici DA-DA Dönüştürücü Analizi ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 323167.
- [12] Karagöz F.E., Yükselten Tür DA/DA Dönüştürücülerin Düşüm Yöntemiyle Paralel Çalıştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011, 322945.
- [13] Erdoğan A.D., Yakıt Hücresi Çıkışında Kullanılan Boost DA-DA Dönüştürücüler için Yeni Paralleleme Yöntemlerinin Geliştirilmesi ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009, 234025.
- [14] Parveen N., Rupesh K.C., Design and Simulation of Interleaved DC-DC Boost Converter for Three-Phase Loads Using Solar Panel. *2016 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC)* (pp. 514-519). IEEE, 2016.
- [15] Mohammed S. S., Devaraj D., Simulation of Incremental Conductance MPPT Based Two Phase İnterleaved Boost Converter Using MATLAB/Simulink. *2015 IEEE International Conference on Electrical, Computer and communication Technologies (ICECCT)*, 1-6, 2015.
- [16] Tseng K. C., Cheng C.A., Chen C.T., High Step-Up Interleaved Boost Converter for Distributed Generation Using Renewable and Alternative Power Sources. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, 5(2), 713-722.
- [17] Ramesh A., Kumar M.S., Sekhar O.C., Interleaved Boost Converter Fed with PV for Induction Motor/Agricultural Applications, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2016, 7(3), 835.
- [18] Rashid M.H., *Güç Elektroniği: Anahtarlama güç elemanı Elemanlar, Devreler ve Uygulamaları*, Çevirenler: S. Sünter, M.T. Aydemir, Nobel Akademik Yayıncılık, 2015.
- [19] Arango E., Ramos-Paja C., Calvente J., Giral R., Serna S., Asymmetrical interleaved DC/DC switching converters for photovoltaic and fuel cell applications-Part 1: Circuit generation, analysis and design, *Energies*, 2012, 5(11), 4590-4623.
- [20] Miwa B.A., Otten D.M., Schlecht M.E., High efficiency power factor correction using interleaving techniques. *APEC'92 Seventh Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 557-568, 1992
- [21] <http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/132-cok-katli-yukseltici-tip-da-da-donusturucu-tasarimi> (Ziyaret tarihi: 22.09.2019)

- [22] Tinç N.S., Aksoy İ., Şahin Y., Elektrikli Araçların Batarya Şarjında Kullanılan Güç Faktörü Düzeltmeli Klasik ve İnterleaved Yükseltici Türü Dönüştürücülerin Karşılaştırılması. 6. *Enerji Verimliliği Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi*, Sakarya, Türkiye, 2015.
- [23] Wu K.C., *Switch-Mode Power Converters: Design and Analysis*. Elsevier, 2005.
- [24] Kaya M.C., Design, Implementation, and Control of A Two stage AC/DC Isolated Power Supply with High Input Power Factor and High Efficiency, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 176850.
- [25] <https://kodmek.com/stm32f103-gelistirme-karti.html> (Ziyaret tarihi: 29.12.2019)
- [26] RM0008, S.T., Reference Manual STM32F101xx. *STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx Advanced ARM-Based*.
- [27] <https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=ACS712> (Ziyaret tarihi: 29.12.2019)



