



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN ŞEBEKE BAĞLANTILI
YÜKSEK VERİMLİ EVİRİCİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE AVCI

EYLÜL 2015

DÜZCE

KABUL VE ONAY BELGESİ

Emre AVCI tarafından hazırlanan Yenilenebilir Enerji Sistemleri İçin Şebeke Bağlantılı Yüksek Verimli Evirici Tasarımı isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 07/09/2015 tarih ve 2015/705 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye
(Tez Danışmanı)
Yrd. Doç. Dr. Mehmet UÇAR
Düzce Üniversitesi

Üye
Doç. Dr. Murat KALE
Düzce Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Murat KARABACAK
Sakarya Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 10/09/2015

ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Emre AVCI'nı Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar 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 beyan ederim.

10 Eylül 2015

(İmza)

Emre AVCI

Sevgili Aileme,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet UÇAR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar için Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Güç Elektroniği ve Güç Kalitesi Araştırma Laboratuvarı altyapısının kullanılmasına olanak sağlayan sayın Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR'e ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Ahmet AKTAŞ'a teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve mesai arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2015.06.03.321 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

10 Eylül 2015

Emre AVCI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|------|
| TEŞEKKÜR SAYFASI | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| ŞEKİL LİSTESİ | iv |
| ÇİZELGE LİSTESİ | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ | viii |
| ÖZET | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| EXTENDED ABSTRACT | 3 |
| 1. GİRİŞ | 5 |
| 2. ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLER | 7 |
| 2.1. H-KÖPRÜ TOPOLOJİSİNDEN TÜREYEN EVİRİCİLER | 8 |
| 2.1.1. Temel Tam Köprü Evirici | 8 |
| 2.1.2. H5 Tipi Evirici | 12 |
| 2.1.3. Heric Tipi Evirici | 13 |
| 2.2. NPC TOPOLOJİSİNDEN TÜREYEN EVİRİCİLER | 15 |
| 2.2.1. 2 seviyeli ve 3 seviyeli Eviricilerin Kıyaslanması | 15 |
| 2.2.2. T-NPC ve NPC Eviriciler | 17 |
| 2.2.3. AT-NPC Tipi Eviriciler | 25 |
| 3. ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİ DENETİMİ | 29 |
| 3.1. GENEL KONTROL ŞEMASI | 29 |
| 3.2. PLL YAPISI | 31 |
| 3.3. SENKRON REFERANS ÇERÇEVE YÖNTEMİ | 33 |
| 3.4. BENZETİM ÇALIŞMALARI | 35 |

| | |
|--|-----------|
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR | 39 |
| 4.1. DENEYSEL KURULUM | 39 |
| 4.1.1. DSPACE Tabanlı Kontrolcü | 40 |
| 4.1.2. Yarı İletken Anahtarlar | 41 |
| 4.1.3. IGBT Sürücü Kartları | 42 |
| 4.1.4. Akım ve Gerilim Sensörleri | 44 |
| 4.2. Deneysel Sonuçlar | 45 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 56 |
| 6. KAYNAKLAR | 57 |
| ÖZGEÇMİŞ | 62 |

