



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÜÇ SEVİYELİ ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLERDE ANAHTARLAMA
FREKANSINA BAĞLI OLARAK VERİM KARŞILAŞTIRMASI**

Ömer Faruk KOZARVA

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Mayıs, 2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Ömer Faruk KOZARVA tarafından, **Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU** danışmanlığında hazırlanan "**ÜÇ SEVİYELİ ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLERDE ANAHTARLAMA FREKANSINA BAĞLI OLARAK VERİM KARŞILAŞTIRMASI**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **08/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi		İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Doç. Dr. Cengiz Polat		
	UZUNOĞLU		
	İstanbul Üniversitesi-		☒
	Cerrahpaşa		Kabul
	Elektrik-Elektronik		☐
	Mühendisliği Anabilim Dalı		Ret
ÜYE	Doç. Dr. Yasin ÖZÇELEP		
	İstanbul Üniversitesi-		☒
	Cerrahpaşa		Kabul
	Elektrik Elektronik		☐
	Mühendisliği Anabilim Dalı		Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur		
	GÜLBAHÇE		☒
	İstanbul Teknik Üniversitesi		Kabul
	Elektrik Mühendisliği		☐
	Anabilim Dalı		Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Ömer Faruk KOZARVA

(İmza)

BÜTÇE DESTEKLERİ

ÜÇ SEVİYELİ ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLERDE ANAHTARLAMA FREKANSINA BAĞLI OLARAK VERİM KARŞILAŞTIRMASI

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tez çalışmam süresince bilgilerini ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU'na, Elektra Elektronik A.Ş. Elektronik AR-GE Müdürü Dr. Veysel Tutku BÜYÜKDEĞİRMENCİ'ye, çalışma arkadaşlarım İslam DELİBAŞ, Özgür Can MİLLETSEVER, Taha ÖZ ve Abdurrahman SÖZÜER'e teşekkür ederim.

Bu tez, Elektra Elektronik San. Ve Tic. A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilen TÜBİTAK TEYDEB projeleri kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu projelerde emeği geçen bütün şirket çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her döneminde bana destek olan, güvenlerini ve sevgilerini esirgemeyen başta sevgili eşim, annem, babam ve kardeşlerim olmak üzere bütün aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2022

Ömer Faruk KOZARVA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ.....	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	3
3. YÖNTEM.....	17
3.1. TASARIM	17
3.1.1. EVİRİCİ TASARIMI.....	17
3.1.2. FİLTRE TASARIMI.....	23
3.2. SİSTEM BENZETİMİ.....	26
3.2.1. EVİRİCİ KAYIPLARININ HESAPLANMASI.....	26
3.2.2. FİLTRE KAYIPLARININ HESAPLANMASI.....	33
3.3. TESTLER	35
4. BULGULAR	40
5. TARTIŞMA.....	53
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	55
7. KAYNAKLAR.....	57
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI	60
ETİK KURUL İZİN YAZISI	61
KURUM İZNİ YAZILARI.....	62
ÖZGEÇMİŞ	63

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Yarım köprü evirici devresi	4
Şekil 2.2: Tam köprü evirici devresi	5
Şekil 2.3: Nötr noktası kenetlemeli evirici devresi	6
Şekil 2.4: Nötr noktası kenetlemeli eviricinin komutasyon hatları a) Pozitif b) 0^+ c) 0^- d) Negatif	7
Şekil 2.5: Aktif nötr noktası kenetlemeli evirici devresi	8
Şekil 2.6: Aktif nötr noktası kenetlemeli eviricinin farklı anahtar yapıları a) Si-IGBT b) SiC MOSFET c) HF/LF SiC-MOSFET/Si-IGBT Hibrit d) LF/HF Si-IGBT/SiC-MOSFET Hibrit	10
Şekil 2.7: Aktif nötr noktası kenetlemeli eviricinin komutasyon hatları a) Pozitif b) 0^+ c) 0^- d) Negatif	11
Şekil 2.8: Evirici çıkışındaki SDGM dalga şekli.....	12
Şekil 2.9: L filtre.....	12
Şekil 2.10: LC filtre	13
Şekil 2.11: LCL filtre	13
Şekil 2.12: LCL-LC filtre	15
Şekil 3.1: Tasarlanan eviriciye ait devre şeması.....	17
Şekil 3.2: Si-NPC modüle ait şematik gösterim	19
Şekil 3.3: SiC-Hibrit-ANPC modüle ait şematik gösterim.....	19
Şekil 3.4: Si-NPC modüle ait footprint ve 3B ekran görüntüsü	20
Şekil 3.5: SiC-Hibrit-ANPC modüle ait footprint ve 3B ekran görüntüsü.....	20
Şekil 3.6: Paralel modüllere ait kapı sinyalleri.....	21
Şekil 3.7: Si-NPC modülün DA bara ve nötr noktalarına ait bağlantı noktaları arasındaki mesafeyi gösteren ekran görüntüsü	22

Şekil 3.8: 150A akım taşıyan bakır yola ait ekran görüntüsü.....	22
Şekil 3.9: Tasarlanan Si-NPC evirici yapısına ait BDK'nın 3B görüntüleri	23
Şekil 3.10: Tasarlanan SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısına ait BDK'nın 3B görüntüleri.....	23
Şekil 3.11: Tasarlanan LCL-LC filtre yapısına ait devre şeması	25
Şekil 3.12: LCL-LC kartına ait 3B ekran görüntüleri	26
Şekil 3.13: Si-NPC modüle ait benzetim sonuçları	31
Şekil 3.14: SiC-Hibrit-ANPC modüle ait benzetim sonuçları.....	32
Şekil 3.15: Si-NPC evirici kartı	35
Şekil 3.16: SiC-Hibrit-ANPC evirici kartı	36
Şekil 3.17: LCL-LC filtre kartı.....	36
Şekil 3.18: Evirici kayıplarını ölçmek için hazırlanan test düzeneğine ait şema	37
Şekil 3.19: Sistemin toplam kayıplarını ölçmek için hazırlanan test düzeneğine ait şema	37
Şekil 3.20: Test düzeneği	38
Şekil 3.21: Fluke marka Ti75+ termal kamera.....	39
Şekil 3.22: Hioki marka PW6001-04 güç analizörü.....	39
Şekil 3.23: Tektronix marka MSO2024B osiloskop	39
Şekil 4.1: Si-NPC evirici kayıplarına ait benzetim sonuçları	40
Şekil 4.2: SiC-Hibrit-ANPC evirici kayıplarına ait benzetim sonuçları	41
Şekil 4.3: L, LCL ve LCL-LC filtre yapılarının sönümlleme başarımlarına ait grafik	42
Şekil 4.4: Tuzak filtrenin LC oranına göre sönümlleme başarımlı grafiği.....	43
Şekil 4.5: LCL filtrenin evirici tarafı endüktansının kayıplarına ait benzetim sonuçları.....	44
Şekil 4.6: Anahtarlama frekansına ayarlanmış tuzak filtre endüktansına ait benzetim sonuçları	45
Şekil 4.7: Anahtarlama frekansının iki katına ayarlanmış tuzak filtre endüktansına ait benzetim sonuçları	46
Şekil 4.8: Sistem kayıplarına ait benzetim sonuçları.....	47
Şekil 4.9: Evirici çıkış ve şebeke gerilimlerine ait dalga şekilleri (Mavi: Evirici çıkış gerilimi, Sarı: Şebeke gerilimi, Mor: Evirici akımı)	48

Şekil 4.10: Si-NPC evirici yapısına ait çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri (Mavi: Evirici çıkış gerilimi, Sarı: Şebeke gerilimi, Mor: Evirici akımı).....	49
Şekil 4.11: Si-NPC evirici yapısına ait test sonuçları.....	49
Şekil 4.12: SiC-Hibrit ANPC evirici yapısına ait test sonuçları	50
Şekil 4.13: Evirici kayıplarına ait benzetim ve test sonuçları	51
Şekil 4.14: Sistem kayıplarına ait benzetim ve test sonuçları	51



TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1:Yarım köprü evirici anahtarlama durumu	4
Tablo 2.2: Tam köprü evirici anahtarlama durumu	5
Tablo 2.3: Nötr noktası kenetlemeli evirici anahtarlama durumu	6
Tablo 2.4: Aktif nötr noktası kenetlemeli evirici anahtarlama durumu	11
Tablo 3.1: DA bara kondansatörlerinin ömür hesabında kullanılan akım karakteristikleri	18
Tablo 3.2: Benzetim parametreleri	30

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
U	: Gerilim
I	: Akım
R	: Direnç
P	: Güç
L	: Endüktans
C	: Kondsansatör
$\cos\phi$	: Güç Faktörü
$^{\circ}\text{C}$	: Derece Selsiyus
V	: Volt
A	: Amper
Ω	: Ohm
W	: Watt
E_{sw}	: Açma ve kapama süresi boyunca anahtarlarda harcanan toplam enerji
f_{sw}	: Anahtarlama frekansı
G_1	: Doğrusal olmayan yarı iletken karakteristikleri için uyarlama faktörü (SEMIKRON modüllerinde IGBT için 1, Diyot için 1.15)
$\hat{I}$	: Tepe akımı
I_{ref}	: Anahtarlama kaybı ölçümünün referans akımı
K_1	: Akıma bağlı anahtarlama katsayısı (SEMIKRON modüllerinde IGBT için 1, Diyot için 0.6)
K_V	: Gerilime bağlı anahtarlama katsayısı (SEMIKRON modüllerinde IGBT için 1.4, Diyot için 0.6)
m	: Modülasyon indeksi
P_{cond}	: İletim kaybı
P_{sw}	: Anahtarlama kaybı
r_{CE}	: IGBT iletim direnci
r_f	: Diyot iletim direnci
V_{CC}	: Kolektör-emetör besleme gerilimi
V_{CE}	: Kolektör-emetör gerilimi

V_{ce0}	: IGBT eşik gerilimi
V_{f0}	: Kolektör-emetör eşik gerilimi (diyot)
V_{ref}	: Anahtarlama kaybı ölçümünün referans gerilimi
V_i	: Evirici çıkış gerilimi
V_g	: Şebeke gerilimi
L_i	: LCL filtrenin evirici tarafındaki endüktansı
L_g	: LCL filtrenin şebeke tarafındaki endüktansı
C_f	: LCL filtrenin filtre kondansatörü
C_t	: Tuzak filtre kondansatörü
L_t	: Tuzak filtre endüktansı
L_{t1}	: Anahtarlama frekansına ayarlanmış tuzak filtre endüktansı
L_{t2}	: Anahtarlama frekansının iki katına ayarlanmış tuzak filtre endüktansı
δ	: Deri etkisi
μ	: Manyetik geçirgenlik
ρ	: Özgül direnç
D	: İletken çapı
A_e	: Efektif kesit
R_{aa}	: AA direnç
P_{cu}	: Bakır kaybı
P_{core}	: Çekirdek kaybı
B	: Manyetik alan
H	: Manyetik alan şiddeti
$\% \mu_i$	: Manyetik geçirgenlik % değişimi
V_e	: Toroid hacmi

Kısaltmalar	Açıklama
AA	: Alternatif Akım (Alternative Current)
DA	: Doğru Akım (Direct Current)
Hz	: Hertz
MOSFET	: Metal Oksit Yarı İletkenli Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
IGBT	: İzole Kapılı İki Kutuplu Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
BJT	: İki Kutuplu Jonksiyon Transistör (Bipolar Junction Transistor)
SMPS	: Anahtarlamalı Güç Kaynağı (Switch Mode Power Supply)
SDGM	: Sinüzoidal Darbe Genişliği Modülasyonu (Sinusoidal Pulse Width Modulation)
EMI	: Elektro Manyetik Girişim (Electromagnetic Interference)
THB	: Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonic Distortion)
NPC	: Nötr Noktası Kenetlemeli (Neutral Point Clamped)
ANPC	: Aktif Nötr Noktası Kenetlemeli (Active-Neutral Point Clamped)
NPC	: Nötr Noktası Kenetlemeli (Neutral Point Clamped)
T-NPC	: T Tipi Nötr Noktası Kenetlemeli (T Type Neutral Point Clamped)
3L	: Üç Seviyeli
2L	: İki Seviyeli
HF	: Yüksek frekans (High frequency)
LF	: Düşük frekans (Low frequency)
3B	: Üç boyutlu
BDK	: Baskılı Devre Kartı (Printed Circuit Board)
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
TEYDEB	: Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı
AHF	: Aktif Harmonik Filtre
STATKOM	: Statik Kompanzatör
FR4	: Flame Retardant

ÖZET

[YÜKSEK LİSANS TEZİ]

[ÜÇ SEVİYELİ ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLERDE ANAHTARLAMA FREKANSINA BAĞLI OLARAK VERİM KARŞILAŞTIRMASI]

[Ömer Faruk KOZARVA]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

[Danışman : Doç. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU]

Endüstriyel ve ticari tesislerin tamamında doğrusal olmayan yükler bulunmaktadır. Doğrusal olmayan yükler yüksek oranda harmonik akım üreterek elektrik şebekesini kirletir, çevrede bulunan diğer cihazların olumsuz etkilenmesine, dağıtım trafosunun ve iletkenlerin aşırı ısınmasına ve yangın riskine sebep olabilir. Ayrıca otomasyon ve robotik sistemlerin artmasıyla dinamikleşen sanayi tesislerinin yükleri düzensiz, darbeli ve hızlı değişen reaktif güç çekmektedir. Bu tesislerde klasik yöntemlerle reaktif güç kompanzasyonu yapılamamaktadır ve tesisler ceza ödemektedir. Bunun önlenmesi için gerilimin seviyesine göre şebekeye dinamik reaktif güç desteği sağlanması gerekmektedir. Gerilim kontrollü reaktif güç sağlayan ve yüksek dinamik hızlı yeni nesil statik kompanzatör sistemleri (SVG) kullanılması gerekmektedir. Yukarıda bahsedilen sorunların çözümünde kullanılan güç kalitesi ürünleri şebeke bağlantılı evirici yapılarıdır. Bu ürünler tesislerde sürekli çalışmaktadırlar. Bu sebeple ilk kurulum maliyetlerinin yanı sıra işletme maliyetleri de önem kazanmaktadır. Ürünün yüksek verimle çalışması tercih sebebi oluşturmaktadır. Bu çalışmada şebeke bağlantılı üç seviyeli evirici yapılarından Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC

evirici yapılarının 100kVA'lık bir sistem için farklı anahtarlama frekanslarındaki kayıpları incelenmiştir. Anahtarlama frekansındaki artış evirici kayıplarının arttırmaktadır. Ancak anahtarlama frekansının arttırılması şebeke bağlantı filtresinde boyut ve kayıpların azalmasını sağlamaktadır. Şebeke bağlantı filtresi için farklı yapılar incelenmiş ve bu yapıların sönümleme performansları karşılaştırılmıştır. Evirici ve filtre kayıplarının bir arada değerlendirilmesi sonucu iki evirici yapısı için de en iyi anahtarlama frekansı hem benzetim hem de test sonuçları ile belirlenmiştir. Evirici kayıpları, kullanılan güç modüllerinin üretici firmaları tarafından geliştirilen benzetim araçları ile hesaplanmıştır. Şebeke bağlantı filtresinin kayıplarını hesaplamak için ise Excel tabanlı bir araç geliştirilmiştir. Yapılan hesaplar, iki evirici yapısı için de 10-30kHz anahtarlama frekansları için gerçekleştirilmiştir. İki evirici yapısı için de baskılı devre kartı tasarımları yapılmış ve 15-20kHz anahtarlama frekansı için hesaplanan değerlere uygun eviriciler üretilmiştir. Üretilen bu eviricilerin kayıpları güç analizörü ile ölçülerek benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan ölçümler ve benzetimler arasında yaklaşık %6'lık bir sapma olduğu görülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda Si-NPC evirici yapısı için en verimli anahtarlama frekansının 15kHz, SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısı için ise 20kHz olduğu görülmüştür. |

Mayıs 2022 , [.....] sayfa.

Anahtar kelimeler: | Evirici, Anahtarlama Frekansı, Verim, Aktif Harmonik Filtre, SVG,LCL filtre |

ABSTRACT

[M.Sc. THESIS]

**[EFFICIENCY COMPARISON by SWITCHING FREQUENCY in THREE-LEVEL
GRID-TIED INVERTERS]**

[Ömer Faruk KOZARVA]

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronics Engineering

Electrical and Electronics Engineering Programme

[Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Cengiz Polat UZUNOĞLU]

[There are too many non-linear loads in industrial facilities. Non-linear loads produce harmonic current which disturbs the grid. Harmonic current also cause adverse effects other devices in the environment, overheat the distribution transformer and conductors and fire risk. In addition, the loads of industrial facilities, which become dynamic with the increase of automation and robotic systems, draw irregular, pulsed and rapidly changing reactive power. In these facilities, reactive power compensation cannot be made with conventional methods and the facilities pay fines. In order to prevent this drawback, dynamic reactive power support should be provided to the grid according to the voltage level. A new generation static compensator systems (SVG) providing voltage-controlled reactive power and high dynamic speed should be used. The power quality devices used to solve the problems mentioned above are grid-connected inverters. These devices work continuously in the facilities. For this reason, in addition to the initial setup costs, operating costs are also gaining importance. The main preference criteria is the efficiency of the proposed product. In this study, 100kVA grid-connected three-level Si-NPC and SiC-Hybrid-ANPC inverters losses were analyzed for

different switching frequencies. The increase in the switching frequency increases the inverter losses. However, increasing the switching frequency reduces the size and losses in the grid connection filter. Different structures have been examined for the grid connection filter and the damping performances of these structures have been compared. As a result of evaluating the inverter and filter losses together, the best switching frequency for both inverter structures was determined by both simulation and test results. Inverter losses were calculated with simulation tools developed by the manufacturers of the used power modules. An Excel-based tool has been developed to calculate the losses of the grid connection filter. The calculations were made for 10-30kHz switching frequencies for both inverters. Printed circuit board designs were made for both inverter structures and inverters were produced according to the values calculated for 15-20kHz switching frequency. The losses of these produced inverters were measured with a power analyzer and compared with the simulation results. It has been observed that there is a deviation of about 6% between the measurements and simulations. As a result of the measurements, it has been seen that the most efficient switching frequency for Si-NPC inverter is 15kHz, and 20kHz for SiC-Hybrid-ANPC inverter. |

June 2022, |.....| pages.

Keywords: |Inverter, Switching Frequency, Efficiency, Active Harmonic Filter, SVG, LCL filter|

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile son yıllarda şebeke bağlantılı DA (Doğru Akım) gerilim ile çalışan elektronik birimlerin sayısı giderek artmaktadır. Bu ürünlerin sorunsuz bir şekilde entegrasyonu için, üç seviyeli eviriciler, kontrol sistemlerinin daha düzgün çalışması ve verimli güç dönüşümü sağlama yeteneklerinden dolayı tercih edilmeye başlanmıştır. Artan bu eğilim, güç elektroniği dönüştürücüleri çerçevesinde yoğunlaşmıştır.

Güç dağıtım şebekelerinde enerji kalitesi problemi güç elektroniği tabanlı doğrusal olmayan devre elemanlarının endüstride kullanımıyla artmaya başlamıştır. Yüksek reaktif güç tüketimi, harmonik emisyonları ve akım dengesizliklerinin oluşumunun artışı bu problemlerin ortaya çıkmasındaki göstergelerdir. Şebekede var olan harmonikli akım şebeke geriliminin bozulmasına veya dalgalanmasına neden olabilir. Şebekede var olan harmonikli akımlar, kontrol sistemleri, güç sistemleri ve harmonik yaratan diğer yükler ile etkileşimde bulunabilirler. Bu olumsuzluklar zamanla tüketicileri ve enerji dağıtıcılarını olumsuz etkilemiştir.

Birçok endüstriyel tesiste çift yönlü güç akışı gerektiren sistemler kullanılmaktadır. Çift yönlü güç akışı gerektiren sistemler daha çok elektrikli sürücüler ve otomasyon sistemleridir. Örneğin frekans dönüştürücüleri tesislerde kullanılan sürücü parametrelerinin ve bu tarz güç sistemlerinin çalışmasını verimli hale getirmek için tasarlanmıştır.

Üç seviyeli evirici yapısının şebeke bağlantılı endüstriyel sistemlerde yaygın olarak tercih edilmesinin sebepleri: güç akışını çift yönlü sağlayabilmeleri, elektromanyetik uyumluluk (EMC) seviyesinin kabul edilebilir düzeyde olması ve yüksek dinamik temiz akım ve DA gerilim sağlamalarıdır.

Şebeke bağlantılı evirici sistemleri bir LCL filtre yapısıyla şebeke bağlantısı sağlanan genellikle üç fazlı güç elektroniği yapılarıdır. Şebekeye bağlı güç dönüştürücülerinin sayısı, güç elektroniği yapılarında yüksek güçlü sistemler için kullanılan yarı iletken komponentlerin, gelişmiş kontrol yöntemlerinin ve gelişen teknoloji ile artmaktadır.

Geliştirilen üç seviyeli eviriciler ile şebekede var olan harmonik bozulma seviyesi düşürülmektedir. Üç seviyeli eviriciler yapıları gereği şebekeden sinüzoidal formda akım çektiğinden, şebeke akımındaki ve gerilimindeki bozulma seviyesi, diğer güç elektroniği yapıları(diyot,tristör) ile kurulan dönüştürücülerden daha düşük kalmaktadır.

Üç fazlı şebeke bağlantılı eviriciler, DA'dan, AA'ya dönüşüm gereken uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu evirici sistemlerinin kullanılmasıyla, güç akışının çift yönlü yapılması, harmonik bozulmanın minimum seviyeye indirilmesiyle birim güç faktöründe sinüzoidal akım formunu elde etmek mümkün olmaktadır. Bu tarz evirici sistemlerinde DA bara gerilimi genellikle giriş gerilimi veya giriş gücüne bağlı olarak kontrol edilmektedir, bu sayede kapasitör boyutu azaltılmış olur. Bu dönüştürücülerin aktif filtre olarak kullanılması doğrusal olmayan bir yüke paralel bağlandıklarında mümkün olmaktadır. Şebeke bağlantılı bu eviriciler, yüksek verimli batarya şarj sistemleri, çok seviyeli aktif doğrultucu sistemleri, aktif filtreler, doğrultucu sistemleri, kesintisiz güç kaynakları (UPS) ve güç çeviricileri gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu tarz uygulamalarda, yüksek anahtarlama frekansının şebeke tarafında neden olduğu EMC etkisi, anahtarlama frekansı etrafında oluşabilecek harmoniklere neden olur. Harmonik bozulma sorunu, oluşturulan evirici yapısının şebeke tarafına, tasarımı doğru yapılmış ve optimize edilmiş bir LCL filtre yapısı konularak çözülmektedir.