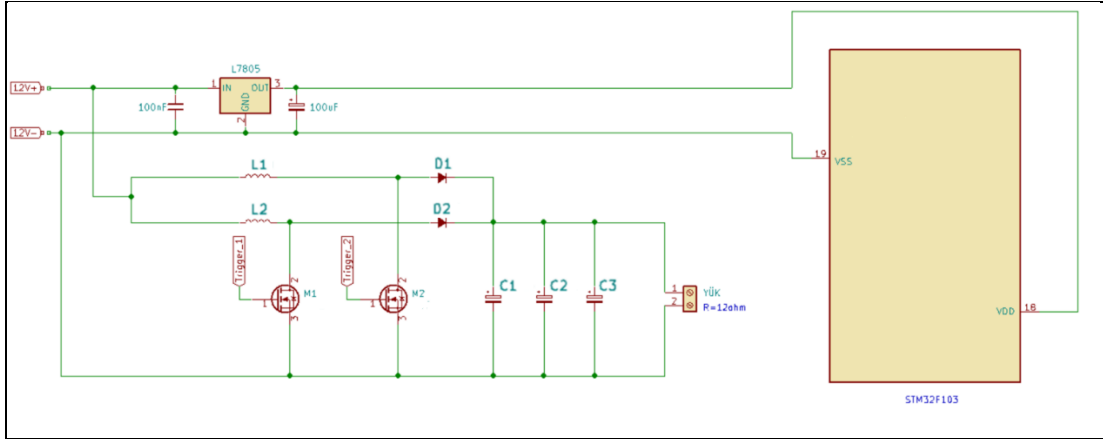
**EKLER**

## Ek-A



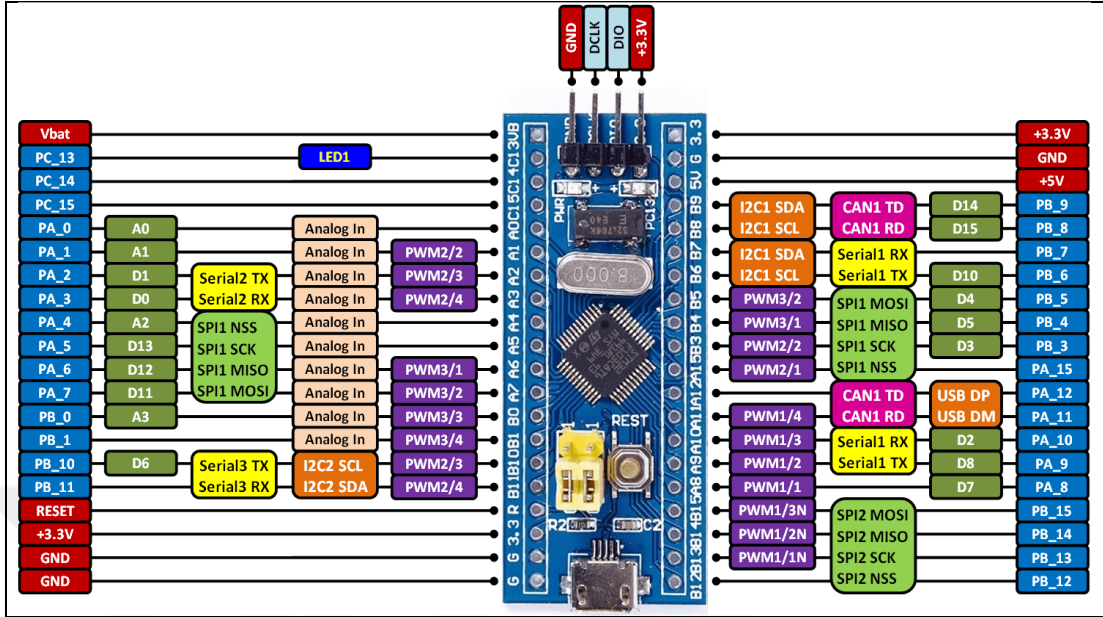
Şekil A.1.Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinin KiCad programında şematik çizimi

## Ek-B



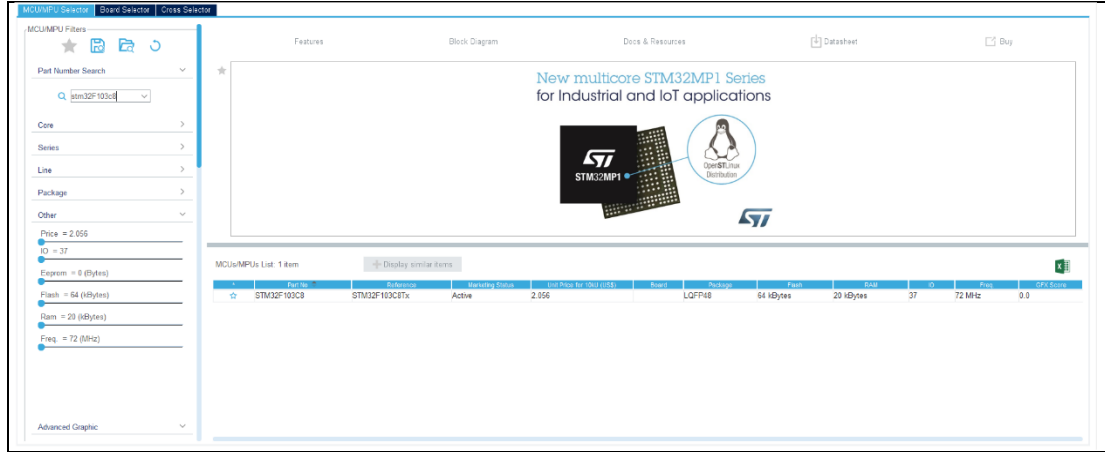
Şekil B.1. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinde 12V ve 5V besleme devreleri tasarımları