ŞEKİL LİSTESİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| Şekil 2.1. Çeşitli yarı iletkenlerin kullanım alanlarına göre sınıflandırılması | 8 |
| Şekil 2.2. Bipolar modülasyonda tam köprü evirici | 9 |
| Şekil 2.3. Bipolar modülasyonda anahtarlama durumları | 9 |
| Şekil 2.4. Unipolar modülasyonda anahtarlama durumları | 10 |
| Şekil 2.5. Unipolar modülasyonda tam köprü evirici | 11 |
| Şekil 2.6. H5 tipi evirici | 12 |
| Şekil 2.7. H5 tipi evirici çıkış akım durumları | 13 |
| Şekil 2.8. Heric tipi evirici | 14 |
| Şekil 2.9. Heric tipi evirici çıkış akım durumları | 14 |
| Şekil 2.10. 3L NPC tipi evirici | 16 |
| Şekil 2.11. 2L evirici çıkış akım ve gerilimi | 16 |
| Şekil 2.12. 3L evirici çıkış akım ve gerilimi | 17 |
| Şekil 2.13. T-NPC evirici | 17 |
| Şekil 2.14. T-NPC eviricinin ortak emiter ve ortak kollektör bağlantısı | 18 |
| Şekil 2.15. Evirici için endüktif bir yükte çalışma bölgeleri | 20 |
| Şekil 2.16. NPC evirici için birinci bölge çalışma durumu | 20 |
| Şekil 2.17. NPC evirici için ikinci bölge çalışma durumu | 21 |
| Şekil 2.18. NPC evirici için üçüncü bölge çalışma durumu | 22 |
| Şekil 2.19. NPC evirici için dördüncü bölge çalışma durumu | 22 |
| Şekil 2.20. T-NPC evirici için birinci bölge çalışma durumu | 23 |
| Şekil 2.21. T-NPC evirici için ikinci bölge çalışma durumu | 24 |
| Şekil 2.22. T-NPC evirici için üçüncü bölge çalışma durumu | 24 |
| Şekil 2.23. T-NPC evirici için dördüncü bölge çalışma durumu | 25 |
| Şekil 2.24. Klasik çift yönlü anahtar ve RB-IGBT | 26 |
| Şekil 2.25. 3-fazlı 3L AT-NPC evirici yapısı | 26 |
| Şekil 2.26. RB-IGBT sızıntı akım değişimi | 27 |
| Şekil 2.27. AT-NPC eviricinin anahtarlanma kayıplarının kıyası | 28 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 2.28. | AT-NPC eviricinin anahtarlama kayıplarının frekans ile değişimi | 28 |
| Şekil 3.1. | 3 seviyeli eviricide modülasyon tekniği, çıkış gerilim değişimi, pozitif ve negatif gerilim anahtarların anahtarlama sinyalleri | 30 |
| Şekil 3.2 | 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin kontrol blok diyagramı | 31 |
| Şekil 3.3. | PLL temel yapısı | 32 |
| Şekil 3.4. | SRÇ yönteminin vektörel gösterimi | 35 |
| Şekil 3.5. | SRÇ tabanlı PI kontrolcü ile akım denetiminin blok diyagramı | 36 |
| Şekil 3.6. | 3-fazlı şebeke gerilimleri | 35 |
| Şekil 3.7. | 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin fazlar arası çıkış gerilimi | 36 |
| Şekil 3.8. | 3-faz yük akımları | 36 |
| Şekil 3.9. | 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin akımları | 37 |
| Şekil 3.10. | Evirici akımlarının harmonik analizi | 37 |
| Şekil 3.11. | PLL çıkış sin_cos ve wt parametre değişimleri | 38 |
| Şekil 3.12. | Üretilen referans sinüs sinyalleri | 38 |
| Şekil 4.1. | Uygulama sisteminin genel blok diyagramı | 40 |
| Şekil 4.2. | DSPACE bağlantı blok diyagramı | 41 |
| Şekil 4.3. | IGBT modülü ve eşdeğer devresi | 41 |
| Şekil 4.4. | Klasik ve RB- IGBT'lerin gerilim dayanım grafiği | 42 |
| Şekil 4.5. | Sürücü ve ara yüz kartı | 43 |
| Şekil 4.6. | Sürücü yarım köprü çalışma modu sinyalleri | 44 |
| Şekil 4.7. | Akım sensörü bağlantı şeması | 44 |
| Şekil 4.8. | Gerilim sensörü bağlantı şeması | 45 |
| Şekil 4.9. | 3-fazlı şebeke bağlantılı AT-NPC tipi 3-seviyeli evirici güç katı fotoğrafı | 46 |
| Şekil 4.10. | Evirici çıkışı faz-faz ve faz nötr gerilimi | 47 |
| Şekil 4.11. | 3-faz fazlar arası evirici çıkış gerilimi | 47 |
| Şekil 4.12. | ControlDesk arayüzü | 48 |
| Şekil 4.13. | Şebeke gerilimi ve evirici akımı | 49 |
| Şekil 4.14. | 3-faz şebeke gerilimleri | 49 |
| Şekil 4.15. | Şebeke gerilim harmonikleri | 50 |
| Şekil 4.16. | 3-faz evirici çıkışı akımları | 50 |
| Şekil 4.17. | Evirici çıkışı 3-faz akım harmonik değerleri | 51 |
| Şekil 4.18. | Eviriciden çıkan akım ve dağılımları | 51 |
| Şekil 4.19. | Programlanabilir DA güç kaynağının ekran görüntüsü | 52 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 4.20. | Yükün 3-faz akım, gerilim ve güç değerleri | 52 |
| Şekil 4.21. | Evirici 3-faz akım, gerilim ve güç değerleri | 53 |
| Şekil 4.22. | Şebeke 3-faz akım, gerilim ve değerleri | 53 |
| Şekil 4.23. | T3 anahtarının iletim ve kesim durumundaki akım ve gerilimleri | 54 |
| Şekil 4.24. | T1 anahtarının iletim ve kesim durumundaki akım ve gerilimleri | 54 |