Şebeke bağlantılı üç seviyeli evirici sistemleri için son yıllarda birçok evirici topolojileri ve LCL filtre yapıları önerilmiştir. Tez çalışmasında şebeke bağlantılı üç seviyeli evirici sistemleri için en iyi düzeyde tasarımı gerçekleştirilen evirici donanımı ve LCL filtre tasarımının farklı anahtarlama frekansları altında verim karşılaştırması yapılmıştır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. EVİRİCİ YAPILARI

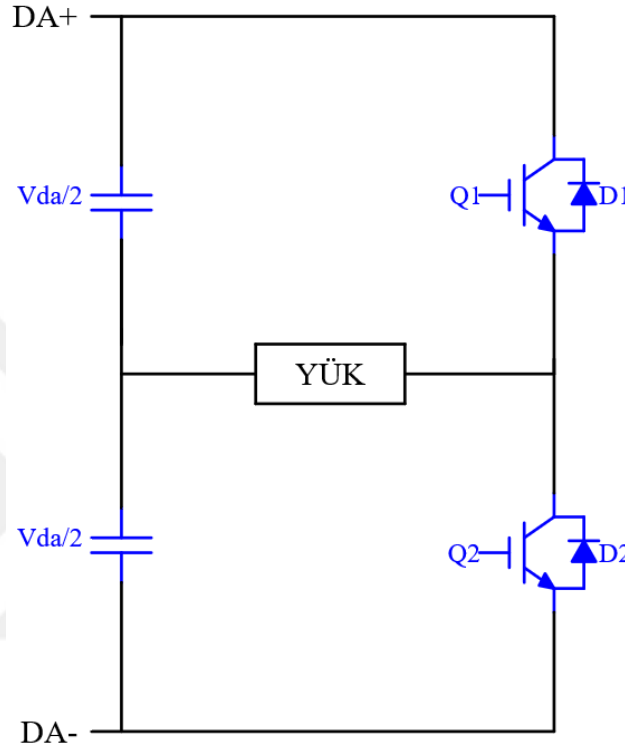
Gerilim kaynaklı eviriciler, girişindeki DA gerilim kaynağını kullanarak çıkışında genlik ve frekansı ayarlanabilen bir AA gerilim üretirler. Evirici yapıları yenilenebilir enerji sistemlerinde, motor sürücülerinde ve sanayi uygulamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca En çok bilinen evirici yapıları yarım köprü ve tam köprü eviricilerdir. Bu yapılar zamanla geliştirilerek farklı evirici yapıları oluşturulmuştur. Bu yapılar iki seviyeli, üç seviyeli ve çok seviyeli olarak sıralanabilir. İki seviyeli eviricilere yarım köprü ve tam köprü eviriciler örnek gösterilebilirken, üç seviyeli evirici yapılarına nötr noktası kenetlemeli (NPC) ve aktif nötr noktası kenetlemeli (ANPC) evirici yapıları örnek olarak gösterilebilir. İki seviyeli, üç seviyeli ve çok seviyeli evirici yapılarındaki evirici seviyesi, evirici çıkış gerilim seviyesinin sayısını ifade etmektedir. İki seviyeli eviricilerde çıkış gerilimi olarak DA+ ve DA- gerilimleri bulunurken; üç seviyeli eviricilerde ise DA+, DA- ve 0 olmak üzere üç farklı gerilim seviyesi bulunmaktadır. Üç seviyeli şebeke bağlantılı evirici sistemlerinde birçok farklı evirici topolojisi farklı uygulamalarda kullanılmıştır. Literatür taraması sonucu, piyasada üretilen ürünlerde, evirici topolojileri, maliyetleri, başarımları ve güvenilirlik gibi parametreler göz önüne alınarak tasarımlar yapıldığı gözlemlenmiştir. Günümüzde piyasaya sürülen birçok güç elektroniği tabanlı ürün halen eski teknoloji olan iki seviyeli yarım-köprü evirici topolojisini kullanmaktadır. Gelişen teknoloji ile yüksek verimli ve yüksek başarımlı ürünler piyasaya çıkmıştır ve eski teknoloji ürünlerin pazar payı azalmıştır. Bu gelişmeler göstermektedir ki önümüzdeki yıllarda evirici topolojilerinde kullanılan yarı iletken teknolojisinin SiC yapılara geçeceği ve eski teknoloji ürün kalmayacağıdır. Şebeke bağlantılı evirici uygulamalarında düşük anahtarlama kayıplarına sahip, daha az filtreleme gereksinimi ve daha düşük maliyet sunduğu için üç seviyeli eviriciler tercih edilmektedir.

2.1.1. İKİ SEVİYELİ EVİRİCİLER

2.1.1.1. Yarım Köprü Evirici

Yarım köprü evirici, iki seviyeli bir evirici yapısıdır. Bu yapıda 2 adet transistör ve 2 adet diyot bulunmaktadır. Bu yapıda $V_{da}/2$ gerilimine sahip 2 kondansatör eviricinin nötr çıkışını oluşturmaktadır. Q1 ve Q2 anahtarlarının ayrı ayrı zamanlarda iletimde olduğu ve ikisinin de

kesimde olduğu toplamda 3 farklı anahtarlama durumu bulunmaktadır. Q1 anahtarı iletimdeyken $+V_{da}/2$ gerilimi çıkışa aktarılırken, Q2 anahtarı iletimdeyken $-V_{da}/2$ gerilimi çıkışa aktarılır. Yarım köprü evirici yapısına ait devre şeması Şekil 2.1’de verilmiştir. Yarım köprü evirici yapısına ait anahtarlama durumu Tablo 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Yarım köprü evirici devresi

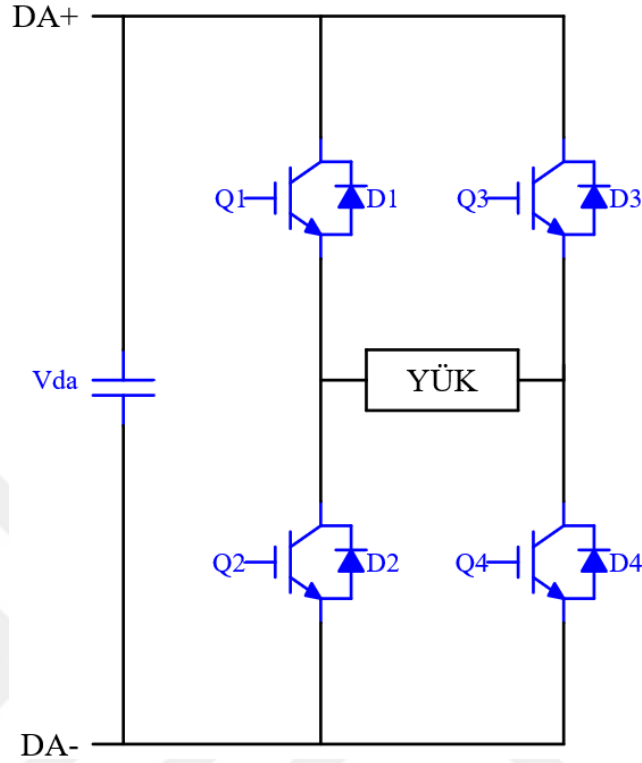
Tablo 2.1: Yarım köprü evirici anahtarlama durumu

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumu	Anahtarlar	
		Q1	Q2
$V_{da}/2$	P	1	0
$-V_{da}/2$	N	0	1

2.1.1.2. Tam Köprü Evirici

Tam köprü evirici yapısında 4 adet transistör ve 4 adet diyot bulunmaktadır. İki adet yarım köprü eviricinin paralel bağlanmasıyla da oluşturulabilir. Q1 ve Q4 anahtarları iletimdeyken,

yük üzerinde V_{da} , Q2 ve Q3 anahtarları iletimdeyken yük üzerinde $-V_{da}$ gerilimi oluşmaktadır. Tam köprü evirici yapısına ait devre şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Tam köprü evirici devresi

Tablo 2.2: Tam köprü evirici anahtarlama durumu

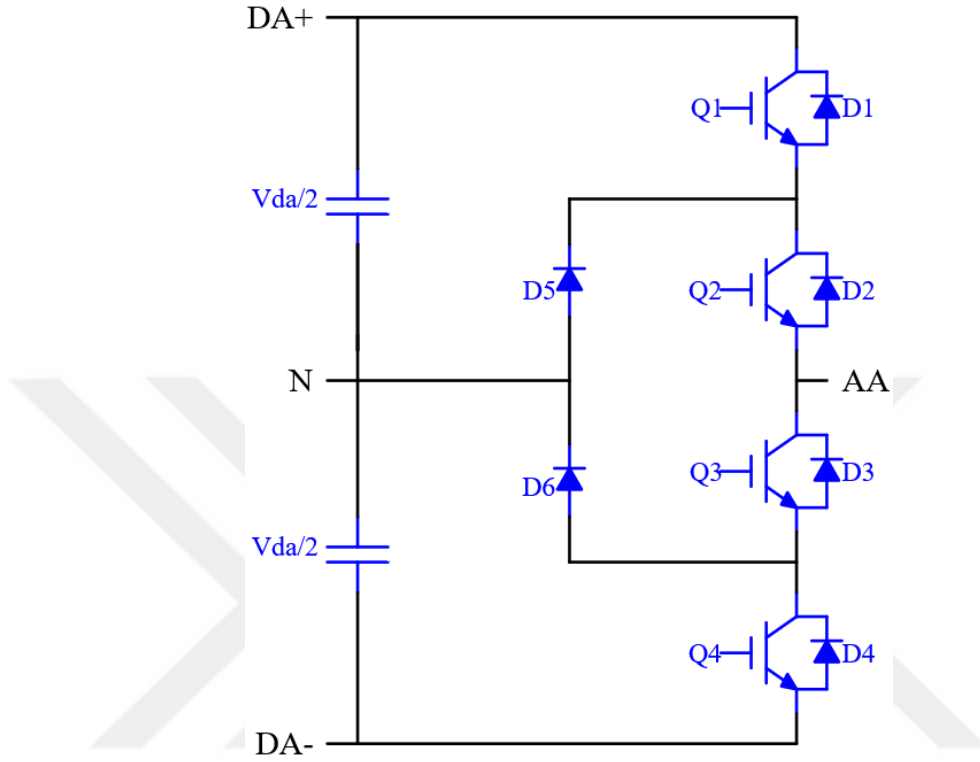
Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumu	Anahtarlar			
		Q1	Q2	Q3	Q4
V_{da}	P	1	0	0	1
$-V_{da}$	N	0	1	1	0

2.1.2. ÜÇ SEVİYELİ EVİRİCİLER

2.1.2.1. Nötr Noktası Kenetlemeli Evirici (NPC)

Üç seviyeli eviriciler arasında en çok kullanılan yapılardan biridir. Üç seviyeli eviricilerin akım THB’leri daha düşüktür bu sebeple pasif filtre boyutlarını küçültmeye imkân sağlarlar. İki seviyeli evirici uygulamalarında kullanılan yarı iletkenler ile DA bara gerilimi daha yüksek üç seviyeli bir evirici tasarımı yapılabilir. NPC yapısının en büyük avantajlarından birisi de yapı içerisindeki yarı iletkenlerin dayanım gerilimlerinin DA bara gerilimlerinden daha düşük olabilmesidir. Gerilim stresi daha az olan yarı iletkenlerin kayıpları daha düşük

olduğundan daha yüksek verimlere çıkılabilir [1]. Üç seviyeli NPC evirici yapısına ait devre şeması Şekil 2.3'te verilmiştir. NPC evirici yapısına ait anahtarlama durumu Tablo 2.3'de verilmiştir.

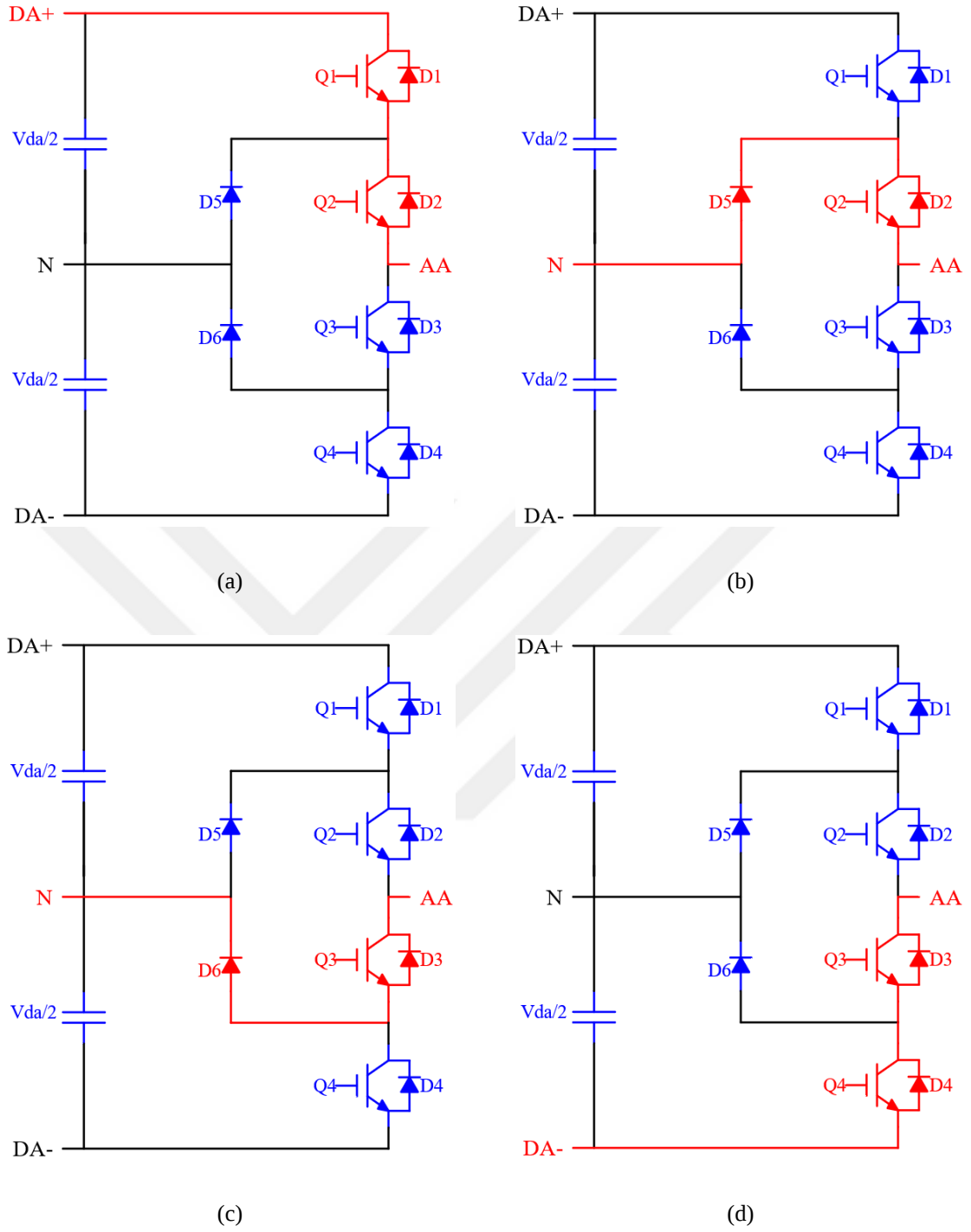


Şekil 2.3: Nötr noktası kenetlemeli evirici devresi

Tablo 2.3: Nötr noktası kenetlemeli evirici anahtarlama durumu

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumu	Anahtarlar			
		Q1	Q2	Q3	Q4
$V_{da}/2$	P	1	1	0	0
0	0^+	0	1	0	0
0	0^-	0	0	1	0
$-V_{da}/2$	N	0	0	1	1

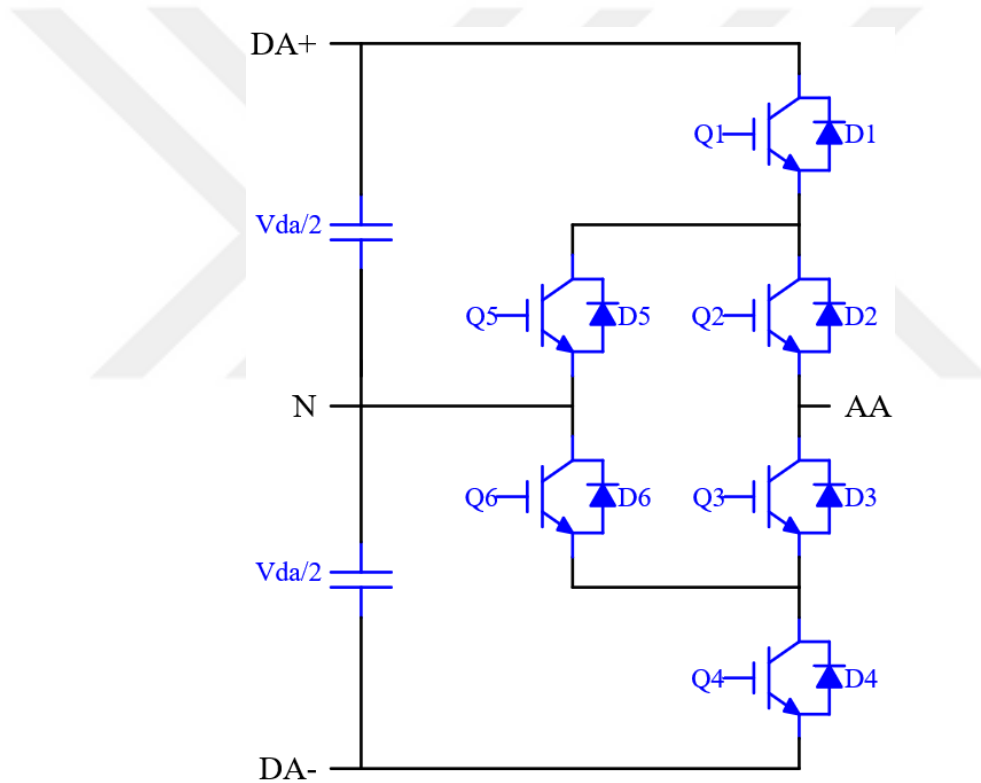
NPC eviricinin Tablo 2.3'de verilen anahtarlama durumuna göre akımın izlediği yollar Şekil 2.4'de verilmiştir.



Şekil 2.4: Nötr noktası kenetlemeli eviricinin komutasyon hatları
a) Pozitif b) 0^+ c) 0^- d) Negatif

2.1.2.2. Aktif Nötr Noktası Kenetlemeli Evirici (ANPC)

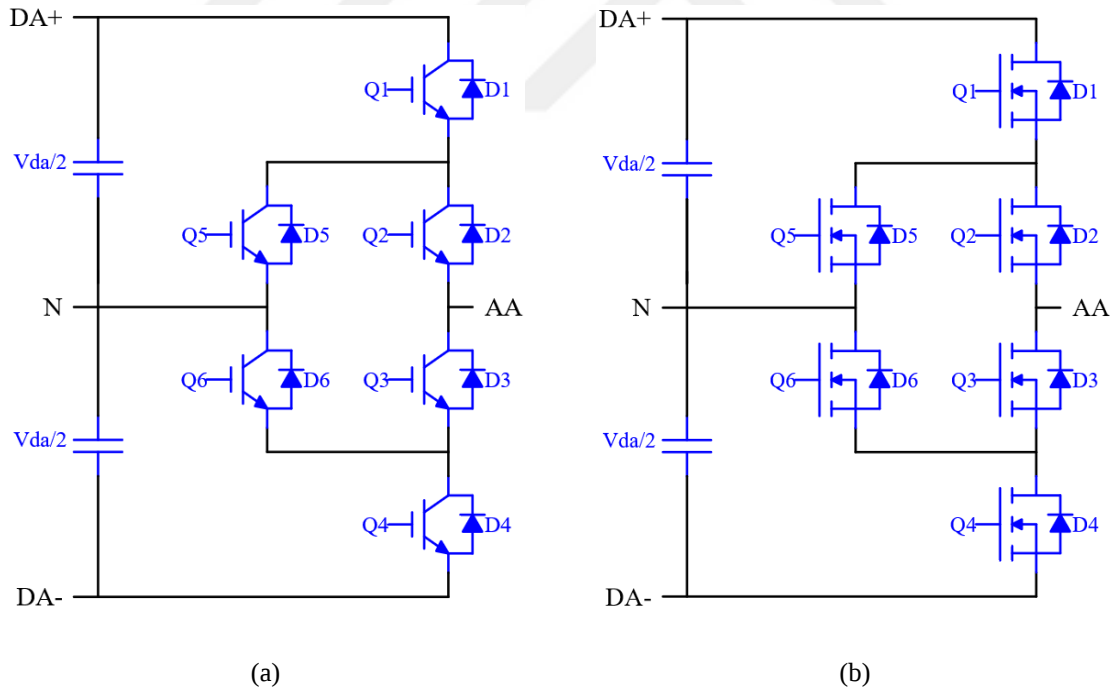
1980'lerin başlarında Akira Nabae tarafından ortaya atılan NPC evirici yapısı gerilim ve güç seviyesini yükseltmek için basit bir çözüm olmuştur. Ancak NPC evirici yapısının çözölemeyen önemli dezavantajlarından birisi yarı iletkenler üzerindeki eşit olmayan ve yüksek sıcaklıklardır. [2] Bu soruna çözüm olarak Thomas Bruckner tarafından ANPC evirici yapısı ortaya konmuştur [3]. Yapısında 6 adet transistör ve 6 adet diyot bulunmaktadır. NPC evirici yapısında nötr hattında bulunan diyotlara paralel transistör eklenmesiyle oluşturulmuştur. ANPC evirici yapısına ait devre şeması Şekil 2.5'de verilmiştir.

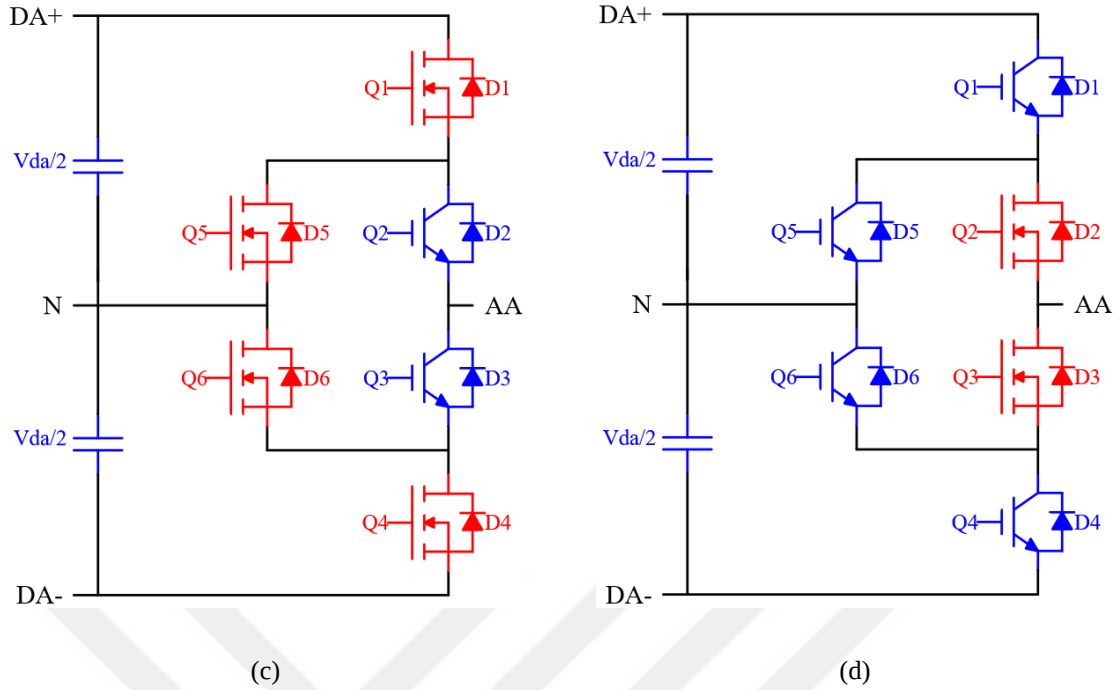


Şekil 2.5: Aktif nötr noktası kenetlemeli evirici devresi

Evirici tabanlı ticari ürünler için farklı devre yapıları önerilmiştir. Bu yapı farklılıkları maliyet, bulunabilirlik, başarımlık, güvenilirlik ve ömür bakımından bir optimizasyon süreci sonucunda ortaya çıkmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan evirici yapılarında yarı iletken olarak Si-IGBT kullanılmaktadır. Verim, her ne kadar bu yapıların tercih edilmesinde ana unsur olmamasına rağmen endüstriyel ürünler için düşünüldüğünde uzun vadede fark yaratacak bir başarımlık kriteridir. Aynı zamanda şebeke bağlantılı PV sistemleri, elektrikli araçlar için motor sürücüler ve veri merkezleri için güç kaynakları uygulamalarında verim

kadar güç yoğunluğunun da olabildiğince yüksek olması beklenmektedir. Ancak klasik Si-IGBT tabanlı evirici yapılarında anahtarlama frekansı artırımı ile bu gelişme sağlanamamaktadır [4]. Çünkü anahtarlama kayıpları çok yükselmektedir. Klasik Si tabanlı evirici yapıları, silisyum karbür (SiC) gibi geniş bant aralıklı yarı iletkenlerin kullanımının artmasıyla önemli değişikliklere uğramaktadırlar[5-8]. Şebeke bağlantılı PV sistemlerinde çok yüksek verim elde etmek için SiC MOSFET’li beş seviyeli T-tipi eviriciler önerilmiştir[9-11]. Uzun ve elektrikli hava araçları uygulamalarında, yüksek verim ve güç yoğunluğu elde etmek için LCL filtreli iki seviyeli SiC MOSFET yapıları önerilmiştir[12-13]. Ancak yüksek fiyat ticarileşmekte olan SiC ürünlerinin önündeki en büyük engellerden birisidir [5]. SiC tabanlı ürünlerin ticari olarak daha uygulanabilir olmasını sağlamak için yapı içerisindeki kaybı yüksek olan yarı iletkenlerin SiC, nispeten kayıpların daha düşük olduğu yarı iletkenlerin ise Si tercih edildiği hibrit yapıları önerilmiştir [4]. Şekil 2.6’da farklı anahtarlama elemanları için önerilen yapılara ait devre şemaları yer almaktadır.