## Ek-C



Şekil C.1. STM32F103C8T6 geliştirme kartının pin konfigürasyonu

## Ek-D



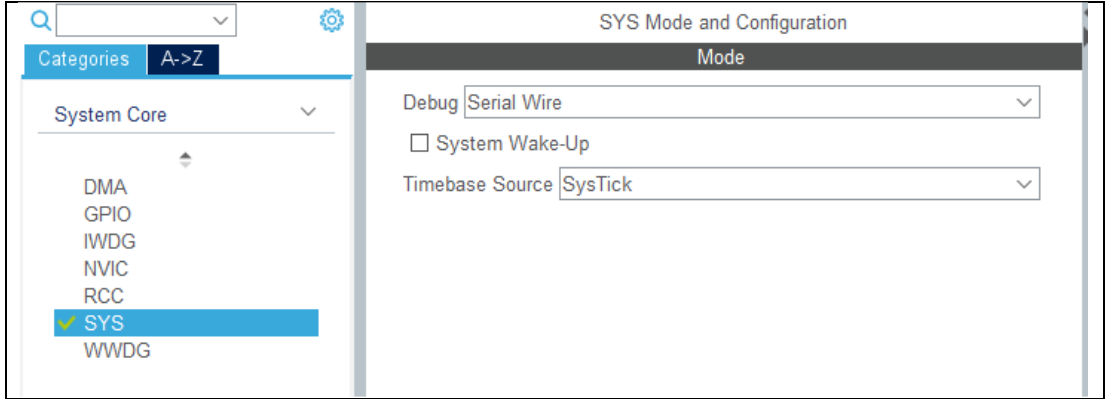
The screenshot shows the STM32CubeMX software interface. The top navigation bar includes 'MCU/MPU Selector', 'Board Selector', and 'Clock Selector'. The main area displays a banner for the 'New multicore STM32MP1 Series for Industrial and IoT applications' with an image of a microcontroller and the ST logo. Below the banner, a table lists MCU/MPUs. The selected item is STM32F103C8.

Part No.	Part Name	Part Description	Marketing Status	Unit Price for 1000 (USD)	Board	Package	Flash	RAM	I/O	Freq.	CPU Core
STM32F103C8	STM32F103C8Tx		Active	2,356		LQFP48	64 kBytes	20 kBytes	37	72 MHz	32