ÇİZELGE LİSTESİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| Çizelge 2.1. NPC eviricinin tüm anahtarlama durumları | 19 |
| Çizelge 2.2. T-NPC eviricinin tüm anahtarlama durumları | 19 |
| Çizelge 2.3. NPC ve AT-NPC eviricilerinin anahtarlama durumları | 27 |
| Çizelge 4.1. 3 fazlı şebeke bağlantılı evirici uygulamasına ait bazı parametreler | 48 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|----------|--|
| AA | Alternatif Akım |
| AGF | Alçak Geçiren Filtre |
| AT-NPC | Gelişmiş T-NPC (Advanced T-type NPC) |
| ÇSE | Çok Seviyeli Eviriciler |
| DA | Doğru Akım |
| DGM | Darbe Genişlik Modülasyonu |
| FC | Uçan kapasitör (Flying Capacitor) |
| FS | Faz Saptayıcısı |
| GKE | Gerilim Kaynaklı Evirici |
| GKO | Gerilim Kontrollü Osilatör |
| GTO | Kapıdan Söndürmeli Tristör (Gate Turn-off Trisistor) |
| MOSFET | Metal Oksit Yarı İletkenli Alan Etkili Transistör |
| NPC | Nötr noktası kenetli (Neutral Point Clamped) |
| PLL | Faz kilitlemeli döngü (Phase Locked Loop) |
| PCC | Ortak bağlantı noktası (Point of Common Coupling) |
| RB-IGBT | Ters dayanımlı kapıdan izoleli bipolar transistör (Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor) |
| SDGM | Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu |
| SGD | Serbest Geçiş Diyodu (Free Wheeling Diode) |
| SGT | Sıfır Geçiş Tespiti |
| SRÇ | Senkron Referans Çerçeve |
| THB | Toplam Harmonik Bozulumu |
| Ω | Ohm |
| w | Açısal Hız |
| V | Volt |
| A | Amper |
| W | Wat |

ÖZET

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN ŞEBEKE BAĞLANTILI YÜKSEK VERİMLİ EVİRİCİ TASARIMI

Emre AVCI

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet UÇAR

Eylül 2015, 74 sayfa

Günümüzde nüfusun artması ve sanayinin gelişmesiyle birlikte enerji tüketimi artmakta ve buna bağlı olarak çevreye zararlı olan fosil yakıtların rezervleri azalmaktadır. Bu nedenle rüzgar enerjisi ve fotovoltaik enerji gibi yenilenebilir, temiz enerji kaynaklı sistemlere olan ilgi giderek artmaktadır. Bu tür sistemlerde yenilenebilir enerji kaynağından alınan DA enerjinin AA'ya çevrilmesinde eviriciler kullanılır. Kullanılan eviriciler çeşitli yapılarda olup şebeke bağlantılı eviriciler, akü gibi enerji depolama elemanlarının yüksek maliyetleri nedeniyle daha sık tercih edilirler. Günümüze kadar olan çalışmalarda evirici verimleri giderek artmakta ve eviricilerdeki verim ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılacak, şebeke bağlantılı ve yüksek verimli bir eviricinin gerçekleştirilmesi hedeflenerek, bu tip sistemlerin gelişmesine ve yaygınlaşmasına katkıda bulunmak amaçlanmıştır. Bu doğrultuda çeşitli evirici topolojileri incelenerek günümüzde popüler olan AT-NPC tipi eviricinin şebeke bağlantılı tasarımı yapılmış, ardından bu tasarım deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmadan alınan sonuçlarda eviricinin anahtarlama kayıplarının düşük olmasıyla yüksek verimlerde ve şebeke bağlantılı olarak çalıştığı görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: AT-NPC, RB-IGBT, Şebeke bağlantılı evirici, T-NPC

ABSTRACT

DESING OF HIGHLY EFFICENT GRID-CONNECTED INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Emre AVCI

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and

Electronics Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet UÇAR

September 2015, 74 pages

Nowadays, with population growing and industry development, energy consumption is increasing and consequently, limited fossil fuel reserves which have serious and environmental concerns are depleted. Because of these reasons, the interest for clean and renewable energy sources, such as wind and photovoltaic, is growing. To utilize these energies, inverters are used to convert DC form to AC form. Inverters are used in variety of structures, but grid-connected inverters are often preferred because of the cost of energy storage such as batteries. While the studies on inverters have increased recently, the efficiency of inverters has become matter of interest and been increased. In this study, implementation of grid-connected, highly efficient inverter for renewable energy systems are aimed. With these objectives, it is intended to contribute the development and expansion of renewable energy systems. In light of these objectives, variety of inverter topologies is examined and the popular type AT-NPC for grid-connected operation is designed and experimentally performed. The experimental results show that switching losses is low so, the inverter works with high efficiency and is synchronized with the grid correctly.