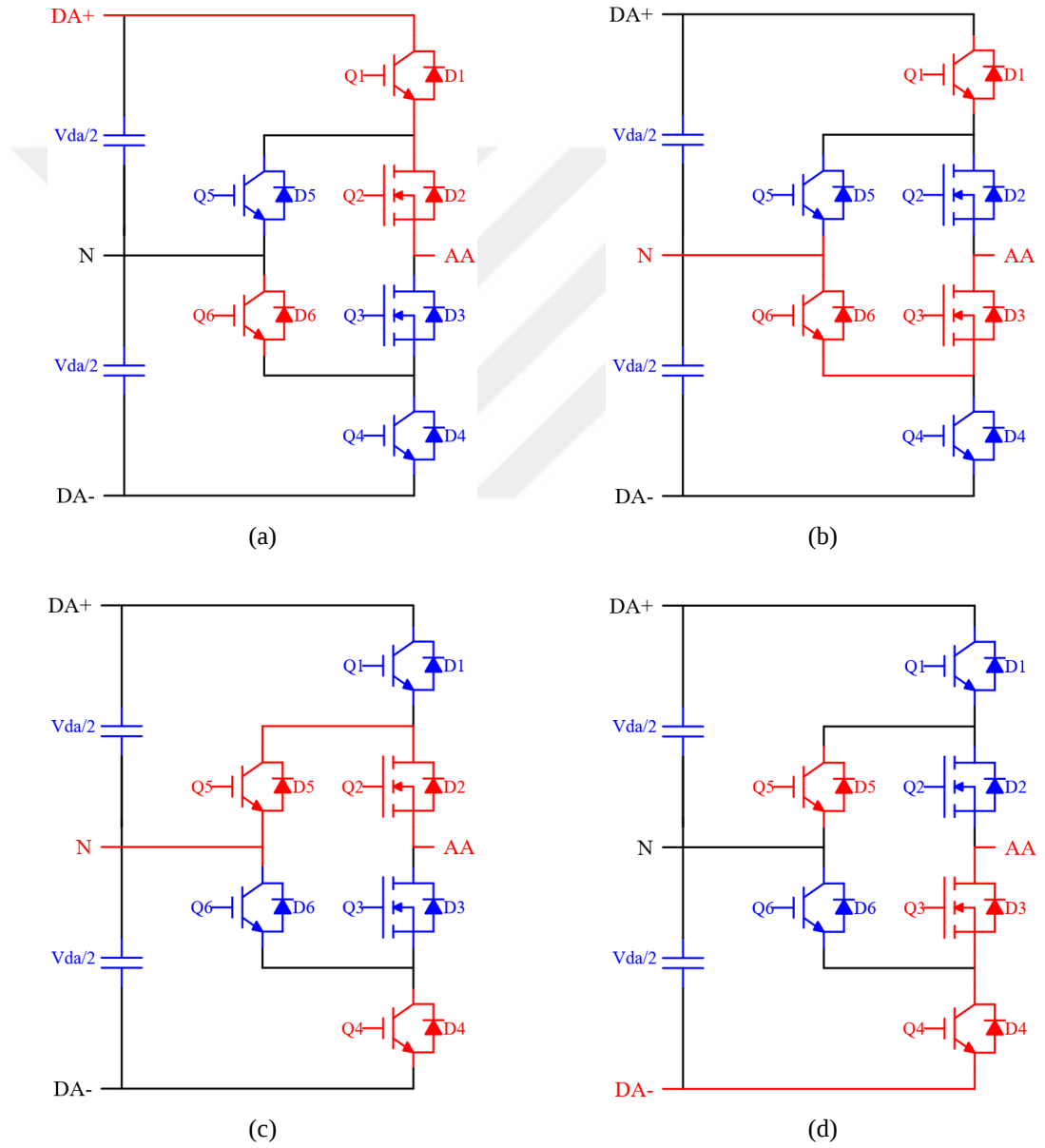


Şekil 2.6: Aktif nötr noktası kenetlemeli eviricinin farklı anahtar yapıları
a) Si-IGBT b) SiC MOSFET
c) HF/LF SiC-MOSFET/Si-IGBT Hibrit d) LF/HF Si-IGBT/SiC-MOSFET Hibrit

Şekil 2.6 (a)'da tamamı Si-IGBT ile oluşturulan klasik ANPC evirici yapısı bulunmaktadır. Bu yapıya alternatif olarak Şekil 2.6 (b)'de tamamı SiC-MOSFET ile oluşturulan bir ANPC evirici yapısı bulunmaktadır. Si-IGBT ile oluşturulan yapıya göre daha yüksek anahtarlama frekanslarında verimi daha iyi olduğundan tercih edilebilir fakat SiC maliyetleri yüksek olduğundan sağladığı verim avantajı önemini yitirmektedir. Maliyet etkisini azaltmak için Şekil 2.6 (c) ve Şekil 2.6 (d)'deki hibrit yapılar önerilmiştir. Bu hibrit yapılarda yüksek frekans ile anahtarlanan yarı iletkenler SiC-MOSFET tercih edilirken, şebeke frekansında anahtarlanan yarı iletkenler Si-IGBT seçilmiştir. Bu iki yapının verimi arasında büyük farklar bulunmadığından yapısında daha az SiC-MOSFET bulunduran LF/HF Si-IGBT/SiC-MOSFET Hibrit (SiC-Hibrit-ANPC) yapısı, fiyat ve başarımlar açısından en iyi çözüm olmuştur. Tablo 2.4'de ANPC evirici yapısına ait anahtarlama durumu verilmiştir.

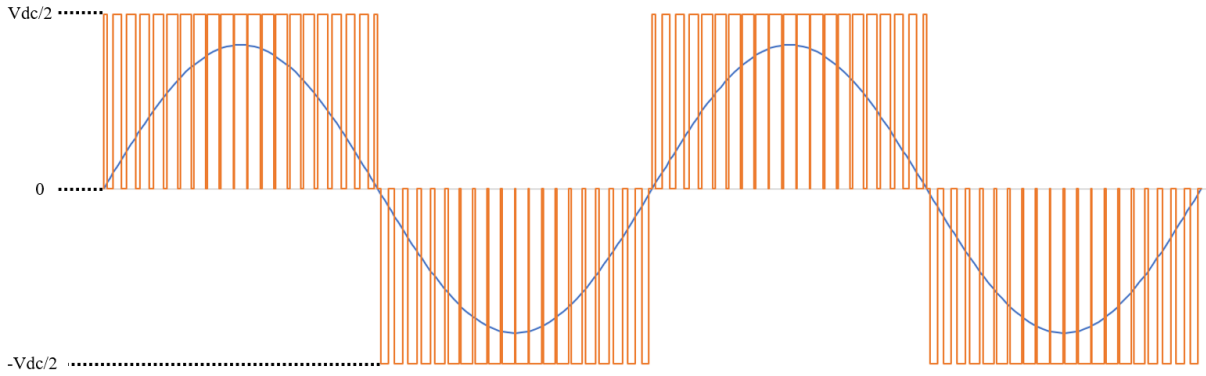
Tablo 2.4: Aktif nötr noktası kenetlemeli evirici anahtarlama durumu

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumu	Anahtarlar					
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
$V_{da}/2$	P	1	1	0	0	0	1
0	0^+	1	0	1	0	0	1
0	0^-	0	1	0	1	1	0
$-V_{da}/2$	N	0	0	1	1	1	0

**Şekil 2.7:** Aktif nötr noktası kenetlemeli eviricinin komutasyon hatları
a) Pozitif b) 0^+ c) 0^- d) Negatif

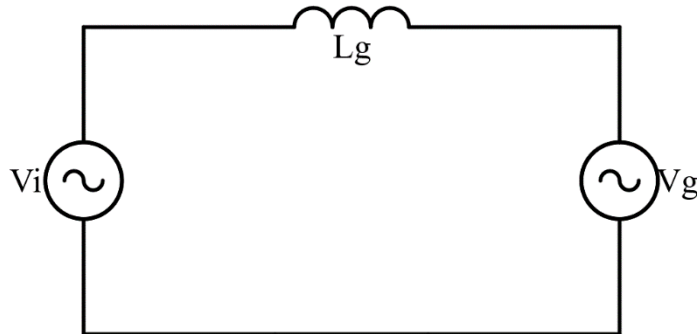
2.2. ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLERDE FİLTRE YAPILARI

SDGM anahtarlama bir evirici, çıkışında Şekil 2.8’da gösterildiği gibi anahtarlama frekansı ve bu frekansın tam katlarını içeren bir dalga şekli üretmektedir [6]. Anahtarlama frekansı ve katlarını içeren dalga şekilleri üreten bir eviricinin şebeke bağlantılı çalışacağı uygulamalarda, şebekeye yayabileceği harmonik seviyeleri IEEE 519-1992 [7] ve IEEE1547-2008’de [8] belirtilmiş sınırlar içerisinde olmalıdır. Bu standartlara göre, şebekeye iletilecek olan ana bileşenin 35 katının üzerindeki her akım harmoniğinin miktarı, nominal akımının %0,3’ünden daha az olmak zorundadır. Bunu sağlamak için şebeke bağlantılı eviriciler bir çıkış filtresi kullanmaktadır [9].



Şekil 2.8: Evirici çıkışındaki SDGM dalga şekli

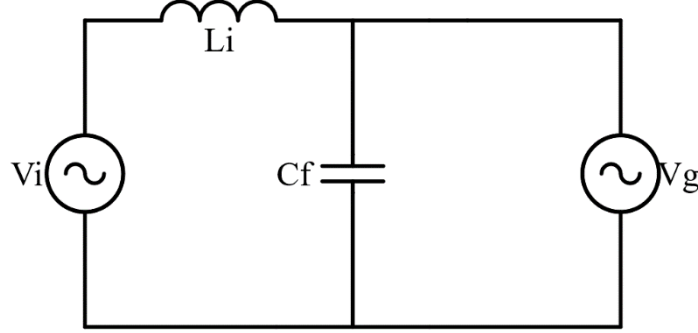
Evirici çıkışında kullanılan L filtresinin boyutunun küçültülmesi ve kayıplarının azaltılmasının bir yolu, daha yüksek dereceden filtre topolojileri kullanmaktır. L filtresine ait devre yapısı Şekil 2.9’de verilmiştir.



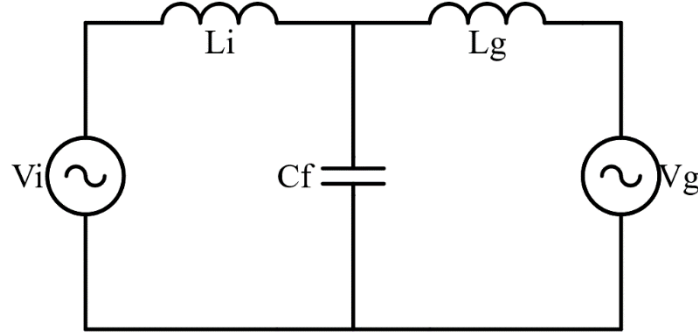
Şekil 2.9: L filtre

LC ve LCL filtreler, L filtreler göre anahtarlama frekansının temizlenmesinde daha etkili çözüm sunarlar. Sisteme eklenen paralel C hattı, özellikle yüksek frekans bileşenler için

düşük empedans hattı oluşturarak, eviriciden üretilen anahtarlama frekansı bileşenlerinin şebekeye gitmeden evirici içinde süzülmesini sağlar. Şekil 2.10'da LC filtreye ait devre yapısı verilmiştir.



Şekil 2.10: LC filtre



Şekil 2.11: LCL filtre

Şekil 2.11'de verilen LCL filtre LC filtreye seri olarak eklenen ekstra L ile oluşturulmaktadır. Bu sayede filtre içerisinde kullanılan endüktanslar, sadece bir L filtre kullanılan yapıya göre daha küçük boyutlandırılabilir. Bu sayede sistemin verimliliği artarken, boyut ve maliyet azaltılmış olur[19-22].

LCL filtreler, uygulama açısından birtakım zorlukları da beraberinde getirir. Yapılarında kullanılan endüktans ve kondansatörlerin bir paralel rezonans noktası bulunmaktadır. Bu noktanın evirici tarafından uyarılması halinde, LCL filtre rezonans yaratarak rezonans frekansında büyük akımların akmasına ve gerilim bozulmalarının oluşmasına sebep olur. Bunu önlemek için sisteme bir sönümlleme mekanizması eklenmesi gerekmektedir. Bu sönümlleme, LCL filtre içindeki endüktans veya kondansatöre seri veya paralel bir dirençle gerçekleştirilebilmektedir. Özellikle küçük güçlerde pasif sönümlleme tatmin edici sonuçlar verse de yüksek güçlü evirici sistemlerinde, sönümlleme direnci üzerinde oluşan ısı kayıpları

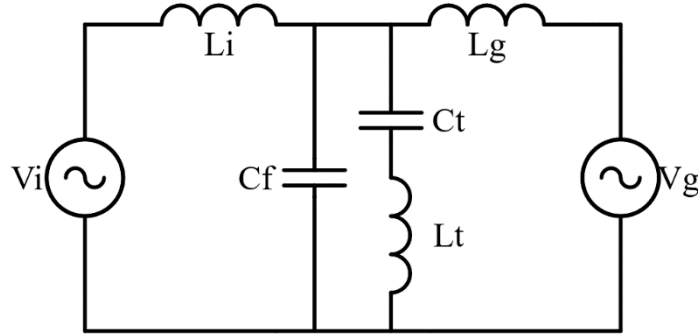
sistemin verimliliğini düşürmektedir. LCL filtrelerin rezonansını sönmölemek için pasif dirençlerin yanı sıra aktif sönmöleme yöntemleri de bulunmaktadır. Bu yöntemlerde, LCL hattına eklenen ikinci bir akım sensörü sayesinde, evirici yazılımsal olarak LCL hattında bir sönmöleme direnci varmış gibi çıkış dalga şekilleri üreterek rezonansın uyarılmasını önler [10]. Bu sayede ısı üretmeden LCL filtre sönmölenmiş olur.

LCL filtrelerin aktif veya pasif yöntemlerle sönmölenmesinin ardından, filtreleme karakteristikleri değişmektedir. Özellikle rezonans noktası anahtarlama frekansına yakın tasarlanmış LCL filtreler, sönmöleme uygulandıktan sonra anahtarlama frekansında, sadece bir L filtreye göre daha iyi başarıml göstermezler. Anahtarlama frekanslarının etkili bir şekilde sönmölenebilmesi için LCL rezonans noktasının çok daha düşük frekanslara (anahtarlama frekansının %10'u) ayarlanması gerekmektedir. Bu da LCL filtrenin boyutunu artırırken, aynı zamanda eviricinin çıkış bant genişliğini düşürmektedir. Yüksek bant genişlikli bir evirici uygulamasında LCL filtre rezonans noktası eviricinin tepki vermesi gereken frekans bandının dışında tasarlanmalıdır ki, bu da yüksek frekanslara tekaböl eder ve sadece bir LCL filtre ile anahtarlama güröltüsünün temizlenmesini olanaksız hale getirir [11].

Anahtarlama frekansının evirici çıkışından temizlenmesinin LCL filtre ile mümkün olmadığı uygulamalarda, LLCL tipi filtreler daha yüksek başarıml göstermektedir. Bu tip filtreler, LCL filtredekinin aksine paralel hatta sadece bir kondansatör değil, bir LC tuzak filtre devresi barındırırılar. Bu paralel LC hattı, anahtarlama frekansına akort edildiğinde, eviricinin anahtarlama frekansında ürettiği bütün güröltüyü filtreleyerek çıkışa ulaşması önlenir. Ancak, anahtarlama frekansının tam katı gibi eviricinin anahtarlama frekansı haricinde ürettiği güröltüler paralel LC hattı ile filtrelenemez ve LLCL filtre içerisindeki seri L yapısı üzerinden şebekeye aktarılır. Bu sebeple LLCL filtre yapıları anahtarlama güröltüsünün üstündeki frekans bileşenlerini filtrelemede LCL filtrelerden daha düşük başarıml gösterirler [6]. LCL filtrelerle eş başarıml elde edebilmek için çok daha büyük endüktanslar barındırmak durumunda kalır. Bu da sistemin maliyetine ve verimliliğine olumsuz etki eder[25-27].

LCL filtreler gibi anahtarlama frekansının tam katlarını iyi şekilde filtreleyen, aynı zamanda LLCL filtreler gibi anahtarlama frekansında üstün filtreleme başarıml gösteren bir filtre topolojisi de bulunmaktadır. Bu tür filtreler LCL-LC olarak adlandırılırken, bir LCL filtre gibi paralel kolda kondansatör barındırırken, buna paralel ikinci bir paralel kolda da LLCL filtre gibi bir LC tuzak filtresi barındırırılar. Bu yapıda, yüksek frekans bileşenleri paralel

kondansatör üzerinden süzülürken, anahtarlama frekansı bileşenleri de LC tuzak filtre tarafından yok edilir. Bu sayede, çıkışta anahtarlama frekansı veya üstündeki bileşenler çok uygun maliyetli şekilde standartların gerektirdiği seviyelere indirilmiş olur [12]. LCL-LC filtreye ait devre yapısı Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12: LCL-LC filtre

LCL-LC filtrelerin tasarım süreçleri, yapılarında iki tane paralel rezonans ve bir tane seri rezonans noktası barındırdıkları için, diğer filtre topolojilerine göre daha zordur. Bu tür filtrelerde de sönümlleme yöntemleri kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, filtre parametrelerindeki değişim ve endüktansların doyumlarından kaynaklı olarak filtre karakteristikleri değişkenlik gösterebilir. Bu sebeple, her koşulda şebeke standartlarının sağlandığının analiz edilmesi daha zordur.

Yukarıda incelenen filtre topolojilerinin tasarım süreçlerinde göz önünde tutulması gereken tasarım kriterleri, başlıklar altında şu şekilde özetlenebilir:

- **Şebeke tarafı akım dalgalılığı:** Filtre tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli kriterdir. Daha küçük şebeke tarafı akım dalgalılığı daha iyi bir LCL filtre başarımı demektir.
- **Evirici tarafı akım dalgalılığı:** Evirici tarafı akım dalgalılığı iki hususla ilgilidir (yarı iletken anahtarlama cihazlarının maksimum akımı ve evirici tarafı endüktansının doyma özelliği) ve belirli bir aralıkta sınırlandırılmalıdır.
- **Rezonans frekansı:** Rezonans frekansı yüksekse akım dalgalılığındaki zayıflama etkilenecektir ve aktif filtrenin çalışma frekans bant genişliği daralır.
- **Pasif sönümlleme direnci:** Rezonans problemiyle başa çıkmak için etkili ve düşük kayıplı bir yöntem olan pasif sönümlleme yöntemi kullanılır. Yazılım kontrol stratejisi ile aktif sönümlleme yöntemi olarak tercih edilen çözüm, pasif sönümlleme yöntemi yerine yavaş yavaş geçmektedir.

- **Maliyet, boyut ve ağırlık:** Genellikle iyi bir sönümlleme etkisi yanında maliyet, boyut ve ağırlık artışı getirir. Bu nedenle, belirtilen parametrelerin dengesi göz önünde tutularak bir tasarım yapılmalıdır [9].

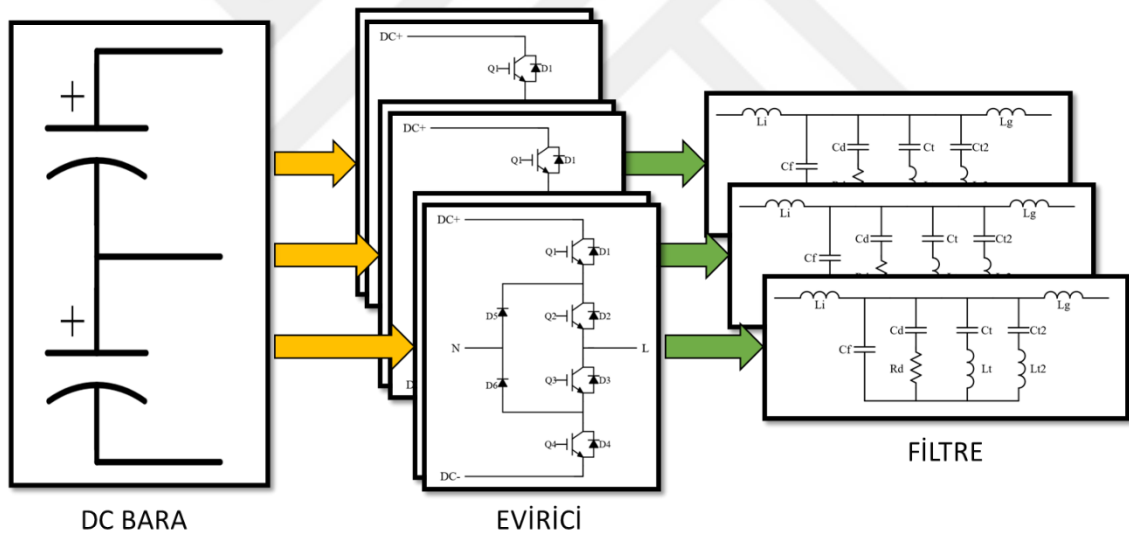


3. YÖNTEM

3.1. TASARIM

3.1.1. EVİRİCİ TASARIMI

Tez kapsamında Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC topolojileri kullanılarak 100kVA çıkış gücüne sahip üç fazlı evirici tasarımları gerçekleştirilmiştir. 100kVA çıkış gücünün sağlayabilmek için her faz için iki paralel 100/150A anma akımına sahip Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC güç modülleri kullanılmıştır. Si-NPC yapısı için SEMIKRON firmasının SK150MLI07F3TD1p kodlu güç modülü, SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısında ise INFINEON firmasının F3L11MR12W2M1_B74 kodlu güç modülü kullanılmıştır. Tez kapsamında karşılaştırılan yapılara ait devre şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Tasarlanan eviriciye ait devre şeması

3.1.1.1. DA Bara Tasarımı

Tez kapsamında karşılaştırılan evirici yapıları aynı zamanda TÜBİTAK TEYDEB projelerinde ticari hedefe yönelik geliştirilen AHF ve STATKOM ürünleridir. Eviriciler hem AHF hem de STATKOM olarak çalışırken farklı akım karakteristiklerine sahip olabilmektedirler. Ürünlerin en kötü koşullarda 100.000 saat ömrünün olması beklendiğinden DA bara kondansatörlerini zorlayıcı olabilecek akım karakteristikleri için ömür hesapları

gerçekleştirilmiştir. Ömür hesapları TDK/EPCOS firmasının alüminyum kondansatörler için oluşturduğu ömür hesaplama aracı üzerinden gerçekleştirilmiştir [13].