Şekil D.1. CubeMx programında mikrodnetleyici seçimi



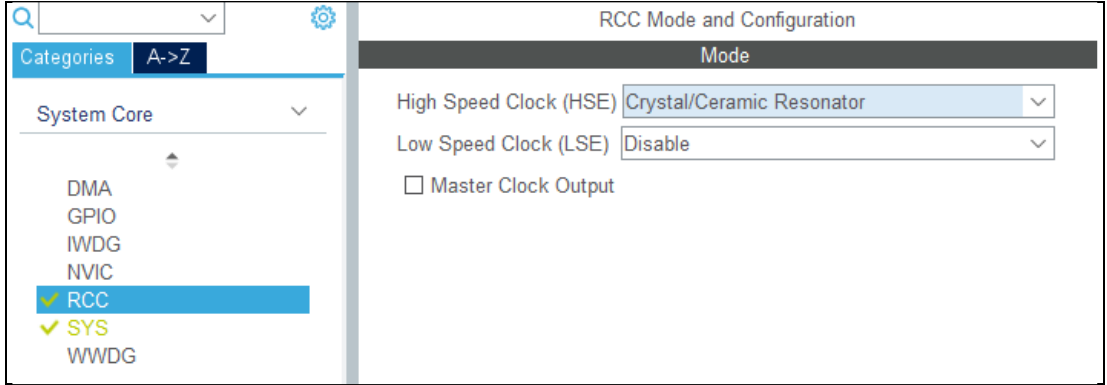
## Ek-E



Şekil E.1. CubeMx programında sistem konfigürasyonu

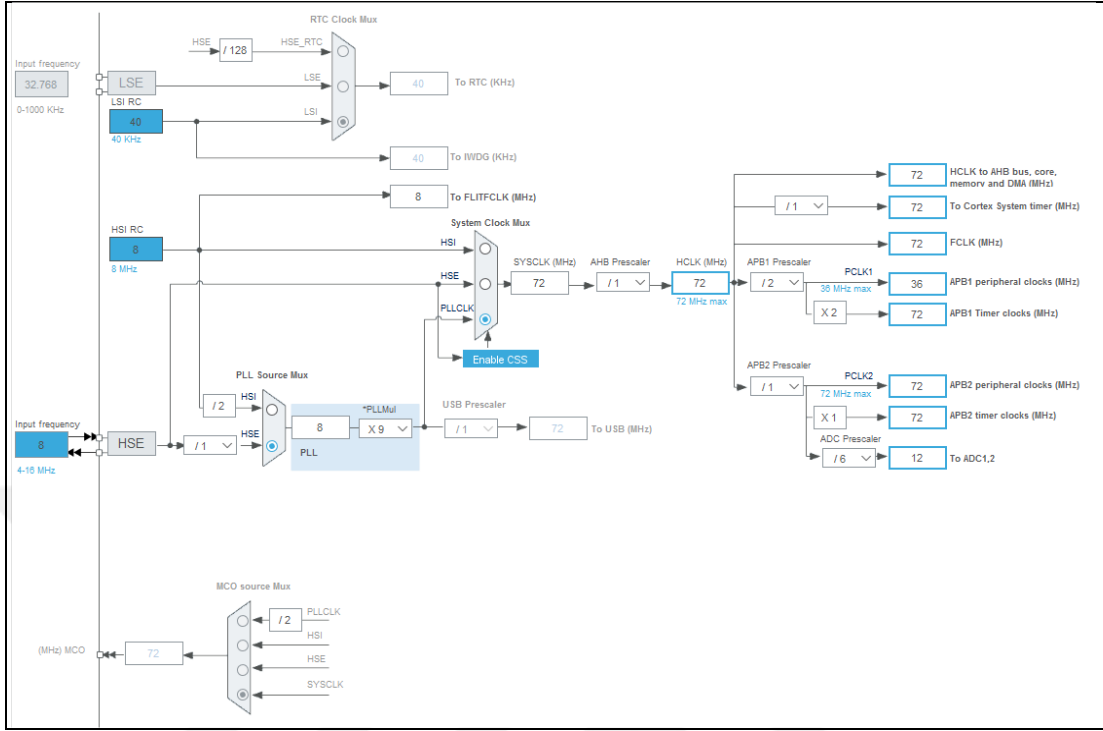


## Ek-F



Şekil F.1. CubeMx programında yüksek hızlı clock sinyali konfigürasyonu

## Ek-G



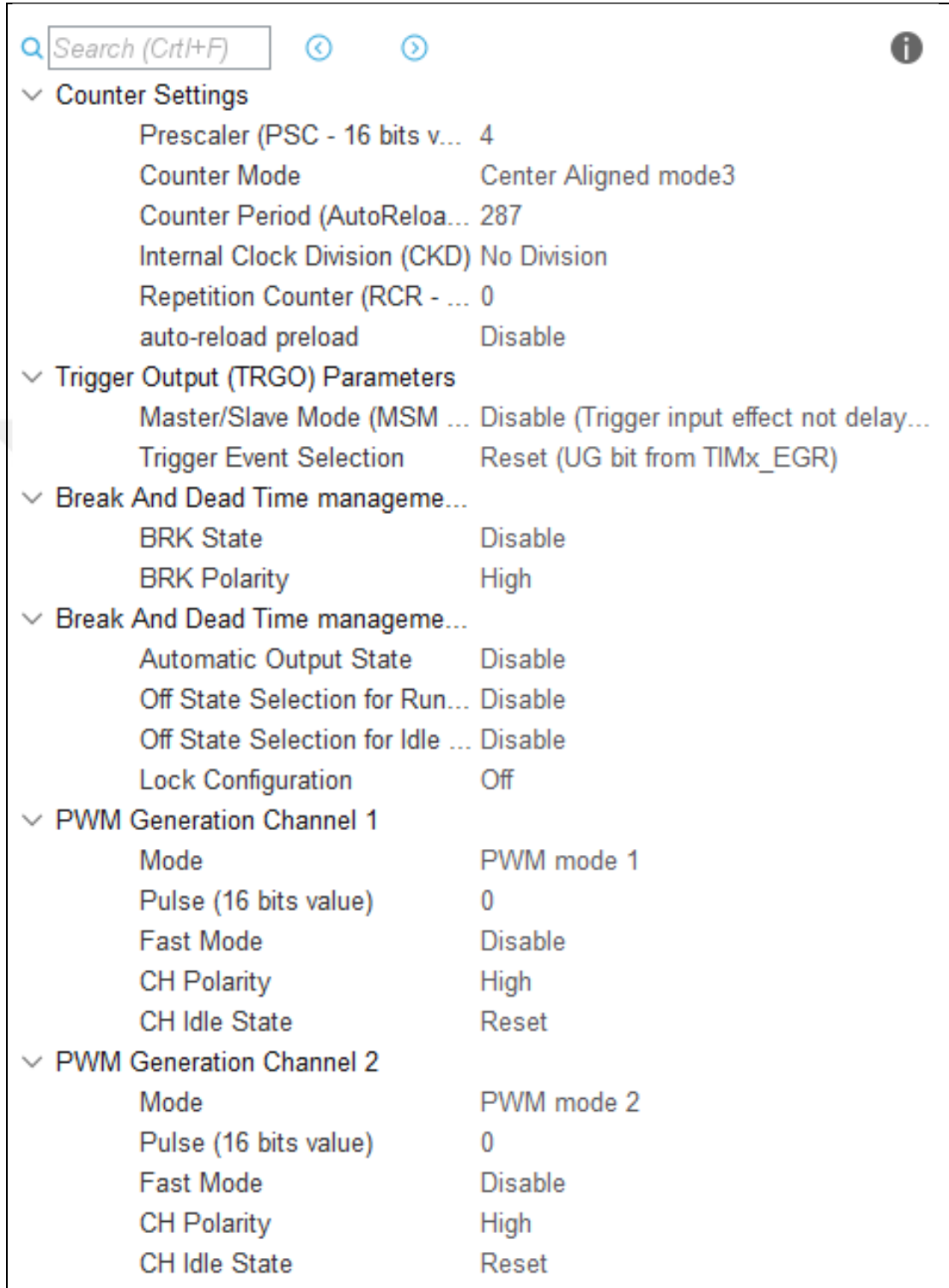
Şekil G.1. CubeMx programında üretilen 72MHz'lik clock sinyali konfigürasyonu

## Ek-H

TIM1 Mode and Configuration	
Mode	
Slave Mode	Disable
Trigger Source	Disable
Clock Source	Internal Clock
Channel1	PWM Generation CH1
Channel2	PWM Generation CH2
Channel3	Disable
Channel4	Disable
Combined Channels	Disable
<input type="checkbox"/>	Activate-Break-Input
<input type="checkbox"/>	Use ETR as Clearing Source
<input type="checkbox"/>	XOR activation
<input type="checkbox"/>	One Pulse Mode