Keywords: AT-NPC, RB-IGBT, Grid-connected inverter, T-NPC

EXTENDED ABSTRACT

DESING OF HIGHLY EFFICIENT GRID-CONNECTED INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

Emre AVCI

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and

Electronics Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet UÇAR

September 2015, 74 pages

1. INTRODUCTION:

Nowadays, with population growing and industry development, energy consumption is increasing and consequently, limited fossil fuel reserves which have serious and environmental concerns are depleted. Because of these reasons, the interest for clean and renewable energy sources, such as wind and photovoltaic, is growing. To utilize these energies, inverters are used to convert from DC form to AC form. Inverters are used in variety of structures, but grid-connected inverters are often preferred because of the cost of energy storage such as batteries. While the studies on inverters have increased recently, the efficiency of inverters has become matter of interest and been increased.

In this study, implementation of grid-connected and highly efficient inverter for renewable energy systems are aimed. With these objectives, it is intended to contribute the development and expansion of renewable energy systems.

2. MATERIAL AND METHODS:

This thesis begins with introduction which includes brief information about the other part of thesis. In second part, various inverter topologies are investigated and compared with each other. Toward the end of second part, NPC topology which is popular in low voltage application is deeply examined, especially AT-NPC type. In the third part of

thesis, control techniques of grid-connected inverters are presented. The PLL and synchronous reference frame techniques are studied in detail for current control of inverter. To analyses of whole system, MATLAB/Simulink is used and simulation results are given. In the fourth part, technical information of some experimental devices such as sensors, digital controller, semiconductor etc. are presented. Additionally, the results of experiment are given this part. In final part of the thesis, the results obtained from experimental study are interpreted. Also, some works can be done in the future are mentioned.

3. RESULT AND DISCUSSIONS:

Experimental results show that designed AT-NPC inverter which is controlled by dSPACE works with high efficiency and is synchronized with the grid correctly.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK:

In future work, some of the other control and protection techniques can be included in study. By this way, inverter can be work more functionally.

To increase inverter efficiency, different switching techniques, gate drive circuits and different topologies can be investigated. Furthermore, more efficient and less volume required filter than used in this study can be designed.

1. GİRİŞ

Günümüzde artan enerji tüketimi ve fosil yakıt rezervlerinin azalmasından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji üretim teknolojileri birçok ülkede öncelikli teknoloji alanları arasında bulunmaktadır [1,2]. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisinin elde edilmesi sürecinde evirici gibi çeşitli donanımsal cihazlar kullanılmaktadır. Bu cihazların verimi enerji dönüşümündeki verimde oldukça etkilidir [3].

Çıkış gerilimlerdeki seviyelerine göre sınıflandırılabilen eviriciler, yapılarındaki seviye sayısı artışı oranında çıkışlarında sinüse daha yakın gerilim üreterek, ideal bir Doğru Akım (DA)/Alternatif Akım (AA) gerilim dönüştürücüsüne yaklaşırlar [4]. Bu durumda enerji kalitesinde artış olurken, evirici tasarımında göz önünde bulundurulması gereken önemli diğer bir etken olan verimde göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle Çok Seviyeli Eviriciler (ÇSE) yüksek verim ve yüksek güç kalitesi gerektiren uygulamalarda tercih edilen teknolojiler arasında yer almaktadır. Tüm bunlardan dolayı ÇSE topolojileri ve verimini iyileştirmeye yönelik çalışmalar popülerliğini korumaktadır [3,5].

ÇSE'lerde temelde nötr noktası kenetli (Neutral Point Clamped, NPC), uçan kapasitör (Flying Capacitor, FC) ve kaskad H-köprü topolojileri bulunmaktadır [6,7]. Bu topolojilerin çok sayıda modifikasyon ve kombinasyonları özel uygulama gereksinimlerini karşılamak için veya işletim performansını artırmak için ileri sürülmüştür. Bunlardan biri de alçak gerilim uygulamaları için avantaj sağlayan T-tipi NPC dönüştürücülerdir [8,9]. T-tipi dönüştürücüler orta anahtarlama frekansına kadar diğer çok seviyeli dönüştürücü topolojilerinden çok daha verimlidir [10]. T-tipi dönüştürücüler, klasik NPC dönüştürücünün düşük Toplam Harmonik Bozulumu (THB) avantajlarının yanı sıra, 2-seviyeli dönüştürücünün basit çalışma prensibine sahiptir [8]. Ayrıca 3-seviyeli NPC dönüştürücü için kullanılan modülasyon stratejisi T-tipi dönüştürücü için de uygulanabilmektedir. Önceki çalışmalar çok seviyeli topolojilerde