Tablo 3.1: DA bara kondansatörlerinin ömür hesabında kullanılan akım karakteristikleri

Frekans (Hz)	1.Akım Karakteristiği (A)	2.Akım Karakteristiği (A)	3.Akım Karakteristiği (A)	4.Akım Karakteristiği (A)
50	105.27	64.46	0.09	3.58
100	50.60	87.20	0.06	0.30
150	5.49	35.97	133.29	21.05
200	0.58	24.68	0.07	63.24
250	2.24	0.30	0.02	81.73
300	0.68	2.83	10.32	31.26
450	0.52	0.50	3.30	11.44
750	0.39	0.17	0.59	2.16
40000	48.27	76.70	89.68	63.58
80000	29.47	29.80	26.44	32.74
120000	19.04	21.01	25.73	18.07
160000	12.75	13.64	12.01	13.39
200000	10.74	12.77	12.55	9.53
Toplam	135.06	146.01	166.42	137.188

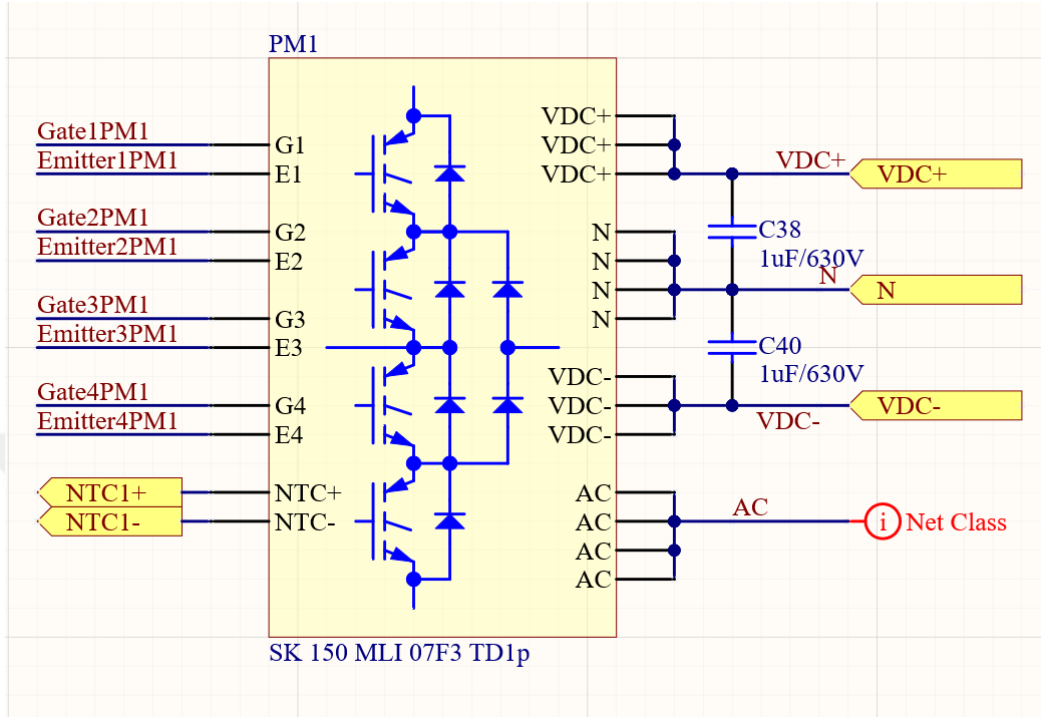
Hedef ömür olan 100.000 saat çalışabilmesi için yüksek ripple değerine sahip ve yüksek sıcaklığa dayanıklı kondansatörler seçilmiştir. TDK/EPCOS firmasının 450V/1500uF 85°C'lik kondansatörlerinden toplam 30 adet (15 adet +DA, 15 adet -DA bara hattında paralel) kullanılması gerektiği hesaplanmıştır.

3.1.1.2. Baskılı Devre Kartı Tasarımı

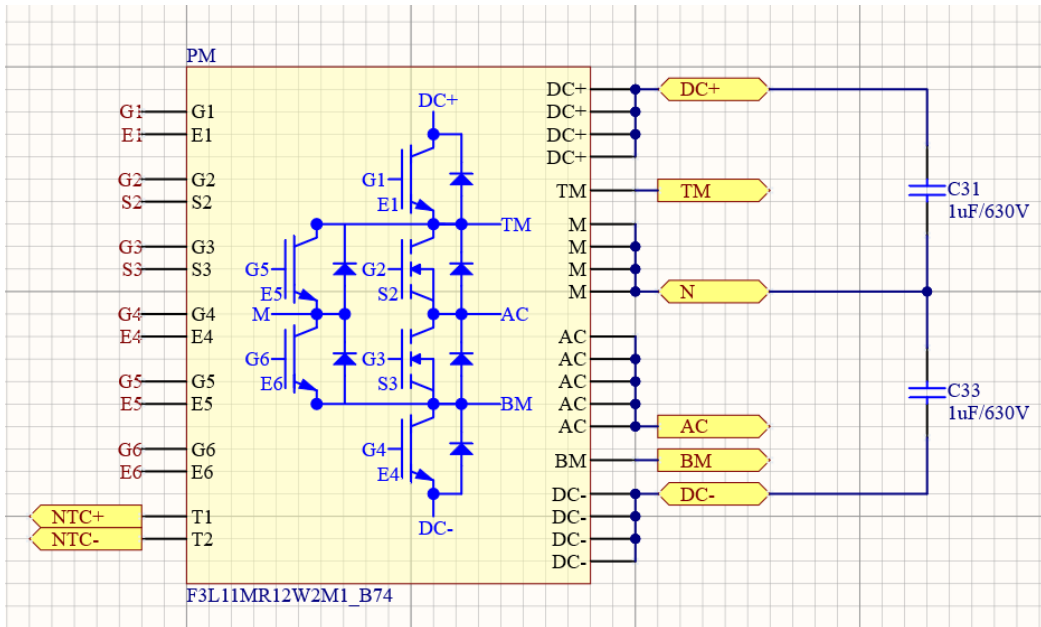
Evirici donanımına ait baskılı devre kartlarının (BDK) tasarımları Altium Designer ile gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında tasarlanan 150A çıkış akımına sahip eviricilerin BDK'larının tasarımındaki en kritik noktalardan birisi BDK'larının 150A akımı taşıyabilecek şekilde tasarlanmış olmalarıdır. Bunun sağlanabilmesi için bakır yolların genişliğinin yanı sıra tasarlanan BDK'larda bakır kalınlığının da standart üretim olan 35µm yerine özel üretim olan 105µm olması gerekmektedir. Ayrıca standart BDK'larda kullanılan dielektrik malzeme olan FR4 150°C'ye kadar dayanıklıdır. Farklı ortam sıcaklıklarında da çalışabilir bir ürün olması hedeflendiğinden özel olarak 180°C'ye kadar dayanıklı FR4 malzeme tercih edilmiştir.

BDK'ların tasarımlarına öncelikle devre şeması çizilerek başlanmıştır. Devre şeması içerisinde yer alan devre elemanlarının şematik ve footprint çizimleri Altium Designer

kütüphanesine eklenmiştir. Tez kapsamında kullanılan Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC modüllere ait şematik gösterim Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de verilmiştir.

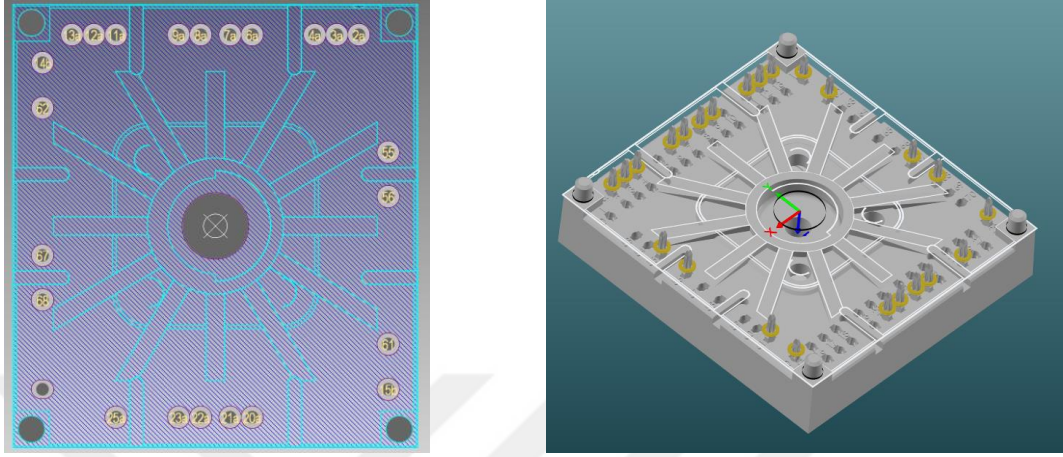


Şekil 3.2: Si-NPC modüle ait şematik gösterim

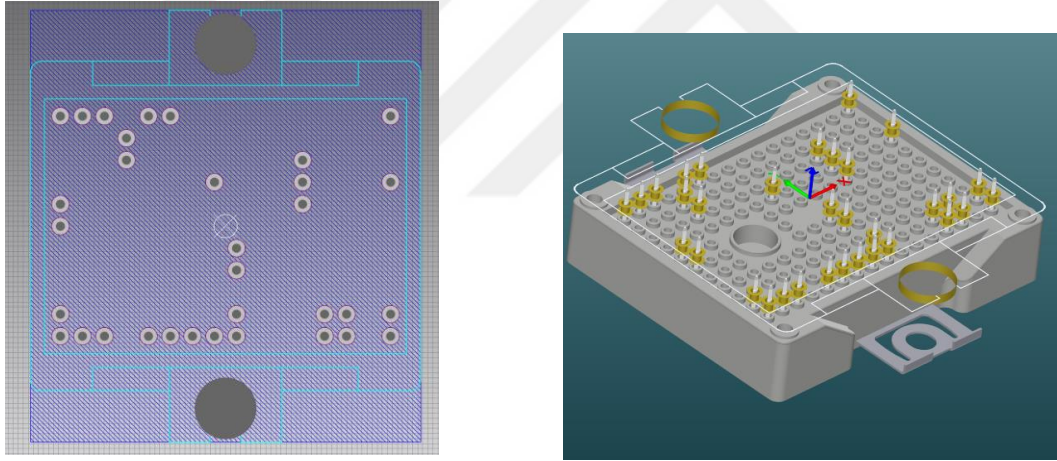


Şekil 3.3: SiC-Hibrit-ANPC modüle ait şematik gösterim

Devre elemanlarının şematik çizimleri tamamlandıktan sonra footprint çizimleri ve 3B dosyalarının footprintlere eklenmesi gerçekleştirilmiştir. Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC modüllere ait footprint ve 3B görüntüleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de verilmiştir.



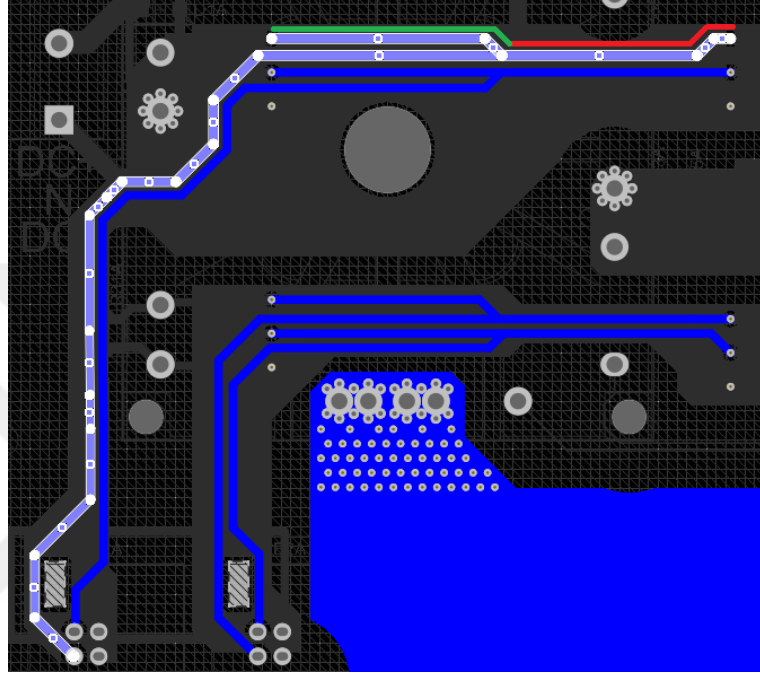
Şekil 3.4: Si-NPC modüle ait footprint ve 3B ekran görüntüsü



Şekil 3.5: SiC-Hibrit-ANPC modüle ait footprint ve 3B ekran görüntüsü

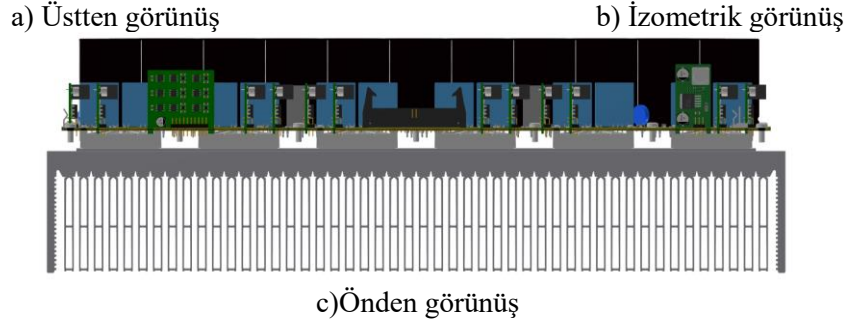
Tez kapsamında kullanılan komponentlerin şematik ve footprint çizimleri kütüphaneye eklendikten sonra BDK tasarımı aşamasına geçilmiştir. Evirici donanımında kullanılan modüller 150A çıkış akımı üreteceklerinden ısınmaktadırlar. Oluşan bu ısı modüllerin üzerine yerleştirildiği alüminyum soğutucu ile atılmaktadır. BDK tasarımı yapılırken öncelikli olarak modüllerin soğutucu üzerindeki yerleşimleri gerçekleştirilmiştir. Her bir modülün eş olarak çalışabilmesi için bir fazda bulunan paralel modüller ve diğer fazlardaki modüller dahil olmak üzere bütün modüller arasında eşit mesafe bırakılmıştır. Bu sayede yakın sıcaklıklarda çalışmaları sağlanmıştır. Paralel çalışmanın zorluklarından olan anahtarların eş zamanlı sürülememesinden kaynaklanacak bir anahtara fazla yük binmesi ve aşırı ısınması durumunun

önüne geçmek için kapı işaretlerini taşıyan yolların paralel modül kapılarında eşit uzunluk ve kalınlıkta yollar ile çizilmiştir. İki paralel modüle ait kapı sinyallerine ait ekran görüntüsü Şekil 3.6’de verilmiştir. Yeşil ile gösterilen yol A fazına ait birinci modülün Q1 anahtarına ait, kırmızı ile gösterilen ise A fazına ait ikinci modülün Q1 anahtarına ait kapı sinyalini göstermektedir.

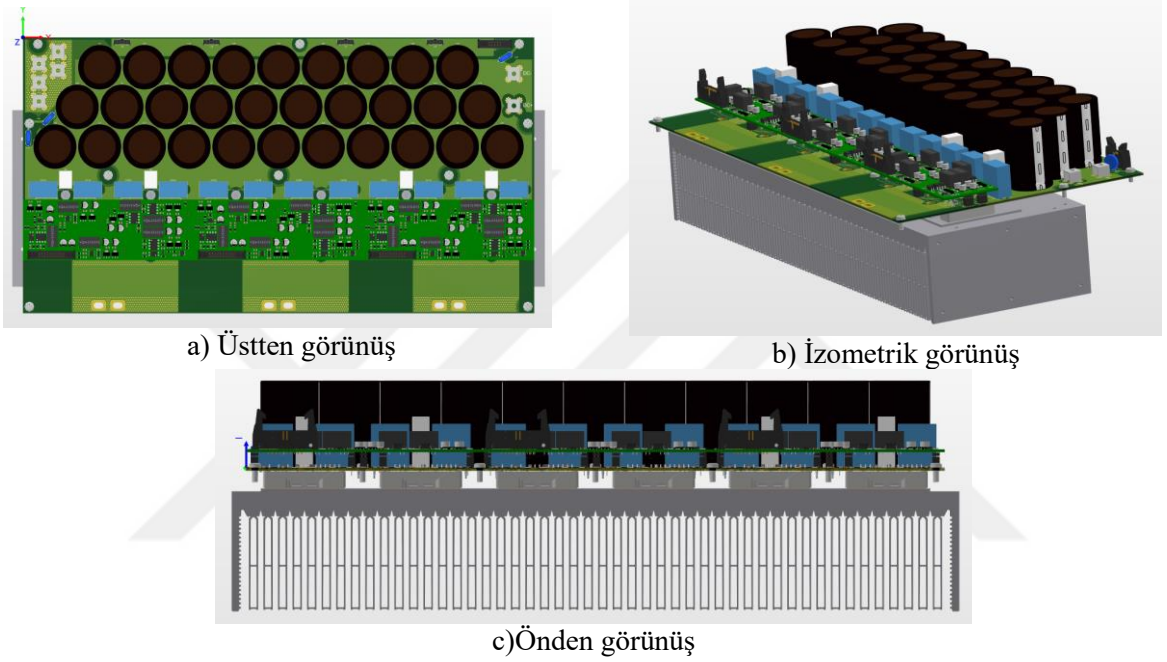


Şekil 3.6: Paralel modüllere ait kapı sinyalleri

Evirici kartları standart BDK’lardan farklı olarak yüksek gerilim ve yüksek akım içermektedir. Bu yüzden evirici kartı üzerinde aralarında yüksek gerilim olan yollar arasındaki mesafeye dikkat edilmiştir. DA baranın pozitif noktası ile nötr arasında 400V gerilim farkı bulunabileceğinden bu noktalar arasında 4mm mesafenin altına düşülmemiştir. Si-NPC modül ile tasarlanan evirici kartında modülün DA bara ve nötr bağlantı noktalarının yollarına ait ekran görüntüsü Şekil 3.7’ verilmiştir.



Şekil 3.9: Tasarlanan Si-NPC evirici yapısına ait BDK'nın 3B görüntüleri



Şekil 3.10: Tasarlanan SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısına ait BDK'nın 3B görüntüleri

3.1.2. FİLTRE TASARIMI

3.1.2.1. Filtre Parametrelerinin Hesaplanması

Tez kapsamında tasarlanan şebeke bağlantı filtresi için LCL-LC yapısı kullanılmıştır. Bu yapının tercih edilmesinin sebebi maliyet, verim ve filtre başarımı açısından en iyi çözüm olmasıdır.

LCL filtre tasarımında evirici tarafı bobinin L_i endüktans değeri Denklem (3.1)'deki gibi hesaplanmaktadır. Şebeke tarafı endüktans değeri ise, Denklem (3.2)'deki gibi evirici tarafı endüktansının, bir korelasyon katsayısı (r) ile çarpılmasıyla elde edilir.

$$L_i = \frac{U_{dc}}{8\Delta i_{Li_max} f_{sw}} \quad (3.1)$$

$$L_g = r \cdot L_i \quad (3.2)$$

Denklem (3.1)'te verilen U_{dc} (V), DA bara gerilim değeridir. f_{sw} (Hz) ise sistemin anahtarlama frekansıdır. Filtre kondansatörü C_f aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Denklem (3.3)'te verilen Z_b , taban empedansıdır. U_n , faz-faz arası RMS gerilimi (evirci çıkışı) ve P_n ise anma gücüdür. Denklem (3.4)'te verilen C_b ise baz sığa değeridir. ω_g , şebeke tarafı açısal frekansıdır.

$$Z_b = \frac{U_n^2}{P_n} \quad (3.3)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega_g \cdot Z_b} \quad (3.4)$$

Evirci tarafı endüktansı üzerindeki akım dalgalılığının tepe değerini çıkış gücü ve çıkış gerilimi ile Denklem (3.5)'teki gibi hesaplanmaktadır.

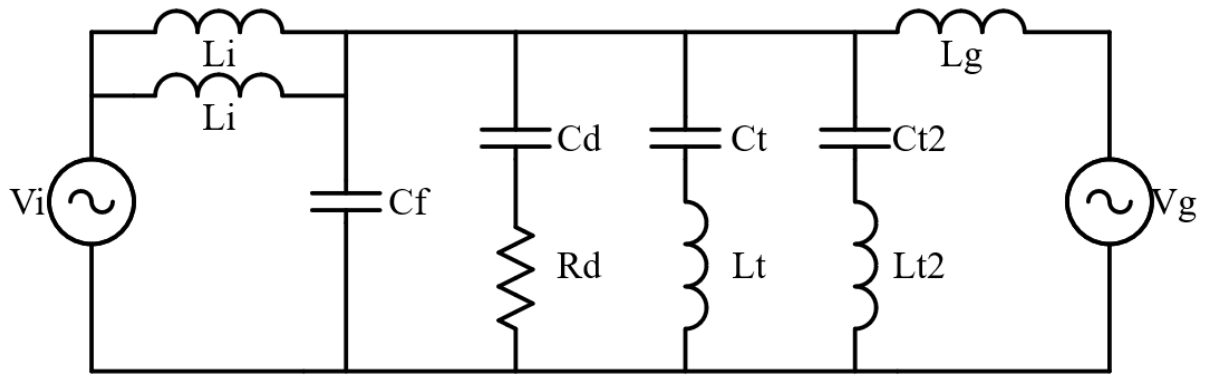
$$\Delta i_{Li_max} = 0,1 \frac{P_n \sqrt{2}}{3U_n} \quad (3.5)$$

$$C_f = 0,05 C_b \quad (3.6)$$

Tuzak filtre ise anahtarlama frekansındaki gürültüleri sönmölemek için kullanılan filtre yapısıdır. Filtrelenmek istenen anahtarlama frekansı için Denklem (3.7)'de verilen formöl ile tuzak filtre yapısındaki endüktans ve kondansatör değerleri hesaplanabilir.

$$f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C_t}} \quad (3.7)$$

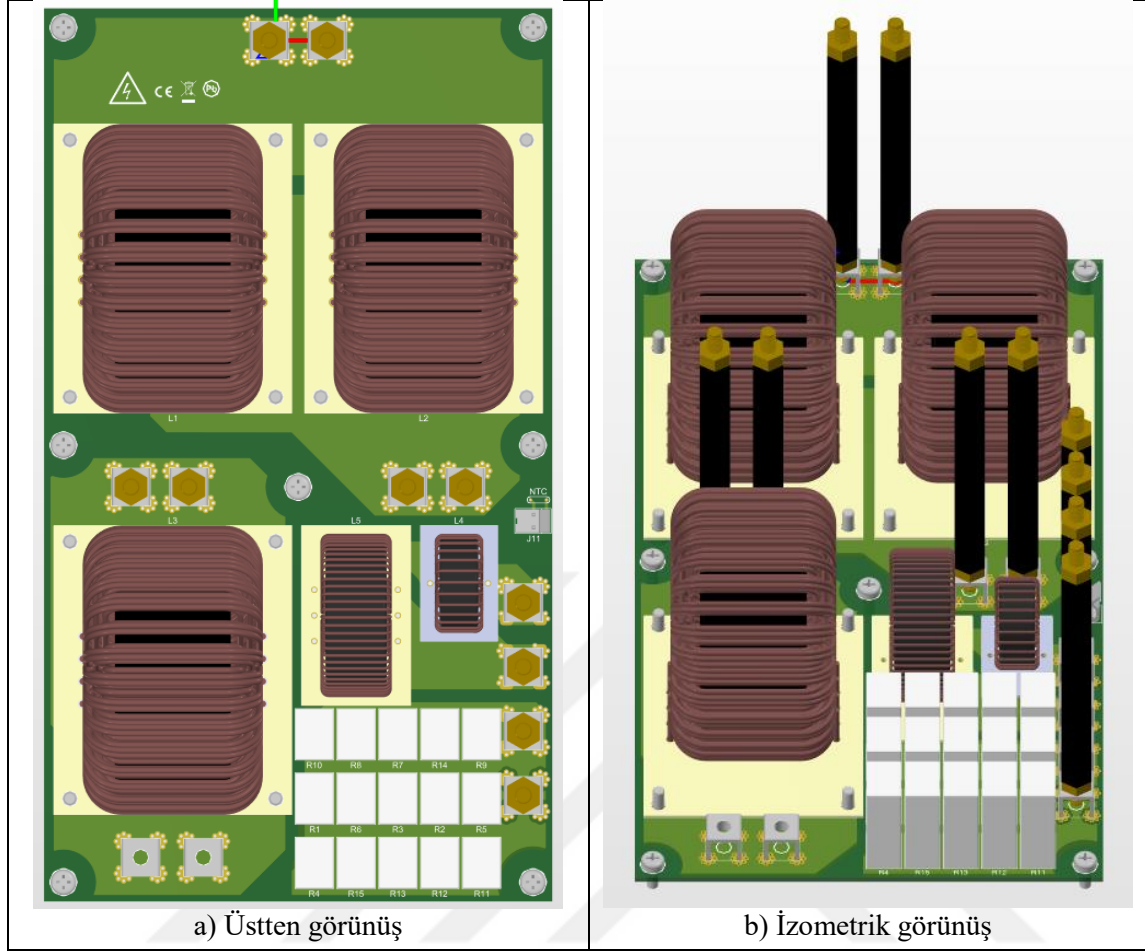
Evirici tarafında kayıpları azaltmak için 2 adet paralel endüktans kullanılmıştır. Bu sayede 150A çıkış akımı filtreleyen bir evirici tarafı endüktansı yerine 75A çıkış akımını filtreleyen iki endüktans paralel bağlanmıştır. Tez kapsamında tasarlanan LCL-LC filtre yapısına ait devre şeması Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11: Tasarlanan LCL-LC filtre yapısına ait devre şeması