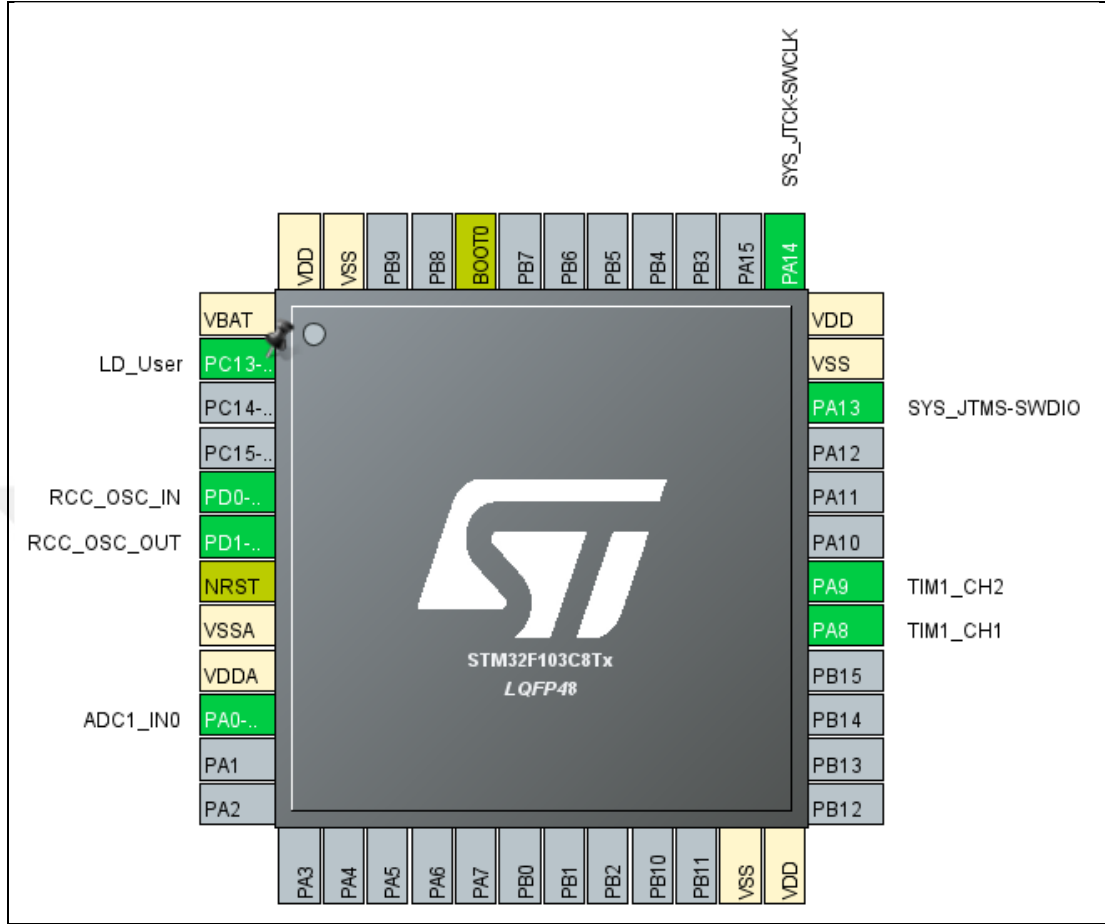
Şekil H.1. CubeMx programında timer-1 konfigürasyonu

## Ek-I



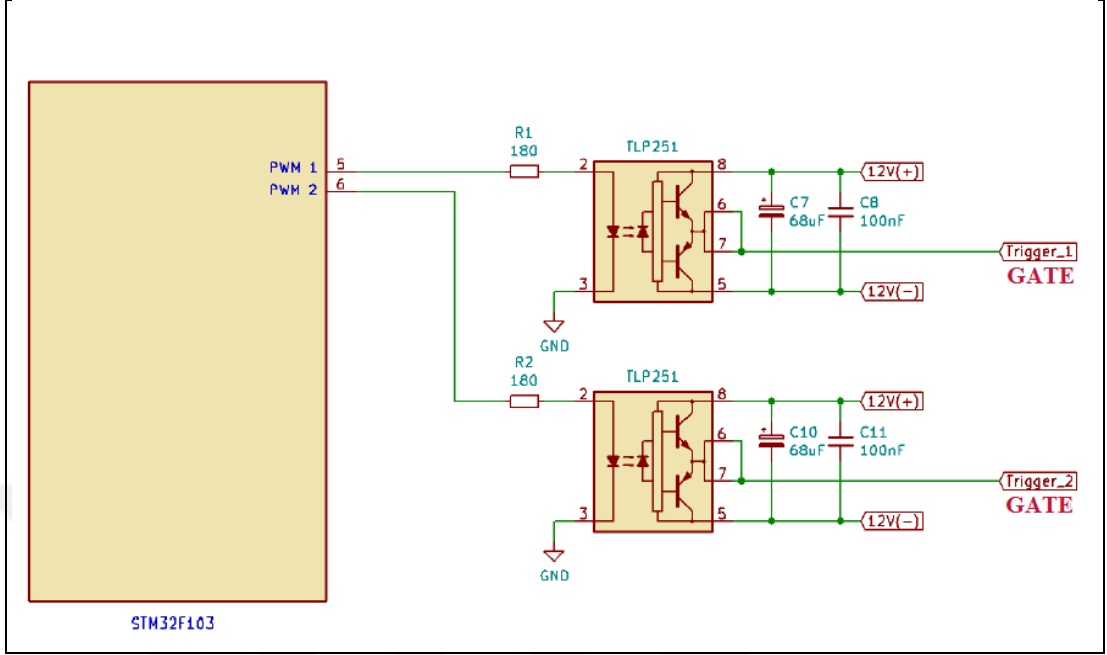
Şekil I.1. CubeMx programında PWM sinyallerinin oluşturulması