dönüştürücü verimliliğinin anahtarlama frekansına doğrudan bağımlılığı olduğunu göstermiştir [11,12]. 3-seviyeli klasik NPC topolojisi ile karşılaştırıldığında T-tipi topolojide DA-bara gerilimi orta noktasında aktif bir çift yönlü anahtar kullanılır ve kol başına iki diyot daha az bulunur. Ayrıca T-tipi dönüştürücüler basit yapısı ile aktif nötr noktası bağlantılı [13-15] veya çift bobinli dönüştürücüler [16,17] gibi daha karmaşık 3-seviyeli topolojilere alternatif olmaktadır. T-tipi 3-seviyeli dönüştürücüler genellikle alçak gerilim uygulamalarında tercih edilmektedir [18-23]. Evirici veriminde diğer önemli bir etken ise anahtarlama kayıplarıdır. Bu kayıplar kullanılan yarıiletkenin türüne, anahtarlama tekniği ve seçilecek modülasyon türüne göre değişmektedir. Ayrıca, T-NPC tipi eviriciden farklı olarak ters dayanımlı kapıdan izoleli bipolar transistör (Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor, RB-IGBT) yarı iletkeni kullanılan gelişmiş T-NPC (Advanced T-type NPC, AT-NPC) tipi eviricilerde verimin daha fazla artırılması mümkün olmuştur. Çünkü bu evirici türünde anahtarlama kayıpları ve iletim kayıpları diğer NPC eviricilere göre daha azdır [24,25].

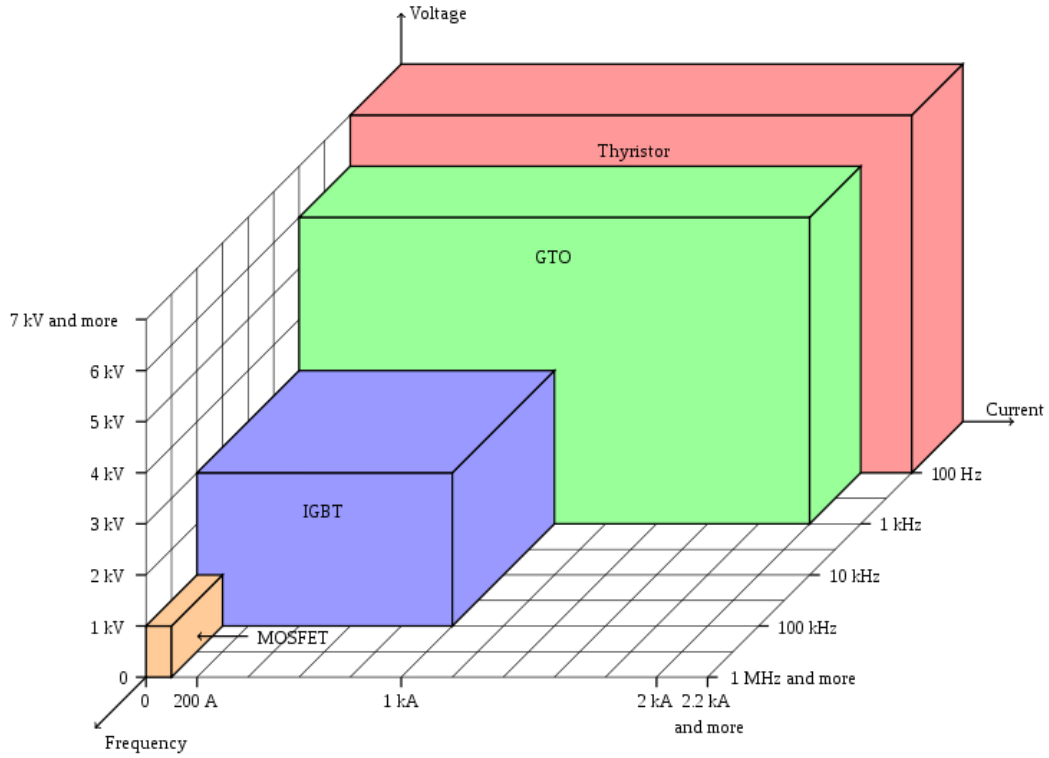
Bu tez çalışmasında, yenilenebilir enerji sistemlerin kullanılan, DA çıkış gücünü AA'ya çevirerek yüksek verimle 3-fazlı şebekeye aktarabilen AT-NPC tipi 3-seviyeli bir evirici yapısının incelenmesi ve uygun denetim ve Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) yöntemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tasarımı yapılan 3-fazlı şebeke bağlantılı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin başarımı MATLAB/Simulink benzetim çalışmaları ve dSPACE DS1103 tabanlı deneysel prototipi ile yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlarla değerlendirilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde yenilenebilir enerji kaynaklarına uygun, çeşitli yapılarıdaki eviriciler incelenerek avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Üçüncü bölümde, 3-fazlı T-Tipi eviriciler başlığı altında T-NPC ve AT-NPC evirici yapıları incelenmiştir. Bu eviriciler için denetim ve DGM teknikleri incelenerek benzetim çalışmaları verilmiştir. Dördüncü bölümde ise; deneysel prototipin tasarımı, deneysel çalışmalarda kullanılan donanımlar ve elde edilen deneysel uygulama sonuçları sunulmuştur. Tezin son bölümünde; çalışma kapsamında alınan sonuçlar yorumlanarak konuyla ilgili öneriler ve gelecek çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

2. ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİLER

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin depo edilmesi için kullanılan akülerin, günümüzde tüm sistem maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturması, ömürlerinin çok uzun olmamasından dolayı belirli periyotlarla değiştirilmesi gerekliliği ve sistemde belirli bir yer ihtiyacını gerektirmesi gibi dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan dolayı yenilenebilir enerji sistemlerinde yük fazlası enerjinin depolanması yerine sistemin şebeke bağlantılı olarak çalışması, özellikle yüksek güçlerde, sıklıkla tercih edilmektedir. Şebeke bağlantısı için ise filtre ve faz kilitlemeli döngü (Phase Locked Loop, PLL) gibi donanımsal ve yazılımsal teknikler sürekli daha iyi performans ve daha yüksek verim odaklı olarak çalışılmaktadır [26,27].

Şebeke bağlantılı yenilenebilir enerji kaynaklı eviricilerin ana fonksiyonu enerji kaynağında üretilen DA gücü şebeke ile senkron AA güce dönüştürmektir. Bu amaçla 1980'lerde ilk şebeke bağlantılı, yenilenebilir enerji kaynaklı, tristör tabanlı evirici tanıtılmıştır. 1990 yılında ise tristör tabanlı ilk seri üretim SMA firması tarafından gerçekleştirilmiştir [28]. 1990'lı yılların ortalarına doğru IGBT ve Metal Oksit Yarı İletkenli Alan Etkili Transistör (MOSFET) tabanlı eviriciler kullanılmaya başlanılmıştır. Ayrıca seri üretim yapan küresel birçok firma günümüzde faaliyet göstermektedir. Şekil 2.1'de görüleceği gibi çeşitli yarı iletken anahtarlar bulunmaktadır. MOSFET, IGBT, GTO (Kapıdan Söndürmeli Tristör) ve Tristör anahtarları güç elektroniği alanında en sık kullanılanlarıdır. Bir birlerine göre çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunan bu anahtarların uygulamalarda seçimi yarı iletkenin, gerilim dayanım değeri, ileri yön polarlamada gerilim düşüm değeri, sızıntı akım değeri, kullanılacak anahtarlama frekansına uygunluğu ve bu değerdeki kayıpları, anahtarlama dinamiği ile nominal çalışma gücü gibi karakteristik özellikleri göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.



Şekil 2.1. Çeşitli yarı iletkenlerin kullanım alanlarına göre sınıflandırılması.

Tüm bu farklılıklarla beraber temel fonksiyonu aynı olan yenilenebilir enerji kaynaklı eviriciler 2 ana topoloji altında toplanabilir;

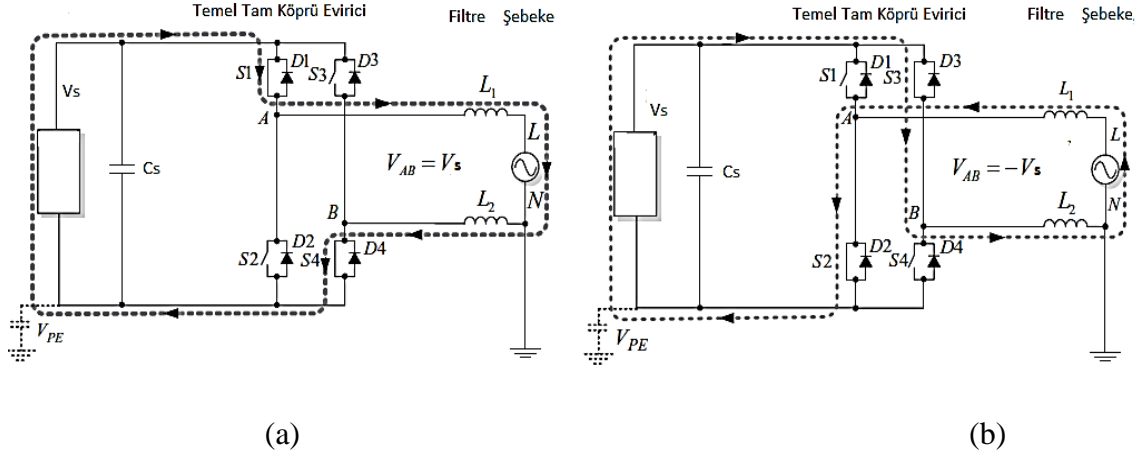
- H- Köprü topolojisinden türeyen
- NPC topolojisinden türeyen

2.1. H-KÖPRÜ TOPOLOJİSİNDEN TÜREYEN EVİRİCİLER

İlk olarak 1965 yılında W. McMurray tarafından geliştirilen H-Köprü ya da Tam-Köprü evirici ailesi güç elektroniği dönüştürücülerine önemli bir referans olmuştur.