3.1.2.2. Baskılı Devre Kartı Tasarımı

Tasarlanan LCL-LC filtre yapısının baskılı devre kartı bu başlık altında anlatılmıştır. LCL-LC filtre yapısında bulunan endüktansların BDK üzerinde elektriksel olarak izole olmaları ve mekanik olarak sağlam durmaları için FR4 malzemeden destek parçalar tasarlanmıştır. Akım BDK üzerindeki bakır yollar ile taşınacağından yolların ısınmaması ve kayıpların azaltılması için geniş bakır yollar kullanılmıştır. 150A akımı ideal BDK çalışma sıcaklıklarında taşıyabilmesi için 105µm bakır kalınlığı tercih edilmiştir. Farklı ortam sıcaklıklarında da çalışabilir bir ürün olması hedeflendiğinden bakır katmanlar arasında yalıtkan malzeme olarak 180°C’ye kadar dayanıklı FR4 malzeme tercih edilmiştir. Katmanlar arasında sıcaklık ve akım dengesini sağlamak için akım taşıyan bölgelere vialar yerleştirilmiştir. Kart üzerinde bulunan manyetik malzemeler ağır oldukları için tek fazlı kart çizilmiş ve bu kart üç fazda da kullanılmıştır. Altium Designer’den alınan karta ait 3B ekran görüntüleri Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12: LCL-LC kartına ait 3B ekran görüntüleri

3.2. SİSTEM BENZETİMİ

3.2.1. EVİRİCİ KAYIPLARININ HESAPLANMASI

Bu başlık altında evirici yapılarının kayıplarına ilişkin denklemler ve hesaplamada kullanılan yardımcı araçlar anlatılmıştır. Evirici yapısında bulunan yarı iletkenlere ait iletim ve anahtarlama kayıp formülleri de bu başlık altında verilmiştir.

$$P_{Cond(IGBT)} = DI_{on}V_{on} \quad (3.8)$$

$$P_{Cond(MOSFET)} = R_{DS}I_{on}^2 \quad (3.9)$$

$$P_{sw(IGBT,MOSFET)} = \frac{1}{2} I_{on} V_{off} (t_{on} + t_{off}) f_{sw} \quad (3.10)$$

$$P_{cond(Diyot)} = V_{D0} I_{on} + R_{D0} I_{on}^2 \quad (3.11)$$

$$P_{sw(Diyot)} = E_{REC} * f_{sw} \quad (3.12)$$

Yukarıda verilen formüller yarı iletkenlere ait genel kayıp formülleridir. Yapılara ait özelleştirilmiş formüller ise aşağıda detaylandırılmıştır.

Si-NPC evirici yapısında bulunan yarı iletkenlere ait iletim ve anahtarlama kayıplarına ilişkin formüller aşağıdaki gibidir.

Q1 ve Q4'e ait kayıp formülleri Denklem (3.13) ve (3.14)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{m\hat{I}}{12\pi} \cdot \{3V_{ce0} \cdot [(\pi - \varphi) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\varphi)] + 2r_{ce}\hat{I} \cdot [1 + \cos(\varphi)]^2\} \quad (3.13)$$

$$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}}\right)^{K_l} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}}\right)^{K_v} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} [1 + \cos(\varphi)]\right) \cdot G_l \quad (3.14)$$

Q2 ve Q3'e ait kayıp formülleri Denklem (3.15) ve (3.16)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \cdot \{V_{ce0} \cdot [12 + 3m(\varphi \cos(\varphi) - \sin(\varphi))] + r_{ce}\hat{I} \cdot [3\pi - 2m(1 - \cos(\varphi))]^2\} \quad (3.15)$$

$$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}}\right)^{K_l} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}}\right)^{K_v} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} [1 - \cos(\varphi)]\right) \cdot G_l \quad (3.16)$$

D5 ve D6'e ait kayıp formülleri Denklem (3.17) ve (3.18)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{\hat{I}}{12\pi} \cdot \{V_{f0} \cdot [12 + 3M[(2\varphi - \pi) \cos(\varphi) - 2\sin(\varphi)]] + r_f\hat{I} \cdot [3\pi - 4m(1 + \cos(\varphi))]\} \quad (3.17)$$

$$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_l} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} [1 + \cos(\varphi)] \right) \cdot G_l \quad (3.18)$$

D1 ve D4'e ait kayıp formülleri Denklem (3.19) ve (3.20)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{m\hat{I}}{12\pi} \cdot \{3V_{f0} \cdot [-\varphi \cos(\varphi) + \sin(\varphi)] + 2r_f \hat{I} \cdot [1 - \cos(\varphi)]^2\} \quad (3.19)$$

$$P_{sw} = f_{sw} \cdot E_{sw} \cdot \left(\frac{\hat{I}}{I_{ref}} \right)^{K_l} \cdot \left(\frac{V_{cc}}{V_{ref}} \right)^{K_v} \cdot \left(\frac{1}{2\pi} [1 - \cos(\varphi)] \right) \cdot G_l \quad (3.20)$$

D2 ve D3'e ait kayıp formülleri Denklem (3.21) ve (3.22)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{m\hat{I}}{12\pi} \cdot \{3V_{f0} \cdot [-\varphi \cos(\varphi) + \sin(\varphi)] + 2r_f \hat{I} \cdot [1 - \cos(\varphi)]^2\} \quad (3.21)$$

$$P_{sw} = 0 \quad (3.22)$$

$$m = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{RMS}}{\sqrt{3} \cdot V_{DC}/2} \quad (3.23)$$

SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısında bulunan anahtarlara ait iletim ve anahtarlama kayıpları ise aşağıda detaylandırılmıştır.

Q1 ve Q4'e ait kayıp formülleri Denklem (3.24) ve (3.25)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{m}{12\pi} \cdot \{2\hat{I}^2 R_{DS} \cdot [1 + \cos(\varphi)]^2 + 3\hat{I} V_{f0} \cdot [(\pi - \varphi) \cos(\varphi) + \sin(\varphi)]\} \quad (3.24)$$

$$P_{sw} = 0 \quad (3.25)$$

Q2 ve Q3'e ait kayıp formülleri Denklem (3.26) ve (3.27)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{m}{24\pi} \cdot \{\hat{I}^2 R_{DS} \cdot [3(2\varphi - \sin(2\varphi) + 16m \cos(\varphi)) + 6\hat{I} V_{f0} \cdot [2(1 - \cos(\varphi)) + \pi m \cos(\varphi)]]\} \quad (3.26)$$

$$P_{sw} = \frac{1}{8\pi} (2\alpha_{sw} \pi \hat{I}^2 + 8b_{sw} \hat{I} + 4\pi c_{sw}) \frac{v_{DC}/2}{V_{ref}} f_{sw} \quad (3.27)$$

Q5 ve Q6'ya ait kayıp formülleri Denklem (3.28) ve (3.29)'da verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{1}{24\pi} \cdot \{ \hat{I}^2 R_{DS} \cdot [6(\pi - \varphi) + 3\sin(2\varphi) - 4m(1 + \cos(\varphi))^2] + 6\hat{I}V_{f0} \cdot [2(1 + \cos(\varphi)) + m((\varphi - \pi)\cos(\varphi) - \sin(\varphi))] \} \quad (3.28)$$

$$P_{sw} = 0 \quad (3.29)$$

D1 ve D4'e ait kayıp formülleri Denklem (3.30) ve (3.31)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{m}{12\pi} \cdot \{ 2\hat{I}^2 R_{DS} \cdot [1 - \cos(\varphi)]^2 + 3\hat{I}V_{f0} \cdot [-\varphi \cos(\varphi) + \sin(\varphi)] \} \quad (3.30)$$

$$P_{sw} = 0 \quad (3.31)$$

D2 ve D3'e ait kayıp formülleri Denklem (3.32) ve (3.33)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{1}{24\pi} \cdot \{ \hat{I}^2 R_{DS} \cdot [6(\pi - \varphi) + 3\sin(2\varphi) - 16m\cos(\varphi)] + 6\hat{I}V_{f0} \cdot [2(1 + \cos(\varphi)) + \pi m\cos(\varphi)] \} \quad (3.32)$$

$$P_{sw} = \frac{1}{8\pi} (2\alpha_{sw} \pi \hat{I}^2 + 8b_{sw} \hat{I} + 4\pi c_{sw}) \frac{v_{DC}/2}{V_{ref}} f_{sw} \quad (3.33)$$

D5 ve D6'ya ait kayıp formülleri Denklem (3.34) ve (3.35)'de verilmiştir.

$$P_{cond} = \frac{1}{24\pi} \cdot \{ \hat{I}^2 R_{DS} \cdot [6\varphi - 3\sin(2\varphi) - 4m(1 + \cos(\varphi))^2] + 6\hat{I}V_{f0} \cdot [2(1 - \cos(\varphi)) + m(\varphi\cos(\varphi) - \sin(\varphi))] \} \quad (3.34)$$

$$P_{sw} = 0 \quad (3.35)$$

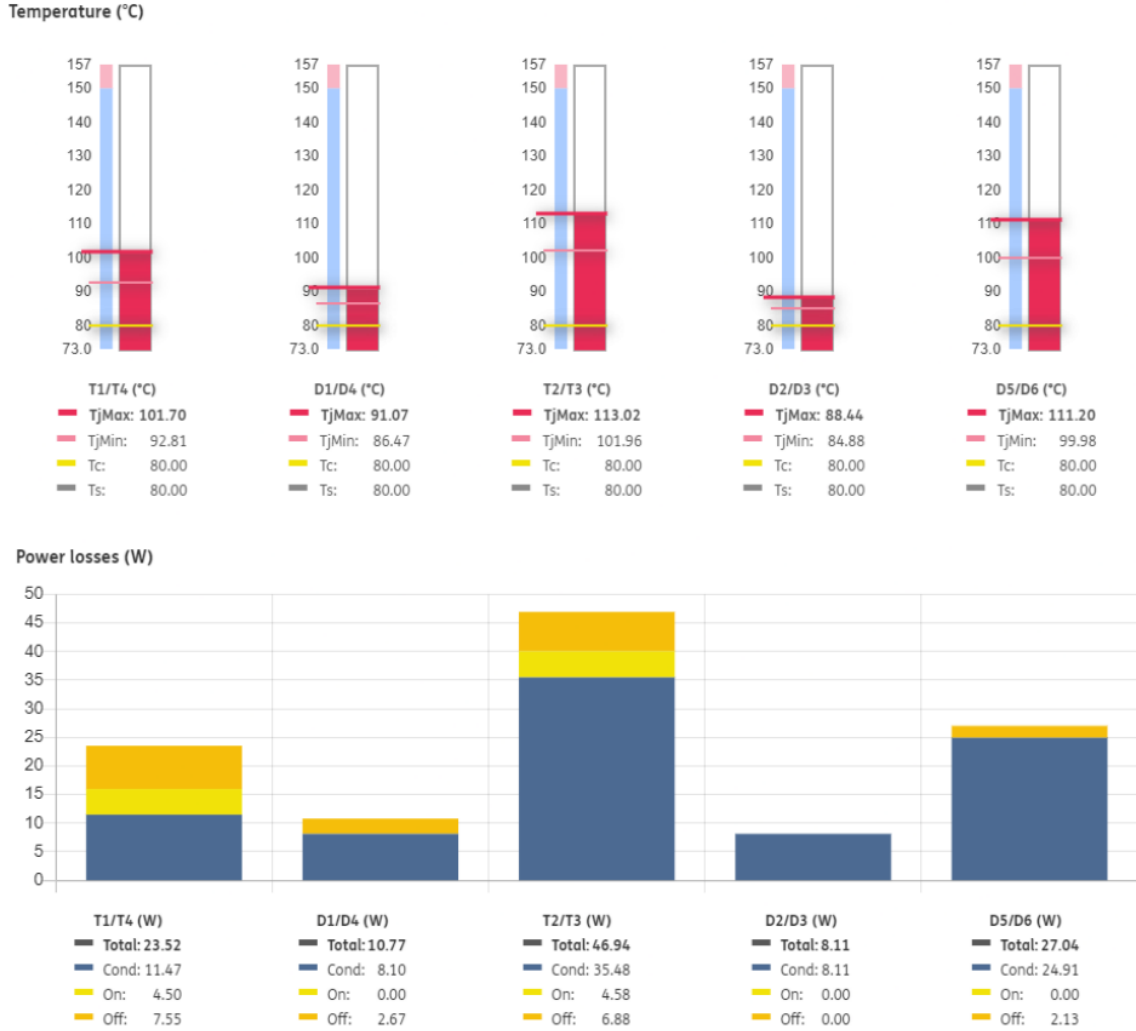
Tez kapsamında karşılaştırılması yapılan iki evirici yapısı için de kayıplar aynı koşullar altında hesaplanmıştır. Evirici yapılarını oluştururken kullanılan yarı iletken modüllerin kayıpları hesaplanırken, üretici firmaların açık kaynak olarak sunduğu benzetim araçları kullanılmıştır. Si-NPC evirici yapısında kullanılan SEMIKRON firmasının SK150MLI07F3TD1p kodlu ürünü, SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısında ise INFINEON firmasının F3L11MR12W2M1_B74 kodlu ürünü kullanılmıştır. İki ürün de 150A çıkış akımını güvenli sıcaklıklarda gerçekleştirebilmek için her fazda 2 adet paralel olarak kullanılmıştır. Bu sebeple kayıplar 6 modül için hesaplanmıştır. Benzetim sonuçlarının gerçeğe yakın bir şekilde sonuç vermesi için kullanılan modüllerin soğutucu üzerindeki yerleşimi, soğutucu boyutları ve soğutucu üzerindeki havanın akış hızının doğru girilmesi gerekmektedir.

Si-NPC evirici yapısına ait kayıplar hesaplanırken SEMIKRON firmasının belirli koşullar altında çalışan modüllerin içerisindeki her bir yarı iletken için sıcaklık, anahtarlama kaybı ve iletim kayıplarını gösteren benzetim aracı SemiSel V5 [14] kullanılmıştır. SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısına ait kayıplar hesaplanırken ise INFINEON firmasının simülasyon aracı olan IPOSIM [15] kullanılmıştır. Gerçekleştirilen benzetimlerde eviricilere ait kullanılan parametreler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Benzetim parametreleri

DA Bara Gerilimi	800V
Anahtarlama frekansı	10-30kHz
Çıkış Akımı	150A
Güç faktörü	0
Çıkış Gerilimi	380V
Çıkış Frekansı	50 Hz
Soğutucu Sıcaklığı	80°C

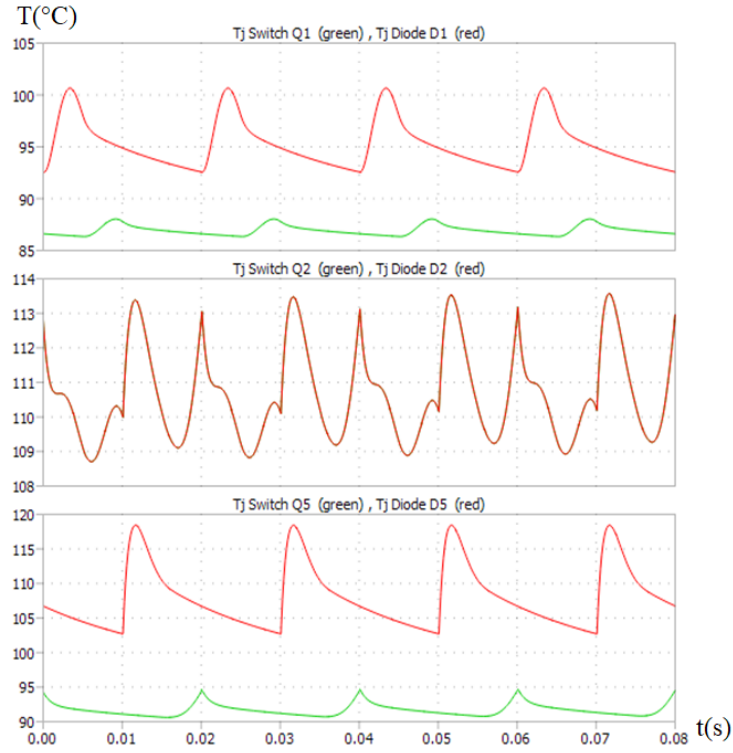
SemiSel V5 benzetim aracında Si-NPC evirici ile 10kHz anahtarlama frekansı için birinci modüle ait kayıpları ve sıcaklıkları içeren benzetim sonuçlarına ait görsel Şekil 3.13’gösterilmiştir.



Şekil 3.13: Si-NPC modüle ait benzetim sonuçları

Si-NPC yapısında bulunan anahtarlara ait sıcaklık ve kayıp grafikleri incelendiğinde kayıp ve sıcaklığın en yüksek olduğu yarı iletkenlerin Q2 ve Q3 anahtarları olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple SEMIKRON modül tasarımı yaparken Q2 ve Q3 anahtarlarını Q1 ve Q4 anahtarlarına kıyasla daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı olarak tasarlamıştır.

IPOSIM benzetim aracında SiC-Hibrit-ANPC evirici ile 10kHz anahtarlama frekansı için bir modüle ait anahtar sıcaklıklarını içeren benzetim sonuçlarına ait görsel Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14: SiC-Hibrit-ANPC modüle ait benzetim sonuçları

SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısında kaybın en yüksek olduğu yarı iletkenlerin Q2 ve Q3 anahtarları olmasına rağmen anlık olarak Q5 anahtarındaki sıcaklığın daha yüksek seviyelere çıktığı gözlemlenmiştir.

3.2.2. FİLTRE KAYIPLARININ HESAPLANMASI

LCL filtrenin endüktanslarına ait kayıplar bakır ve çekirdek kaybı olmak üzere iki başlıkta incelenmektedir. Endüktansın bakır kaybı sargı direnci nedeniyle oluşan kaybı ifade etmektedir. Bakır kaybı hesaplanırken, LCL filtre üzerindeki akım AA olduğundan dolayı iletken direnci üzerindeki deri etkisi göz önüne alınarak hesap yapılmalıdır. Deri etkisine ait formül Denklem (3.36)'de gösterilmiştir.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (3.36)$$

Deri etkisi ile AA akımın iletken üzerinde belirli bir bölgeden akmasından dolayı direnç hesaplanırken efektif kesit kullanılmalıdır. Efektif kesit formülü Denklem (3.37)'de verilmiştir.

$$A_e = \pi(D \cdot \delta - \delta^2) \quad (3.37)$$

İletkenin AA direncine ait formül Denklem (3.38)'de verilmiştir.

$$R_{ac} = \rho \cdot \frac{l}{A_e} \quad (3.38)$$

Direnç denkleminde l sargı uzunluğunu, ρ ise iletkenin özgül direncini ifade etmektedir. Bakır kaybı Denklem (3.39)'deki formül ile hesaplanmaktadır.

$$P_{cu} = I^2 \cdot R_{ac} \quad (3.39)$$

Endüktanslara ait çekirdek kayıpları üretici firmaların kataloglarda belirttiği formül ve katsayılarla hesaplanmaktadır. LCL filtrenin evirici tarafındaki endüktansında MAGNETICS markasının XFLUX serisine ait 0078744A7 kodlu toroid kullanılmıştır. Bu toroide ait çekirdek kayıpları Denklem (3.40)'da verilmiştir.

$$P_{core} = a.B^b.f^c \quad (3.40)$$

$$a=509.27, b=2.015, c=1.194$$

Denklemden yer alan B'nin birimi Tesla'dır ve Denklem (3.41)'deki şekilde hesaplanır.

$$B = \mu.H \quad (3.41)$$

Denklem (3.41)'de yer alan manyetik geçirgenlik Denklem (3.42)'deki gibi manyetik alan şiddeti ise denklem ise Denklem (3.43) ile hesaplanır.

$$\% \mu_i = \frac{1}{(a + b.H^c)} \quad (3.42)$$

$$a=0.01, b=4.976E-09, c=2.236$$

$$H = \frac{N.I}{l_e} \quad (3.43)$$

LCL filtrenin sönümlenme başarımını iyileştirmek için eklenen anahtarlama frekansına ayarlanmış tuzak filtrenin endüktansında MICROMETALS marka MS-157026-2 kodlu toroid kullanılmıştır. Anahtarlama frekansının iki katına ayarlanmış tuzak filtrenin endüktansında ise yine MICROMETALS marka MS-106026-2 kodlu toroid kullanılmıştır. MICROMETALS markasına ait MS serisinin çekirdek kaybı Denklem (3.44)'de verilmiştir.

$$P_{core} = \left(\frac{f}{\frac{a}{B^3} + \frac{b}{B^{2.3}} + \frac{c}{B^{1.65}}} + d.B^2.f^2 \right). V_e.10^3 \quad (3.44)$$

$$a=1E-06, b=4.969E08, c=3.993E06, d=2.867E-14$$

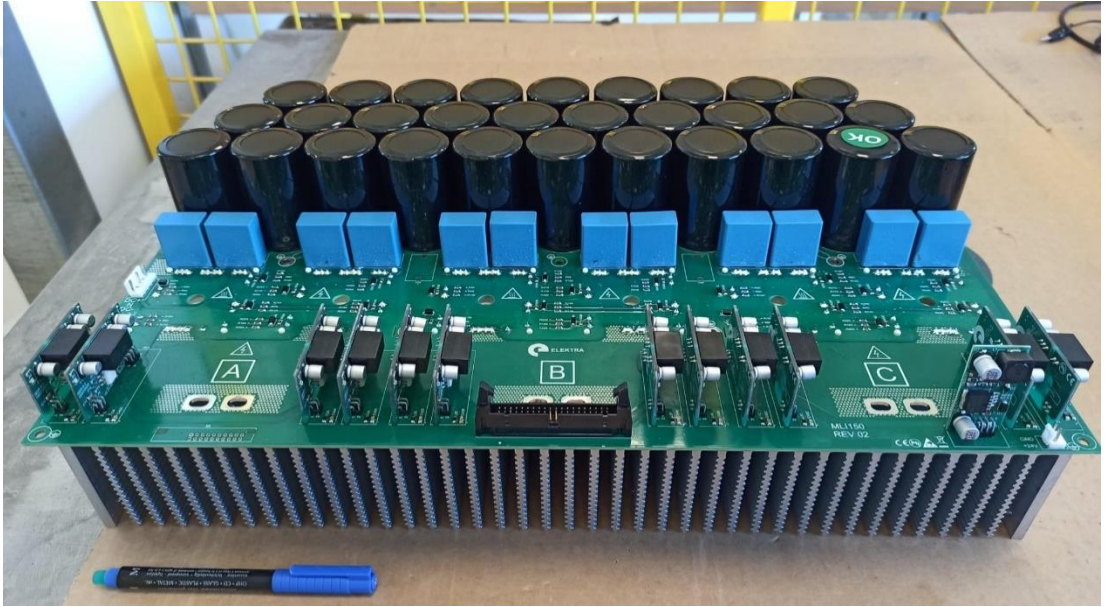
MS serisinin manyetik geçirgenliği ise Denklem (3.45)'de verilmiştir.