## Ek-J



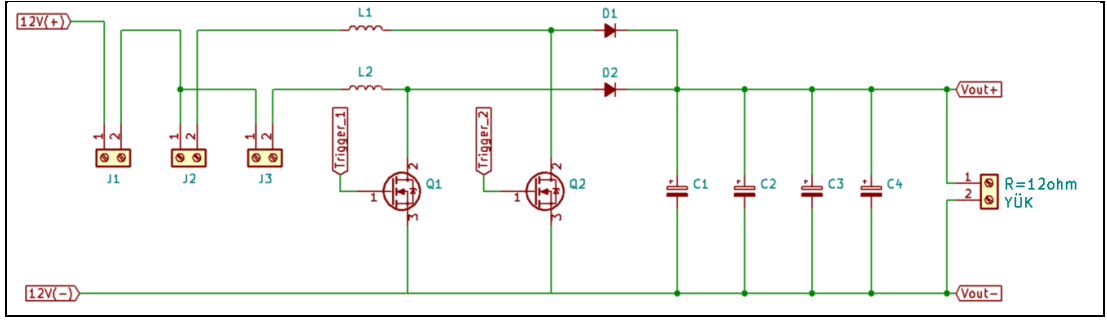
Şekil J.1. CubeMx programında pin konfigürasyonu

## Ek-K



Şekil K.1. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücü devresinde sürücü entegresi devre şeması