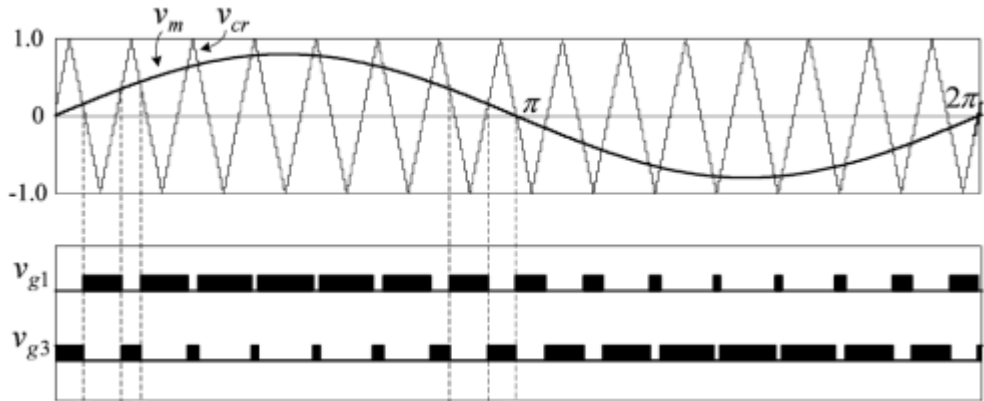
2.1.1. Temel Tam Köprü Evirici

Yenilenebilir enerji kaynaklı temel H-Köprü evirici Şekil 2.2'deki gibidir. Bu tip eviricide Bipolar, Unipolar ve Hibrit olmak üzere 3 farklı modülasyon teknikleri kullanılabilir.



Şekil 2.2. Bipolar modülasyonda tam köprü evirici a) pozitif akım b) negatif akım çıkışı.

Bipolar modülasyon tekniğinden çapraz anahtarlar aynı şekilde tetiklenirler. Örneğin Şekil 2.2'deki S1 ve S4 anahtarları ile S2 ve S3 anahtarları aynı anda, aynı sinüzoidal referansa göre yüksek frekansta anahtarlanırlar. Şekil 2.3'de bu modülasyon türünde anahtarlama sinyallerinin oluşumu verilmiştir. Burada S1, S3 ve S2, S4 anahtarları aynı anda hiçbir zaman anahtarlanmazlar. Böylece AA çıkış için gerekli pozitif akım ve negatif akım yolu elde edilmiş olunur, fakat çıkışta sıfır gerilim durumu oluşmaz.



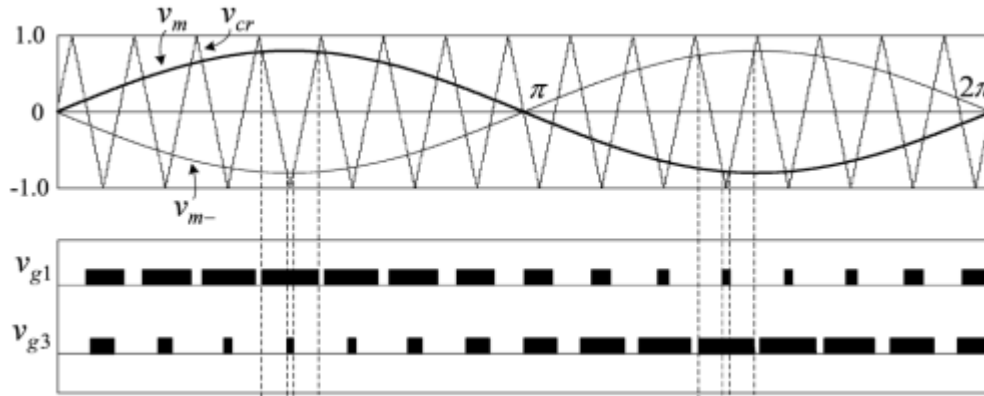
Şekil 2.3. Bipolar modülasyonda anahtarlama durumları.

Enerji kaynağının Fotovoltaik (FV) olması durumunda paneller ile toprak arasında oluşan parazittik kapasitans gerilimi (V_{PE}) sadece şebeke frekansındaki bileşenleri

içerir, anahtarlama frekansı bileşenlerini içermez böylece sızıntı akımı (leakage current) ve elektromanyetik girişim (EMI) etkileri azalır.