$$\% \mu_i = \frac{1}{a + b.H^c} \quad (3.45)$$

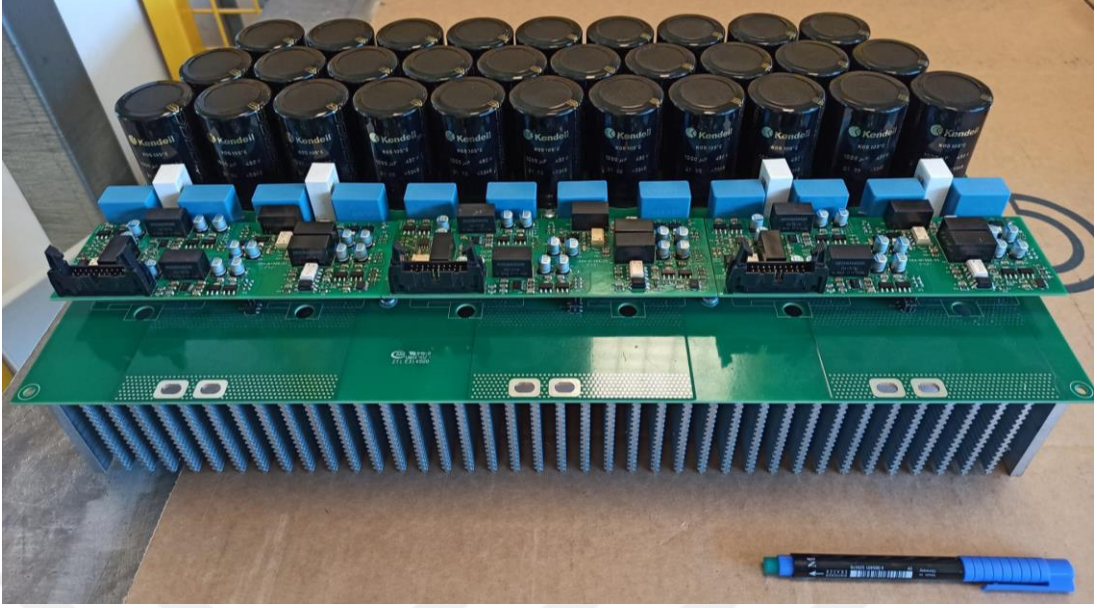
$$a=1E-02, b=2.061E-07, c=1.995$$

3.3. TESTLER

Tasarlanan Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC evirici yapılarının 15-20kHz anahtarlama frekansları için kayıplarının ölçüleceği test düzenekleri bu başlık altında anlatılmıştır. Evirici kartlarının soğutuculara montajı gerçekleştirilmiştir. Si-NPC evirici kartının soğutucuya montaj yapılmış hali Şekil 3.15’de, SiC-Hibrit -ANPC evirici kartının soğutucuya montaj yapılmış hali ise Şekil 3.16’de verilmiştir.

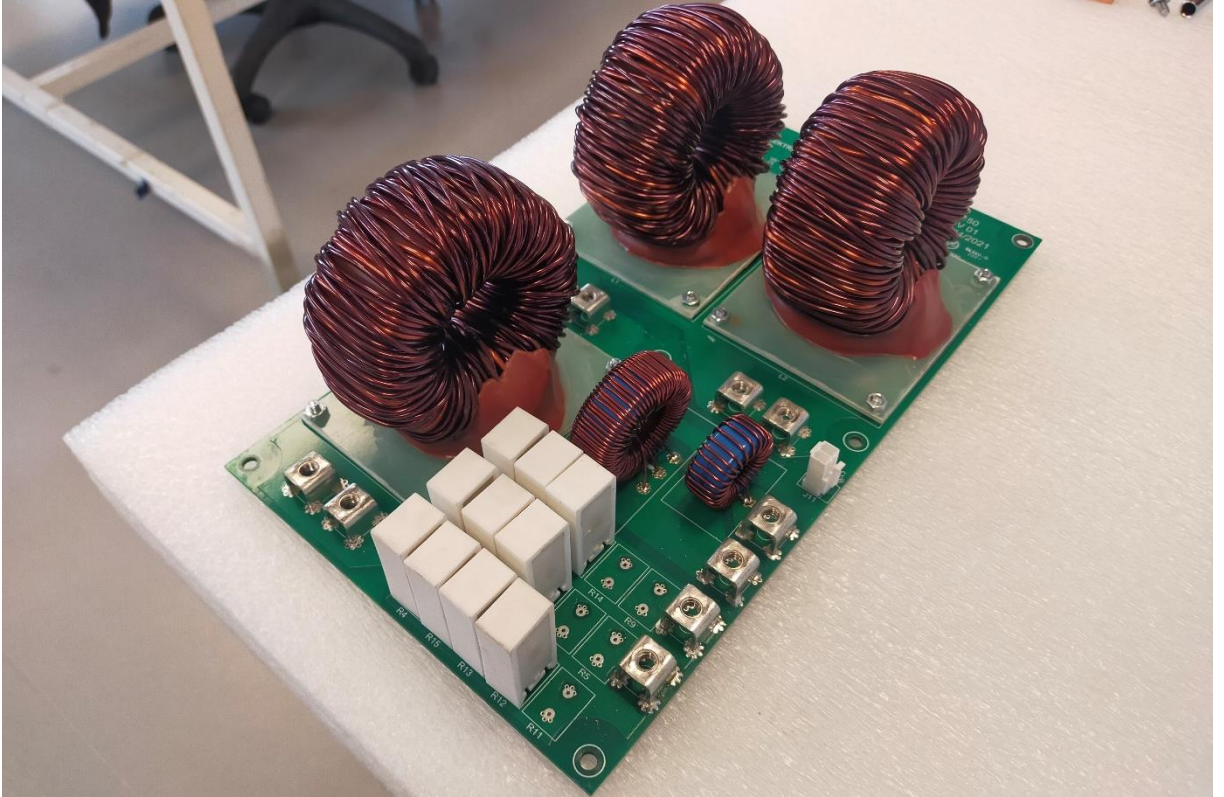


Şekil 3.15: Si-NPC evirici kartı



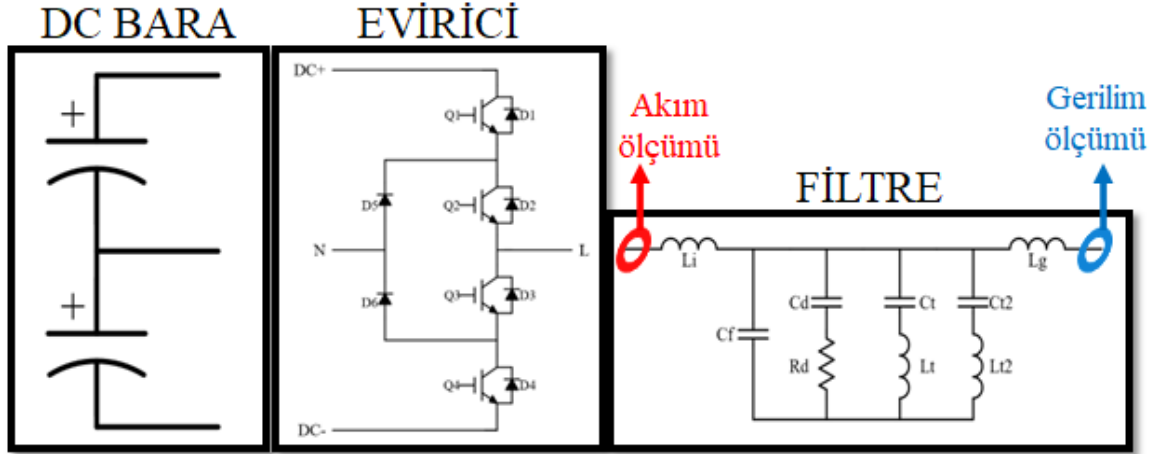
Şekil 3.16: SiC-Hibrit-ANPC evirici kartı

LCL-LC filtre kartının bir fazına ait görseli Şekil 3.17’de verilmiştir. Kart üzerinde LCL-LC filtre yapısına ait endüktanslar ve sönümlleme dirençleri bulunmaktadır.



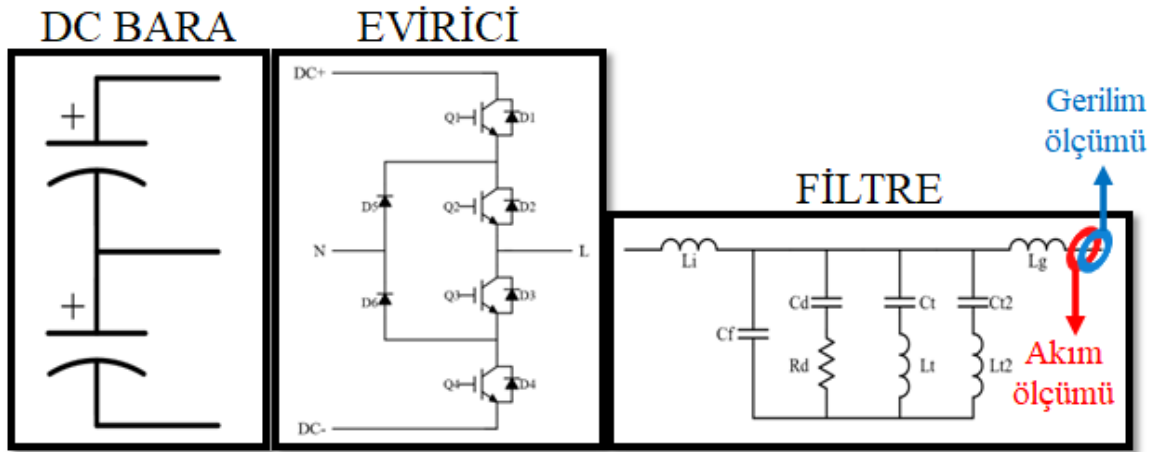
Şekil 3.17: LCL-LC filtre kartı

Evirici kayıplarının ölçüldüğü test düzeneğine ait şema Şekil 3.18’de verilmiştir. Bu düzenekte sadece eviriciye ait kayıplar ölçülmek istendiği için akım ölçüm uçları evirici çıkışına yerleştirilmiştir.



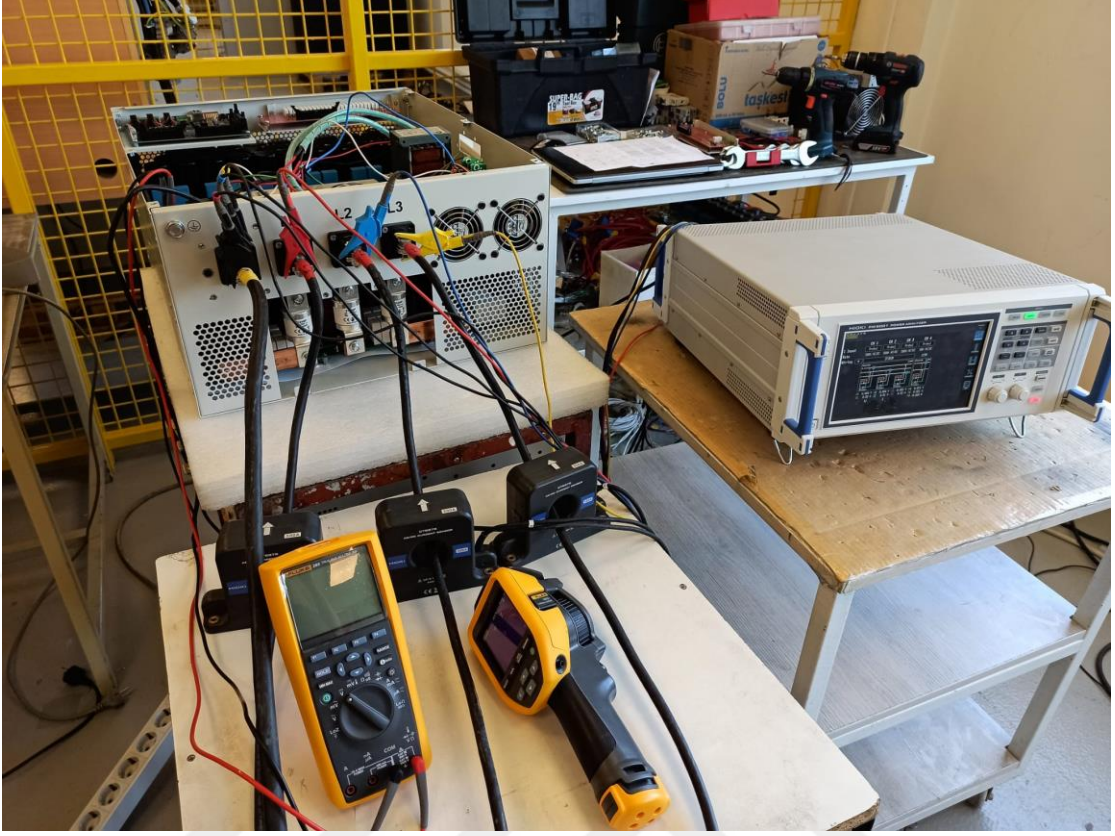
Şekil 3.18: Evirici kayıplarını ölçmek için hazırlanan test düzeneğine ait şema

Sistemin toplam kayıplarını ölçmek için hazırlanan test düzeneğine ait şema ise Şekil 3.19’te verilmiştir.



Şekil 3.19: Sistemin toplam kayıplarını ölçmek için hazırlanan test düzeneğine ait şema

Ölçümlerin gerçekleştirildiği test düzeneğine ait görsel Şekil 3.20’de verilmiştir. Yukarıdaki test şemaları için farklı bağlantılar gerçekleştirilip ölçümler alınmıştır.



Şekil 3.20: Test düzeneği

Test düzeneğinde sıcaklık ölçümlerinin alınması için Şekil 3.21’te gösterilen Fluke marka Ti75+ termal kamera kullanılmıştır. Soğutucu üzerinde bulunan güç modüllerinin yüzey sıcaklıklarını doğru ölçmek için ölçüm alınacak yüzeye termal krem sürülüp bu noktalar termal kamera ile ölçülmüştür. Eviricilerin toplam kayıpları Şekil 3.22’te gösterilen Hioki marka güç analizörü ile ölçülmüştür. Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC eviriciler şebekeye 100kVAr endüktif güç bastığı durumdaki kayıpları ayrı ayrı ölçülmüştür. Aynı zamanda evirici çıkışındaki akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 3.23’te gösterilen Tektronix marka osiloskop ile görüntülenmiştir.



Şekil 3.21: Fluke marka Ti75+ termal kamera



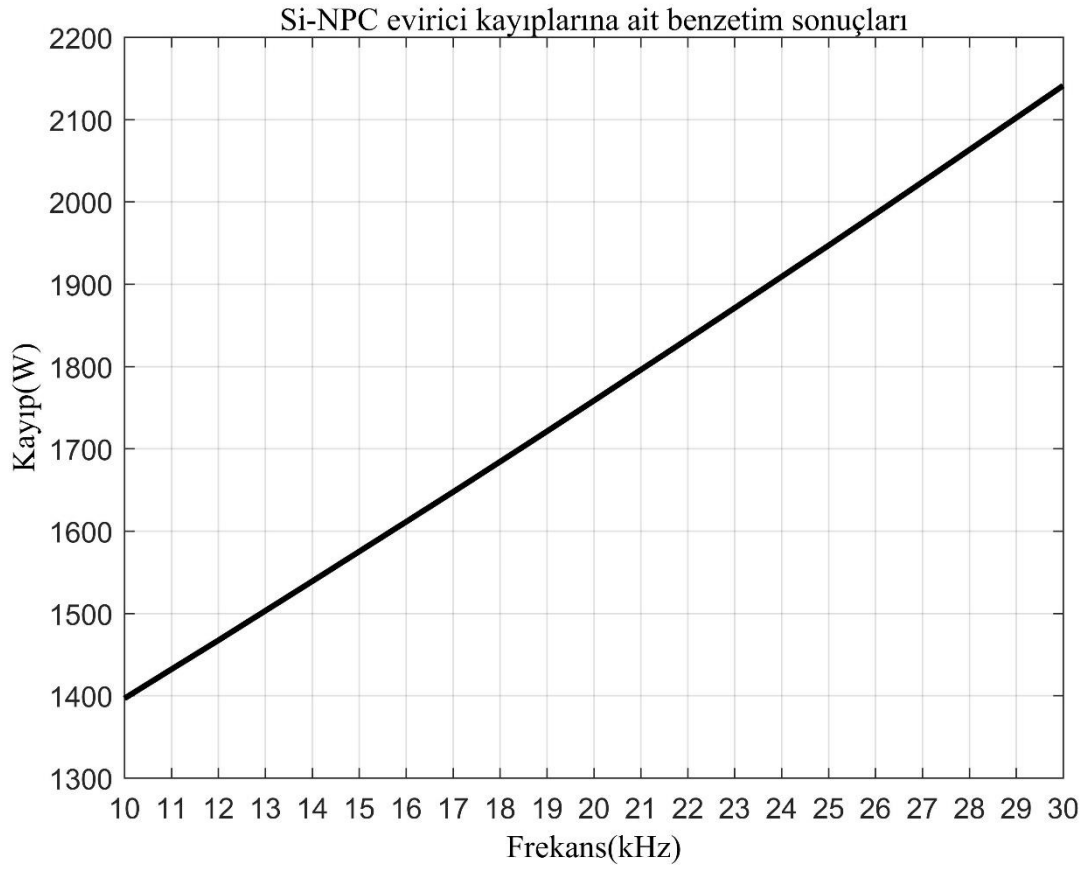
Şekil 3.22: Hioki marka PW6001-04 güç analizörü



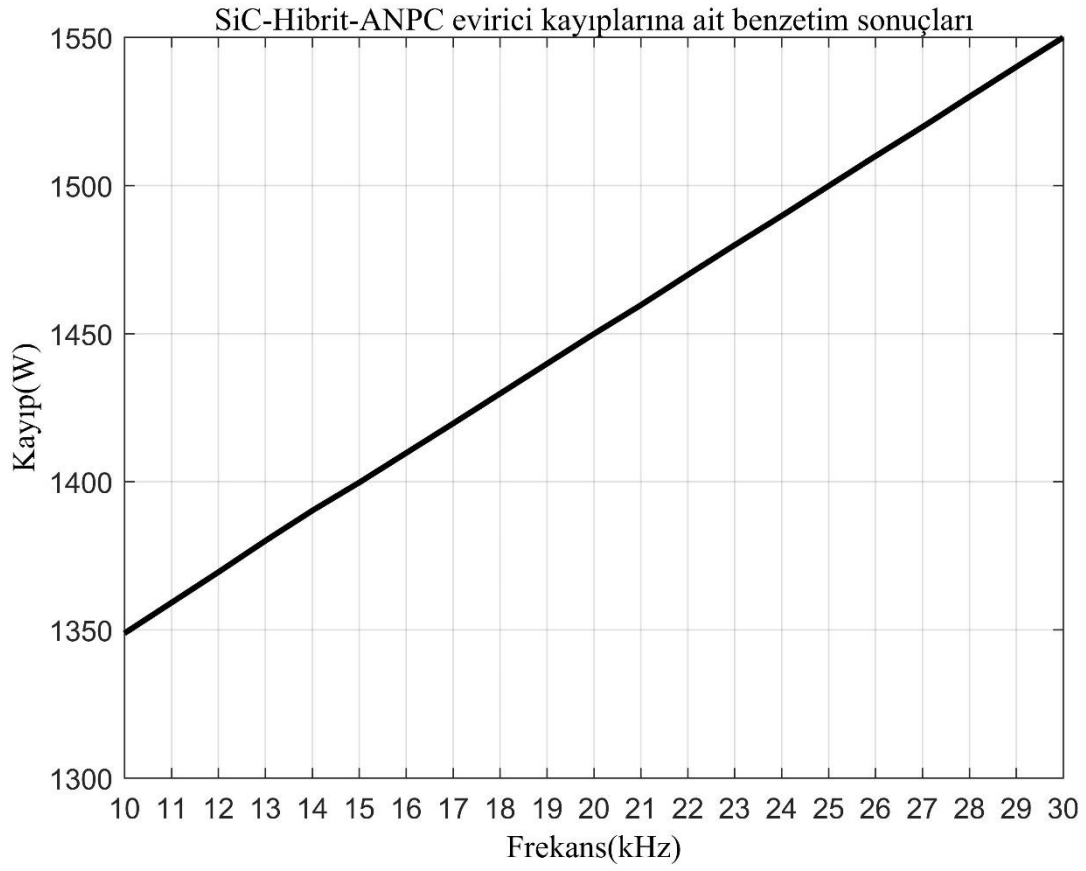
Şekil 3.23: Tektronix marka MSO2024B osiloskop

4. BULGULAR

Tez kapsamında karşılaştırılan Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC evirici yapıları ve LCL filtreye ait anahtarlama frekansına bağlı kayıp hesaplarının sonuçları bu başlık altında verilmiştir. Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC eviricilere ait gerçekleştirilen benzetim sonuçları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



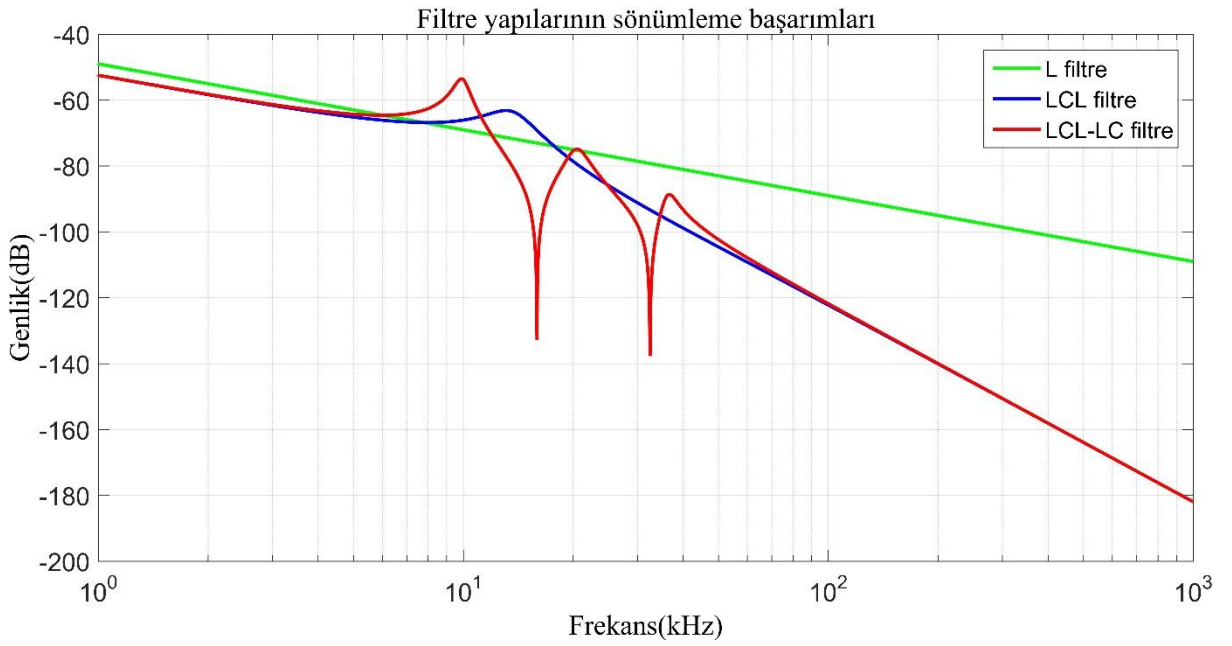
Şekil 4.1: Si-NPC evirici kayıplarına ait benzetim sonuçları