## Ek-L

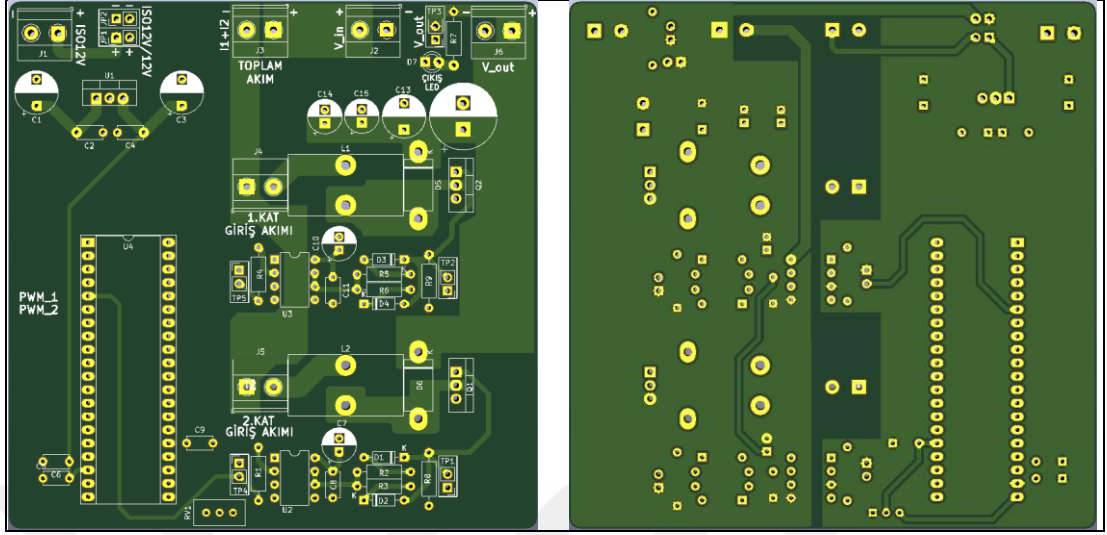


Şekil L.1. Çok katlı yükseltici tip doğru akım dönüştürücüsü güç devresi şeması



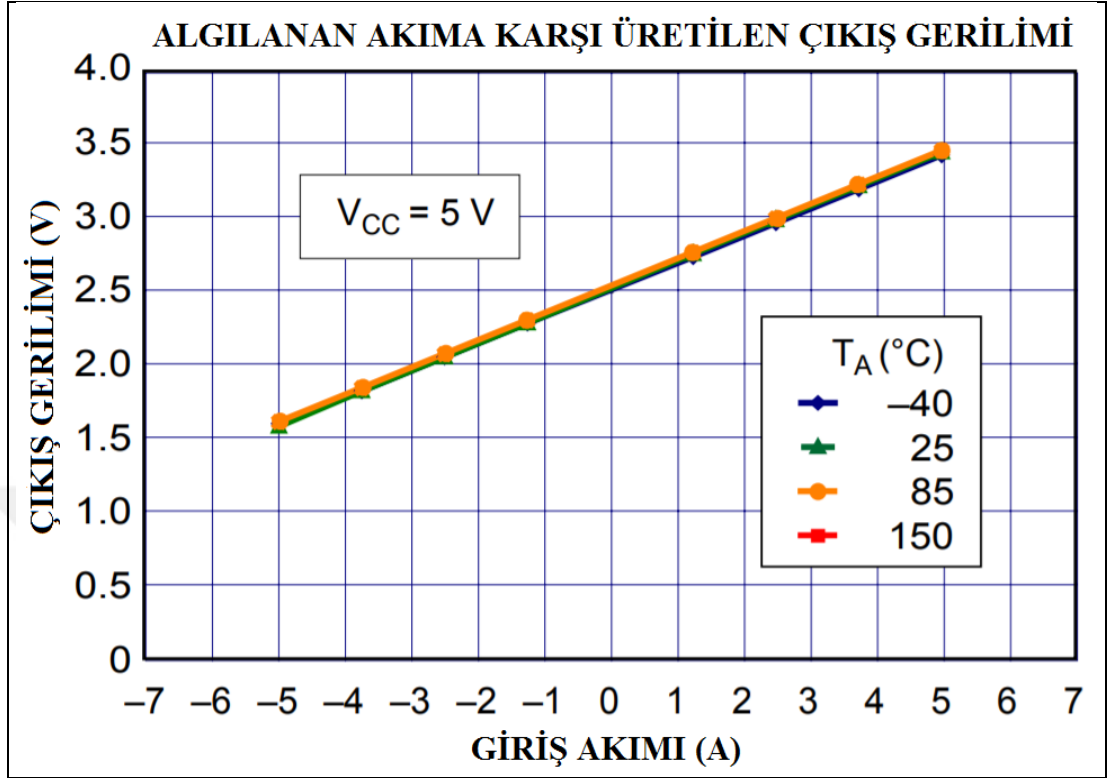


## Ek-N



Şekil N.1. Çok katlı yükseltici tip baskı devre PCB ön ve arka yüz

Ek-O



Şekil O.1.ACS 712 akım sensörünün giriş akımına karşı ürettiği çıkış gerilimi değerleri

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Söylemez İ.**, Erfidan T., Design and Application of Interleaved Boost Converter İki Katlı Yükseltici Tip DA-DA Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması, *ISENSA-Uluslararası Mühendislik Doğal Bilimler Ve Mimarlık Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 2019.



## ÖZGEÇMİŞ

İsmail Söylemez 1992 yılında Amasya’da doğdu. Lise öğrenimini İstanbul Ataköy Cumhuriyet Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2015 yılında mezun oldu. Sonraki sene Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında başlayan askerlik hizmetini 2018 yılında bitirip Yılmaz Redüktör Sanayi ve Ticaret A.Ş.’de çalışmaya başladı.