Şekil 4.2: SiC-Hibrit-ANPC evirici kayıplarına ait benzetim sonuçları

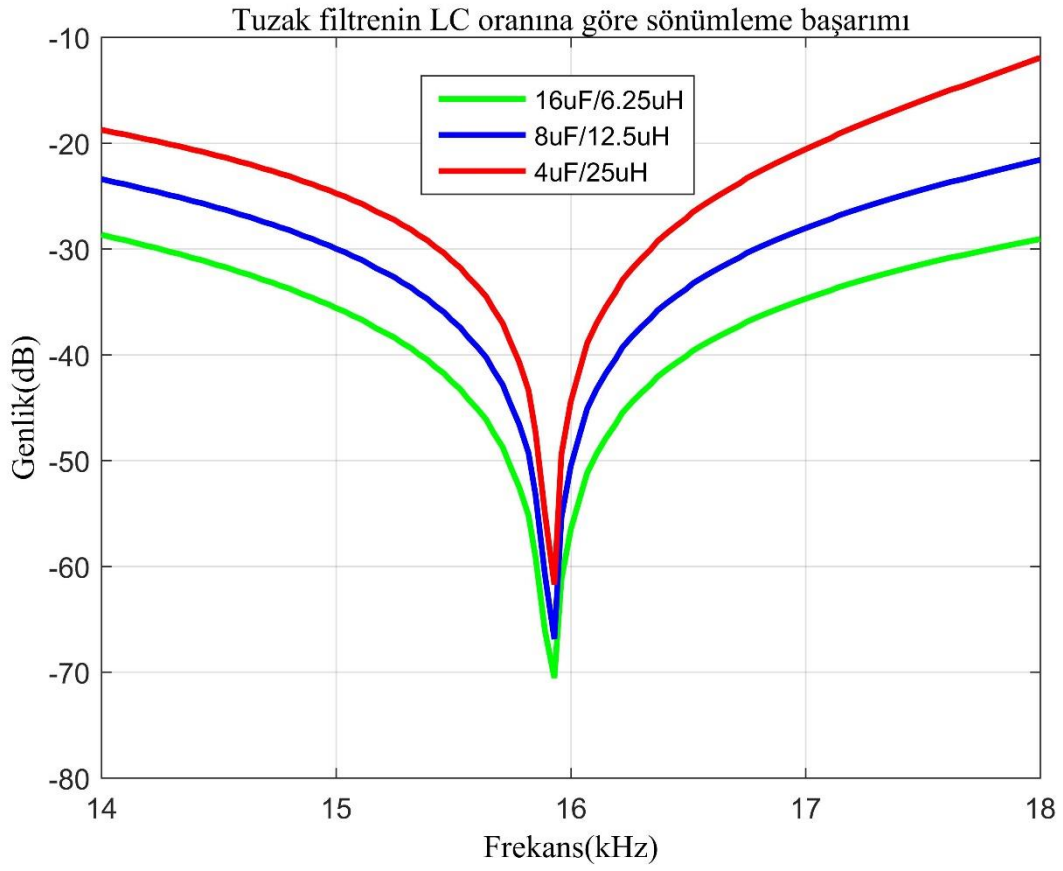
Yapılan benzetimler sonucunda anahtarlama frekansı ile evirici kayıplarının doğru orantılı şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Si-NPC evirici yapısı için 1kHz'lik anahtarlama frekansındaki artış 30W, SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısı için ise 10W'lık kayıp artışına sebep olduğu gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında tasarlanan filtre yapısının L filtre ve LCL filtre yapıları ile gerçekleştirilmesi durumundaki filtreleme başarımlarına ait LTSpice ile gerçekleştirilen benzetime ait grafik Şekil 4.3’de verilmiştir. Grafikten de anlaşılabileceği üzere L filtre diğer yapıların filtreleme başarımlarından daha kötüdür. LCL filtre ile LCL-LC filtrenin en önemli farkı ise anahtarlama frekansına ayarlanan tuzak filtrenin sistemdeki anahtarlama frekansını sönümleme başarımıdır.



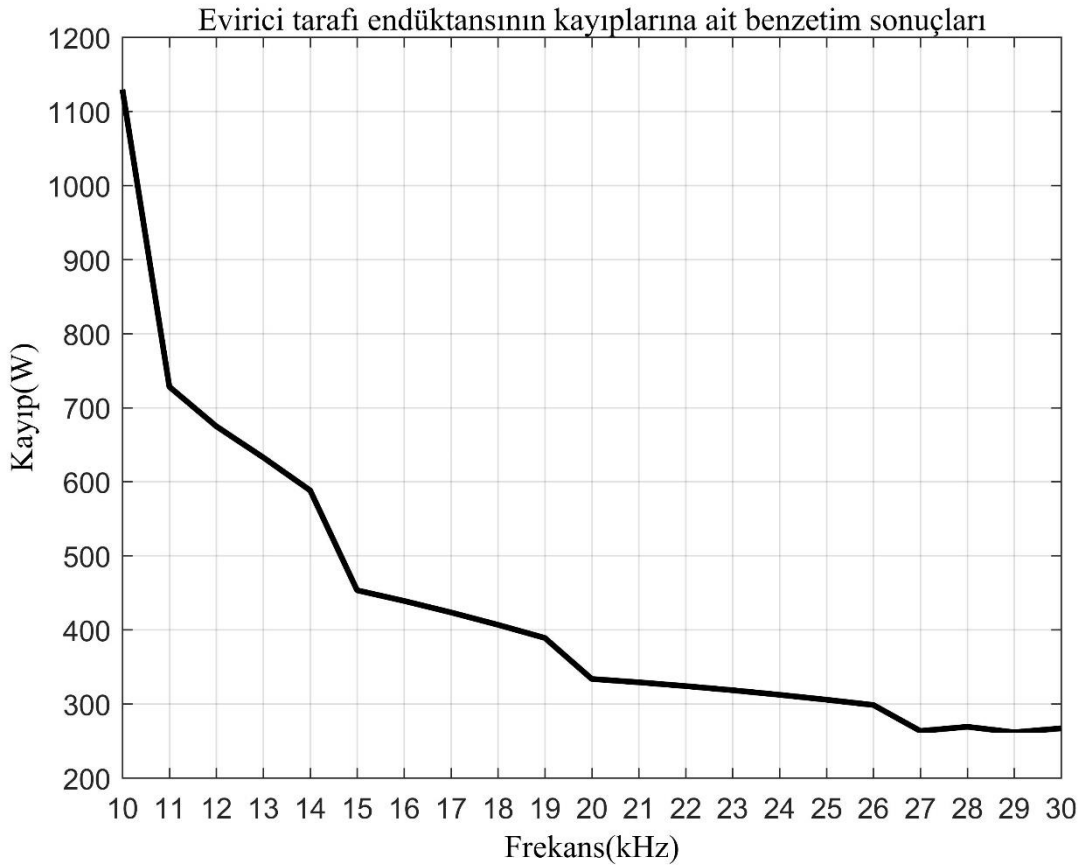
Şekil 4.3: L, LCL ve LCL-LC filtre yapılarının sönümlenme başarımlarına ait grafik

Aynı anahtarlama frekansına ayarlanmış tuzak filtrede endüktans ve kondansatör değerlerinin oranına göre filtreleme başarımı değişmektedir. Kondansatör değeri büyüdüğünde filtrelenen frekans aralığı artmaktadır. Ancak kondansatör değerindeki artış beraberinde çok büyük bir boyut ve maliyet artışı getirdiğinden tercih edilmemektedir. Bu duruma ait LTSpice’da gerçekleştirilen 16kHz’e ayarlanmış bir tuzak filtre için gerçekleştirilen sistem benzetim grafiği Şekil 4.4’de verilmiştir.



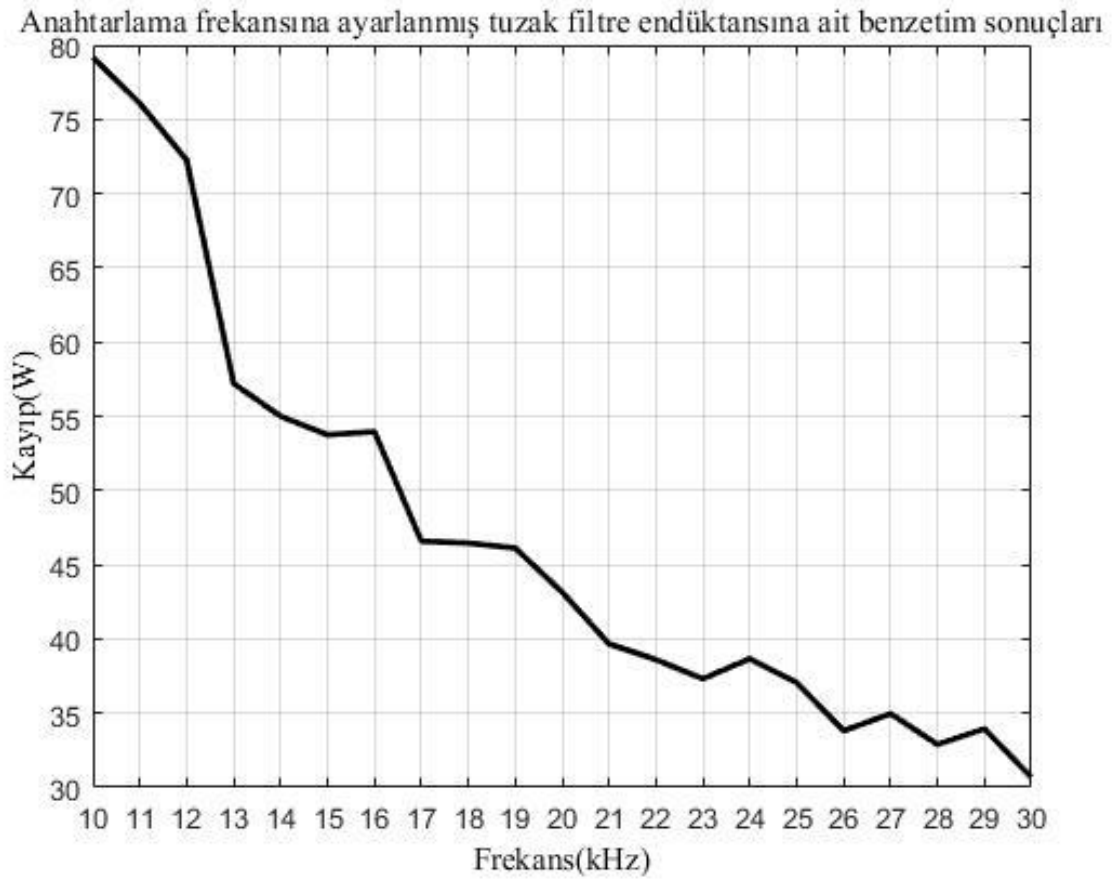
Şekil 4.4: Tuzak filtrenin LC oranına göre sönümleme başarımı grafiği

LCL filtre kaybı olarak evirici tarafı ve tuzak filtre endüktanslarına ait kayıplar hesaplanmıştır. LCL filtre yapısında bulunan kondansatörlerin kayıpları hesaplamalara dahil edilmemiştir. LCL filtrenin evirici tarafı endüktansına ait kayıplar Şekil 4.5'te verilmiştir.

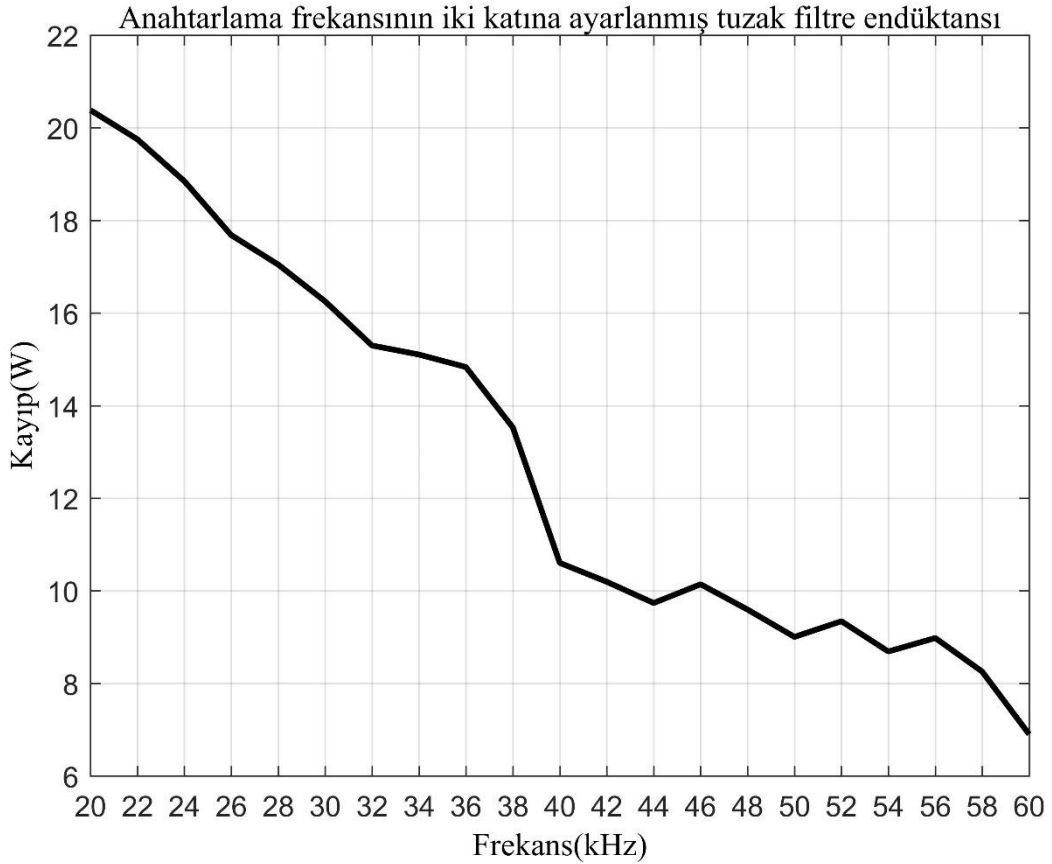


Şekil 4.5: LCL filtrenin evirici tarafı endüktansının kayıplarına ait benzetim sonuçları

Anahtarlama frekansı arttıkça filtre endüktansının değeri düştüğünden, endüktans üzerindeki tur oranı azalacaktır. Bu sayede kullanılan telin uzunluğu kısalmış olacak ve bakır kayıpları azalacaktır. Ancak Şekil 4.5'te de görüleceği üzere 10kHz-17kHz arasındaki kayıp azalması 17kHz sonrasında azalmıştır. Bunun sebebi endüktans değerinin çok düşmüş olması ve tur oranı çok az olduğu için bakır kayıplarının minimize olmuş olmasıdır. Daha yüksek frekanslarda kayıp azaltmak için farklı tür malzeme toroid kullanıp, çekirdek kayıplarını azaltmak olacaktır. Benzer durum tuzak filtre endüktansları için de geçerlidir. Ancak yüksek frekansta verimli çalışan toroidlerin maliyetleri çok yüksek olduğundan tercih edilmemektedir.



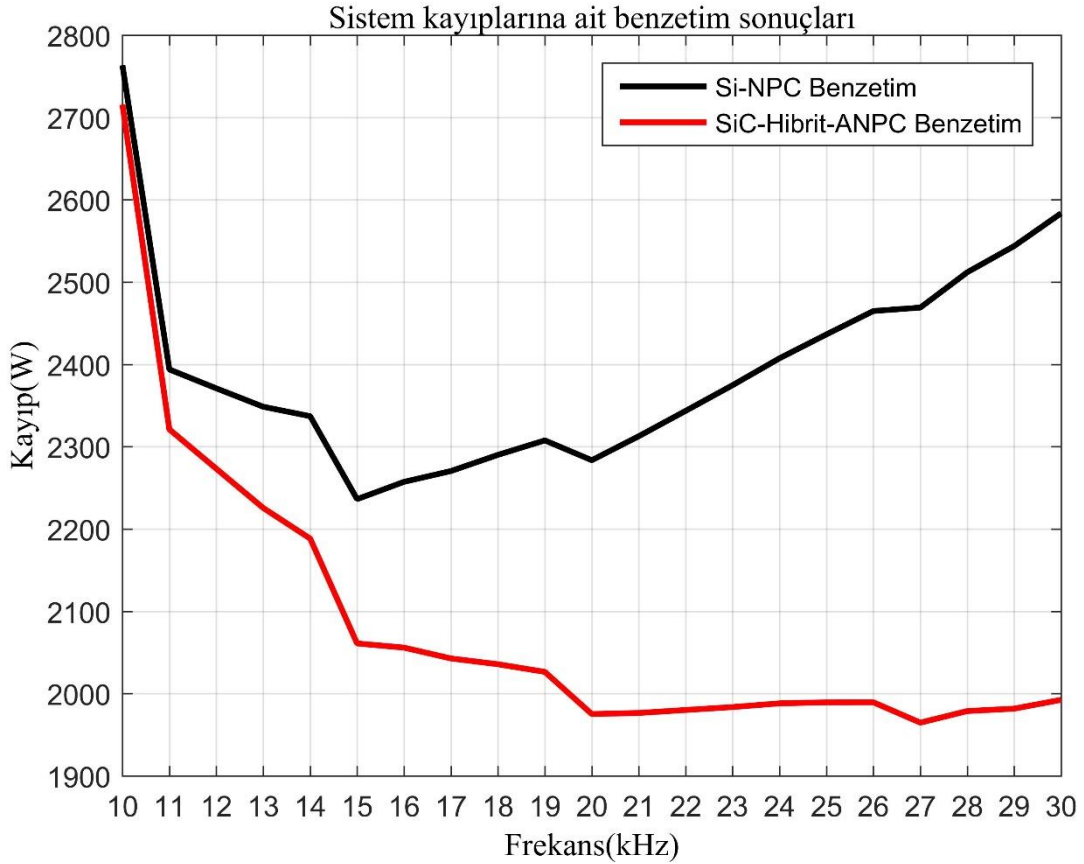
Şekil 4.6: Anahtarlama frekansına ayarlanmış tuzak filtre endüktansına ait benzetim sonuçları



Şekil 4.7: Anahtarlama frekansının iki katına ayarlanmış tuzak filtre endüktansına ait benzetim sonuçları

Anahtarlama frekansına akort edilmiş tuzak filtre endüktansına ait kayıplar Şekil 4.6’te, anahtarlama frekansının iki katına akort edilmiş tuzak filtre endüktansına ait kayıplar ise Şekil 4.7’te verilmiştir. Evirici tarafı endüktansı gibi tuzak filtre endüktanslarında da anahtarlama frekansındaki artış kayıpların azalmasını sağlamıştır. Ancak bazı anahtarlama frekansları için hesaplanan endüktans değerlerini tam tur sayıları ile gerçeklemek mümkün olmadığı için kayıplar daha düşük anahtarlama frekanslarına göre yüksek çıkmıştır.

Evirici ve filtre yapılarının ayrı ayrı hesaplanan kayıplarının toplanıp sistemin anahtarlama frekansına bağlı olarak toplam kaybı hesaplanmıştır. Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC evirici yapılarının LCL filtre ile birlikte oluşturdukları sisteme ait toplam kayıpları içeren grafik Şekil 4.8’da verilmiştir.



Şekil 4.8: Sistem kayıplarına ait benzetim sonuçları

Evirici ve filtre kayıpları toplandığında Si-NPC evirici yapısı için en az kayıpla gerçekleştirilecek sistemin anahtarlama frekansının 15kHz ve 20kHz, SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısı için ise en az kayıpla gerçekleştirilecek sistemin anahtarlama frekansının 20kHz ve 27kHz olduğu görülmektedir. Sistem benzetimlerde kullanılan bütün anahtarlama frekansları için testler gerçekleştirmek maliyet ve zaman açısından zorlayıcı olacağı için testler en verimli gözükken 15-20kHz anahtarlama frekansları için gerçekleştirilmiştir.

Yapılan testler sonucunda elde edilen osiloskop ekran görüntüleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'de verilmiştir. Şekil 4.9'de eviricinin çıkış gerilimi ve şebeke gerilimi görüntülenmektedir. Evirici çıkışındaki gerilim şebeke bağlantı firtresinden geçtikten temiz bir sinüs dalga şekli haline gelmiştir.

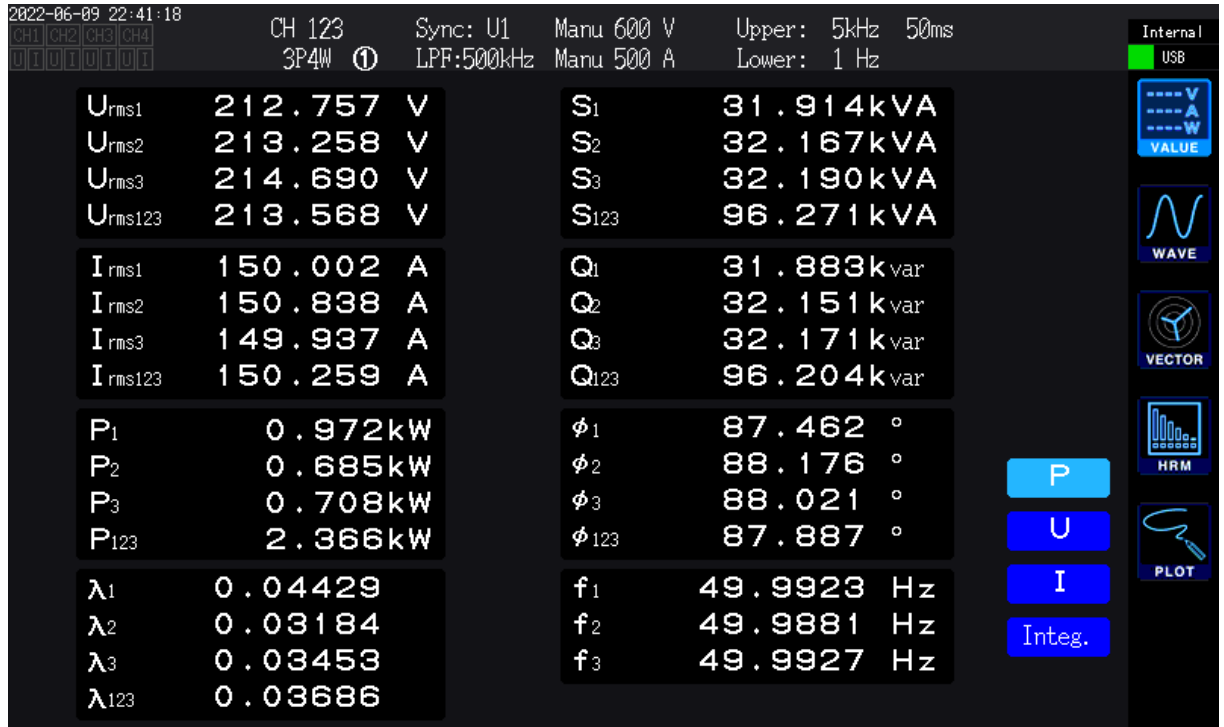


Şekil 4.9: Evirici çıkış ve şebeke gerilimlerine ait dalga şekilleri
(Mavi: Evirici çıkış gerilimi, Sarı: Şebeke gerilimi, Mor: Evirici akımı)

Şekil 4.10'de ise şebekeye 150A endüktif akım basarken alınan ölçümlere ait ekran görüntüleri yer almaktadır.

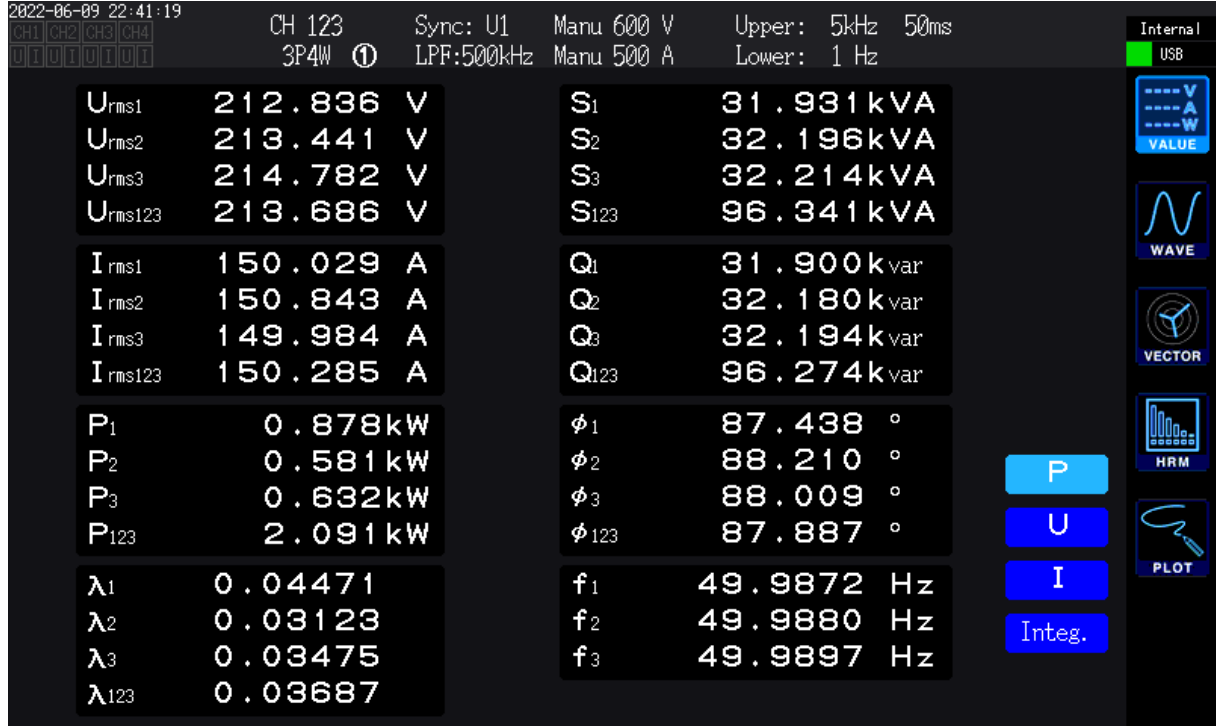


Şekil 4.10: Si-NPC evirici yapısına ait çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri (Mavi: Evirici çıkış gerilimi, Sarı: Şebeke gerilimi, Mor: Evirici akımı)



Şekil 4.11: Si-NPC evirici yapısına ait test sonuçları

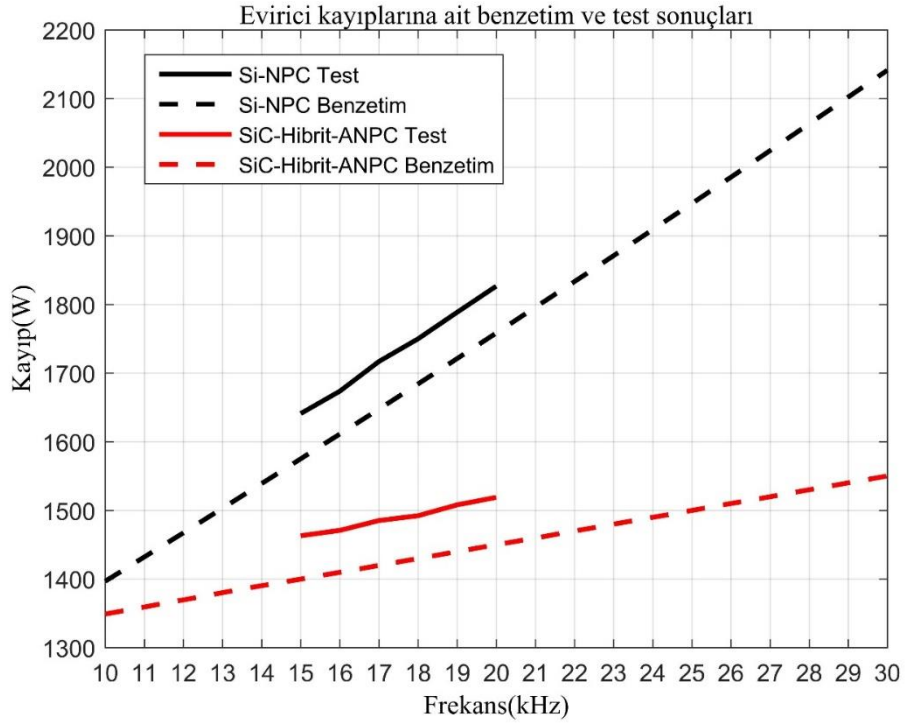
Si-NPC evirici yapısının 15kHz anahtarlama frekansı için 150A çıkış akımı altında yapılan testlere ait güç analizörü ekran görüntüsü Şekil 4.11’de verilmiştir. 96.2kVA’lık bir sistem için toplam kayıp 2366W olarak ölçülmüştür. Bu da yaklaşık olarak %97,5’lik bir verim anlamına gelmektedir.



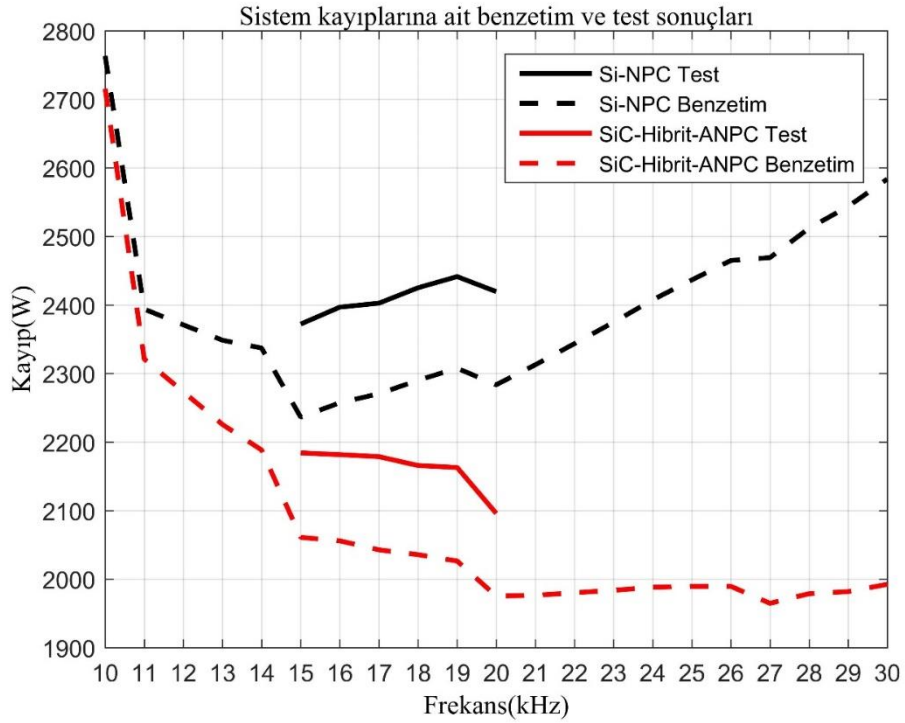
Şekil 4.12: SiC-Hibrit ANPC evirici yapısına ait test sonuçları

SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısının 20kHz anahtarlama frekansı için 150A çıkış akımı altında yapılan testlere ait görüntüsü ise Şekil 4.12’de verilmiştir. SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısının toplam kaybı ise 2091W olarak ölçülmüştür. Yaklaşık 96.3kVA’lık sistem için %97,8’lik verimlilik elde edilmiştir.

Yapılan testler sonucunda Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC evirici yapılarının 15-20kHz anahtarlama frekansı için ölçülen evirici kayıpları Şekil 4.13’de, toplam sistem kayıpları ise Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Evirici kayıplarına ait benzetim ve test sonuçları



Şekil 4.14: Sistem kayıplarına ait benzetim ve test sonuçları

Benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları paralellik göstermektedir. Ancak sistem benzetimi yaparken göz önünde bulundurulmayan ya da benzetim yapılamayacak unsurlar olduğundan testlerde elde edilen kayıp verileri daha yüksek çıkmıştır. Yapılan benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçları arasında %6'lık sapma olduğu gözlemlenmiştir.



5. TARTIŞMA

Tez kapsamında yapılan hesaplamalar ve testler sonucunda elde edilen bulgular bu başlık altında değerlendirilmiştir. Si-NPC evirici yapısının benzetim sonuçlarına göre kaybının anahtarlama frekansına bağlı olarak doğru orantılı şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık olarak anahtarlama frekansındaki her 1kHz'lik artış yaklaşık olarak 30W'lık kayıp artışına sebep olmaktadır. Ancak anahtarlama frekansının artışıyla LCL-LC filtrede kullanılan manyetik malzemelerdeki kayıp iyileştirmeleri sonucunda toplam sistem kayıpları incelendiğinde kaybın en az olduğu anahtarlama frekanslarının 15kHz ve 20kHz olduğu gözlemlenmiştir. SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısı için yapılan benzetim sonuçlarında ise anahtarlama frekansındaki her 1kHz'lik artışın yaklaşık olarak 10W'lık kayıp artışına sebep olmaktadır. SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısının toplam sistem kayıpları incelendiğinde ise kaybın en az olduğu anahtarlama frekansının 20kHz ve 27kHz olduğu gözlemlenmiştir.

Sistem benzetimi sonucunda elde edilen verilerin doğruluğu ve benzetimi gerçekleştirilemeyecek unsurların etkisini görmek amacıyla tasarlanan ürünlerin testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerin farklı anahtarlama frekansları için gerçekleştirilmesi maliyet ve zaman gibi zorlayıcı etkenler sebebiyle sadece 15-20kHz aralığı için gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda Si-NPC evirici yapısı için en verimli anahtarlama frekansının 15kHz olduğu gözlemlenmiştir. 20kHz anahtarlama frekansı Si-NPC yapısı için test edilen diğer bütün frekanslardan daha yüksek kayıplı çıkmıştır. Ancak anahtarlama frekansından dolayı LCL-LC filtrede bulunan endüktansların değeri test edilen diğer anahtarlama frekanslarındaki endüktans değerlerinden daha düşük olduğu için daha az tur ve bunun sonucunda daha düşük bakır maliyetine sahiptir. Aralarındaki kayıp farkı çok yüksek olmadığından ve maliyet göz önüne alındığında Si-NPC yapısı için en iyi seçeneğin 20kHz anahtarlama frekansı olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan testler sonucunda SiC-Hibrit-ANPC yapısı için en verimli anahtarlama frekansının 20kHz olduğu gözlemlenmiştir. Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC yapısının en verimli olduğu anahtarlama frekanslarında aralarında 276W'lık kayıp farkı bulunmaktadır. SiC-Hibrit-ANPC yapısı 100kVA'lık bir sistemde %0.276 daha verimli çalışmaktadır. Yüzdesel olarak çok büyük bir fark gibi gözükme de bu yapıların kullanıldığı ticari ürünler genellikle 10-15 sene çalışma ömrüne sahip oldukları göz

önüne alındığında SiC-Hibrit-ANPC yapısının uzun vadede sağlayacağı avantaj göz ardı edilmemelidir. Ancak getirdiği bu avantajın yanında iki evirici yapısında kullanılan yarı iletkenler arasındaki toplam maliyet farkı yaklaşık 360\$'dır. Bu maliyet farkı ürünün toplam maliyetine oranla yüksek gibi gözükse de aradaki 276W'lık kayıp farkının günlük ortalama 10 saat tam güçte çalışan bir ürün için 2.76kWh'lık enerji tasarrufu sağlayacaktır. Haftada 6 gün çalışan bir tesis için 312 gün çalışması ve yıllık toplam 861kWh enerji tasarrufu anlamına gelmektedir. Ticari tesisler için 1kWh elektriğin fiyatı 0.129\$'dır. Bu durumda SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısı ile gerçekleştirilecek ürünün işletme maliyetindeki sağlayacağı iyileştirme senelik yaklaşık 111\$'dır. SiC-Hibrit-ANPC yapısı ile gerçekleştirilecek ürünün 3 sene sorunsuz bir şekilde çalışması durumunda sonraki her sene için işletme maliyetindeki bu iyileştirme kar olarak geri dönecektir. Bu hesaplamalar şu an için bu seviyelerde olup ilerleyen yıllarda SiC teknolojisinin yaygınlaşması ve maliyetlerin düşmesiyle piyasadaki eski teknoloji Si tabanlı yarı iletken ürünlerin, yeni teknoloji SiC tabanlı yarı iletken ürünler ile rekabet etmesi zorlaşacak ve üretici firmalar SiC tabanlı yarı iletken kullanımını arttıracaklardır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada üç seviyeli şebeke bağlantılı evirici yapılarından Si-NPC ve SiC-Hibrit-ANPC evirici yapıları ve şebeke bağlantı filtrelerinin 100kVA'lık bir sistem için tasarımları ve farklı anahtarlama frekanslarındaki kayıp hesapları ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Anahtarlama frekansındaki artışın evirici yapılarının kayıplarına olan etkisi, şebeke bağlantı filtresinin tasarımına ve kayıplarına olan etkisi 10-30kHz anahtarlama frekansları için incelenmiştir. Evirici yapıları için Si-NPC yapısı için her 1kHz'lik anahtarlama frekans artışı 30W'lık, SiC-Hibrit-ANPC yapısı için ise 10W'lık kayıp artışına sebep olduğu benzetim sonuçları ile ortaya konmuştur. Yapılan benzetimler sonucunda Si-NPC evirici için 15kHz, SiC-Hibrit-ANPC evirici için ise 20kHz kaybın en düşük olduğu anahtarlama frekanslarıdır. Burada SiC yarı iletken teknolojisinin sağlamış olduğu yüksek bant genişliğinin kayıplara etkisi gözlemlenmiştir. Şebeke bağlantı filtresi için anahtarlama frekansındaki artışın, filtrenin boyutlarını ve kayıplarını azalttığı gözlemlenmiştir. 100kVA'lık evirici yapısı için yüksek gerilim ve akım altında çalışabilen baskılı devre kartı tasarımları yapılmıştır. Gerçeklenen evirici yapılarının testleri 15-20kHz anahtarlama frekansları için gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler, benzetim sonuçları ile paralellik göstermiştir ancak yaklaşık %6'lık sapma olmuştur. Bunun sebebi yapı içerisinde bulunan ancak benzetim hesaplarına dahil edilmeyen kayıplardır. Testler ve benzetimler sonucunda Si-NPC evirici yapısının verimi %97,5, SiC-Hibrit-ANPC evirici yapısının ise %97,8 olarak ölçülmüştür. İki yapının da en verimli oldukları frekanslar için SiC-Hibrit-ANPC yapısının 276W daha az kayba sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu kayıp farkının ortaya çıkardığı yıllık enerji maliyeti yaklaşık 111\$'dır. İki yapının maliyet farkı göz önüne alındığında 3 sene gibi bir sürede SiC-Hibrit-ANPC yapısının avantajlı duruma gelmesi beklenmektedir.

SiC teknolojisinin yaygınlaşması ve maliyetlerin düşmesi ile nispeten eski teknoloji olan Si yarı iletkenler yerine SiC yarı iletkenine sahip ürünler kullanılabilir. Bu sayede yüksek anahtarlama frekansına sahip ürünler geliştirilebilir. Yüksek anahtarlama frekansı manyetik malzemelerin boyutlarının küçültülmesini sağladığından güç yoğunluğu yüksek ve daha verimli ürünler ortaya çıkarılabilir. Anahtarlama frekansının yükselmesi aynı zamanda kontrol ve hesaplama süresinin kısılması anlamına gelmektedir. Bu da işlemci tarafında daha yüksek

teknoloji ürünler kullanmayı gerektirmektedir. Bu durum da maliyet artışına sebep olmaktadır. Ancak klasik kontrolör yapıları olan DSP yerine FPGA yapıları burada devreye girmektedir. DSP'ler işlemleri sıralı yaparken FPGA'ler ise işlemleri paralel olarak yapabilmektedirler. Bu sayede kontrol işlemlerini daha kısa sürede tamamlayabilmektedirler. Kontrol yapısının hızının yanında evirici tabanlı ticari ürünler için haberleşme hızı da işlem süresinin bir kısmını içermektedir. Anahtarlama frekansının yükselmesi aynı zamanda haberleşme hızının da yükselmesi gereksinimini doğurmaktadır. Bu sebeple klasik evirici tabanlı ürünlerde RS485, RS232 ve CAN haberleşme protokolleri kullanılırken anahtarlama frekansının yükseldiği ürünlerde daha yüksek haberleşme hızlarına çıkabilen Ethernet haberleşme protokolü kullanılabilir.



7. KAYNAKLAR

- [1] H. S. J. C. Kwanghee Lee, «Comparative Analysis of Power Losses for 3-Level NPC and T-type Inverter Modules,» %1 içinde *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Osaka, 2015.
- [2] Q. C. G. L. C. Z. G. F. Long Cheng, «Electro-Thermal Loss Analysis of The 3L-ANPC Converter,» %1 içinde *IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 2014.
- [3] T. Bruckner, «The active NPC converter for medium-voltage applications,» %1 içinde *Industry Applications Conference*, 2005.
- [4] X. L. C. L. F. W. Y. G. G. C. a. D. X. Li Zhang, «Evaluation of Different Si/SiC Hybrid Three-Level Active NPC Inverters for High Power Density,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, cilt 35, no. 8, pp. 8224-8236, 2020.
- [5] Y. L. Y. L. K. J. T. J. P. a. R. S. S. Yin, «Comparison of SiC voltage source inverters using synchronous rectification and freewheeling diode,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 65, no. 2, pp. 1051-1061, 2018.
- [6] M. S. S. W. a. J. W. K. J. Biela, «SiC versus Si evaluation of potentials for performance improvement of inverter and dc-dc systems by SiC power semiconductors,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 58, no. 7, pp. 2872-2882, 2011.
- [7] R. K. S. P. D. a. S. K. P. K. Ali, «A SiC MOSFET based nine-switch single-stage three-phase ac-dc isolated converter,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 64, no. 11, pp. 9083-9093, 2017.
- [8] A. R. M. R. R. a. D. G. L. A. Vazquez, «Different modular techniques applied in a synchronous boost converter with SiC MOSFETs to obtain high efficiency at light load and low current ripple,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 64, no. 10, pp. 8373-8382, 2017.
- [9] L. W. R. X. Y. S. a. H. L. Y. Shi, «A 60-kw 3-kW/kg five-level T-type SiC PV inverter with 99.2% peak efficiency,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 64, no. 11, pp. 9144-9154, 2017.
- [10] R. X. L. W. Y. S. a. H. L. Y. Shi, «Switching characterization and short-circuit protection of 1200V SiC MOSFET T-type module in PV inverter application,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 64, no. 11, pp. 9135-9143, 2017.
- [11] Y. S. Y. S. R. X. a. H. L. L. Wang, «Ground leakage current analysis and suppression in a 60-kw 5-level T-type transformerless SiC PV inverter,» *IEEE Trans. Power Electron.*, cilt 33, no. 2, pp. 1271-1283, 2018.

- [12] X. Z. R. B. D. B. A. M. W. a. M. K. Q. Wang, «Design and implementation of a two-channel interleaved Vienna-type rectifier with >99% efficiency,» *IEEE Trans. Power Electron.*, cilt 33, no. 1, pp. 226-239, 2018.
- [13] k. T. R. S. Y. L. a. J. P. S. Yin, «A 50-kW high frequency and high-efficiency SiC voltage source inverter for more electric aircraft,» *IEEE Trans., Ind. Electron.*, cilt 64, no. 11, pp. 9124-9134, 2017.
- [14] Q. Guan, «An extremely high efficient three-level active neutral point-clamped converter comprising SiC and Si hybrid power stage,» *IEEE Trans. Power Electron.*, cilt 33, no. 10, pp. 8341-9352, 2018.
- [15] Fei Li, Xing Zhang, Hong Zhu, Haoyuan Li and Changzhou Yu “An LCL-LC Filter for Grid-Connected Converter: Topology, Parameter, and Analysis” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 9, Sep. 2015.
- [16] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519-1992..
- [17] IEEE Application Guide for IEEE Std. 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE 1547.2-2008..
- [18] Qian Liu, Li Peng, Yong Kang, Shiyang Tang, Deliang Wu, and Yu Qi “A Novel Design and Optimization Method of an LCL Filter for a Shunt Active Power Filter” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol 61, no. 8, Aug. 2014.
- [19] Y. I. Mohamed, “Mitigation of dynamic, unbalanced, and harmonic voltage disturbances using grid-connected inverters with filter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 3914–3924, Sep. 2011..
- [20] J. He and Y. W. Li, “Hybrid voltage and current control approach for DGgrid interfacing converters with LCL filters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 5, pp. 1797–1809, May 2013..
- [21] W. Li, X. Ruan, D. Pan, and X. Wang, “Full-feedforward schemes of grid voltages for a three-phase LCL-type grid-connected inverter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 6, pp. 2237–2250, Jun. 2013..
- [22] J. R. Massing, M. Stefanello, H. A. Grundling, and H. Pinheiro, “Adaptive current control for grid-connected converters with LCL filter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4681–4693, Dec. 2012..
- [23] Wenqiang Zhao and Guozhu Chen, “Comparison of Active and Passive Damping Methods for Application in High Power Active Power Filter with LCL-filter”.
- [24] M. Y. Park, M. H. Chi, J. H. Park, H. G. Kim, T.W. Chun, and E. C. Nho, “LCL-filter design for grid-connected PCS using total harmonic distortion and ripple attenuation factor,” in *Proc. Int. Power Electron. Conf.*, 2010, pp. 1688–1694..

- [25] Y. Patel, D. Pixler, and A. Nasiri, “Analysis and design of TRAP and LCL filters for active switching converters,” in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron., 2010, pp. 638–643..
- [26] W. M. Wu, Y. B. He, and F. Blaabjerg, “An LLCL power filter for singlephase grid-tied inverter,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 27, no. 2, pp. 782–789, Feb. 2012..
- [27] M. Z. Lowenstein and J. F. Hibbard, “Modeling and application of passive harmonic trap filters for harmonic reduction and power factor improvement,” in Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting Conf. Rec., 1993, pp. 1570–1578..
- [28] Z. Xing, Z. Hong, L. Fei, L. Fang, L. Chun, and L. Benxuan, “An LCL-LC power filter for grid-tied inverter,” in Proc. TENCON IEEE Region 10 Conf. (31194), 2013, pp. 1–4..
- [29] <https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/180482/design-support/design-tools/alcap-useful-life-calculation-tool>. [Çevrimiçi].
- [30] <https://semisel.semikron.com/>. [Çevrimiçi]. Available: <https://semisel.semikron.com/>.
- [31] <https://iposim.infineon.com/>. [Çevrimiçi]. Available: <https://iposim.infineon.com/>.
- [32] SEMIKRON, «3L NPC TNPC Topology (AN-11001 / 2015-10-12 -Rev-05)».

ETİK KURUL İZİN YAZISI

Uyarı: Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

- ☐ Etik Kurul izni gerekmektedir.
- ☒ Etik Kurul izni gerekmemektedir.

Ömer Faruk KOZARVA
(İmza)



KURUM İZNİ YAZILARI

Uyarı: Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

- ☐ Kurum izni gerekmektedir.
- ☒ Kurum izni gerekmemektedir.

Ömer Faruk KOZARVA
(İmza)