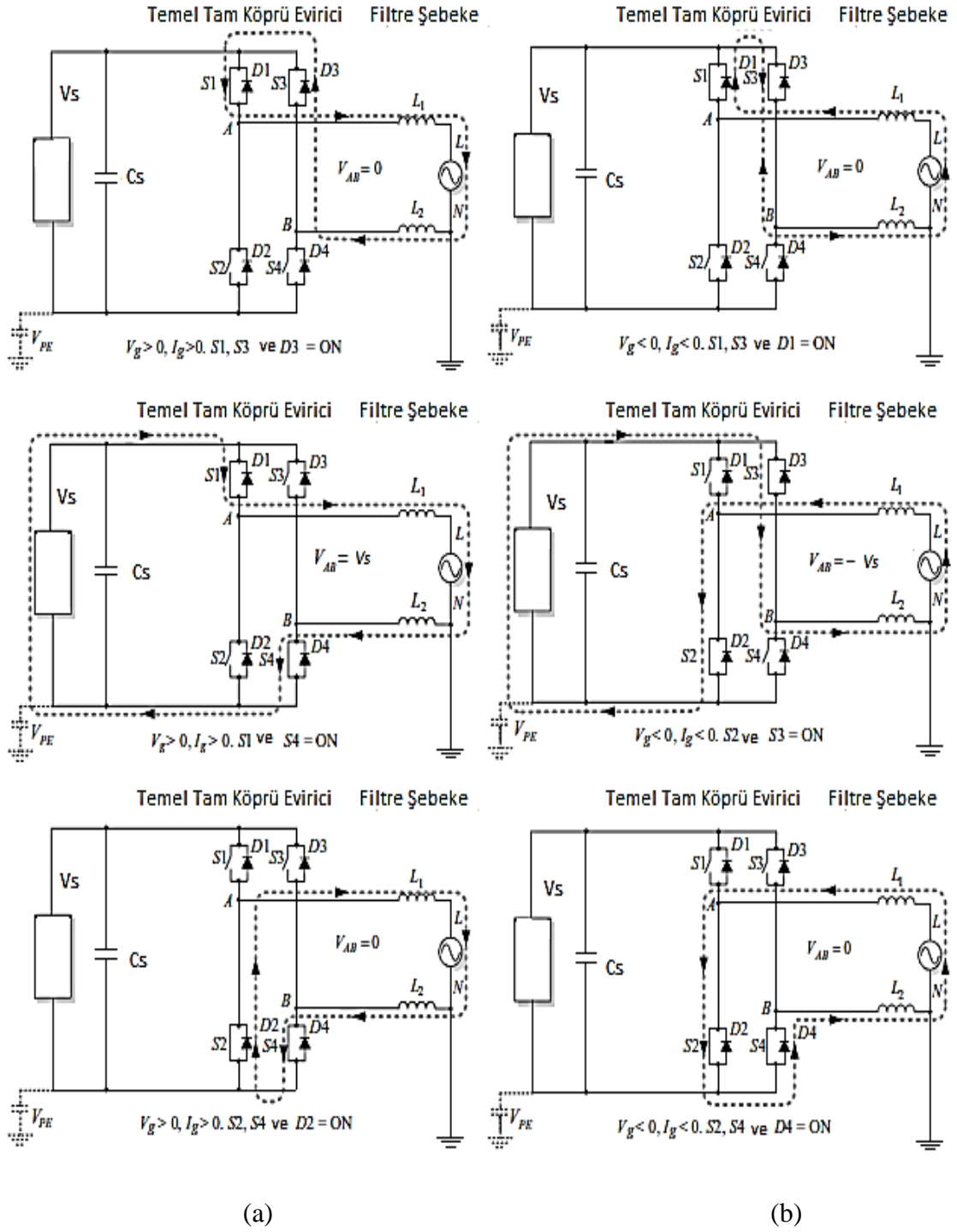
Akımdaki anahtarlama dalgalanmaları anahtarlama frekansı değerinde olduğundan filtreleme gereksinimleri yüksektir. Filtre tarafında gerilim geçişleri $+V_S -V_S +V_S$ şeklinde olduğundan dolayı çekirdek (core) kayıpları fazladır. Serbest geçiş (freewheeling) anında $L_{1,2}$ bobinleri ile C_S arasında reaktif güç değişimi olduğundan ve bir anahtarlama periyodunda her iki anahtarda anahtarlandığından verimleri düşüktür. Dolayısıyla bu gibi dezavantajlara sahiptir.

Temel tam köprü eviricide bipolar modülasyondan farklı olarak unipolar (tek kutuplu) modülasyon tekniği de kullanılır. Bu modülasyon tekniğinde her iki kol bir birbirinin tersi olan referans sinüslere göre yüksek frekansta tetiklenirler, ayrıca bipolar tekniğinden farklı olarak S1, S3 ve S2, S4 anahtarları aynı anda iletim durumunda olabilir [29]. Bu modülasyon tekniğinde anahtarlama sinyallerinin elde edilmesi Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Unipolar modülasyonda anahtarlama durumları.

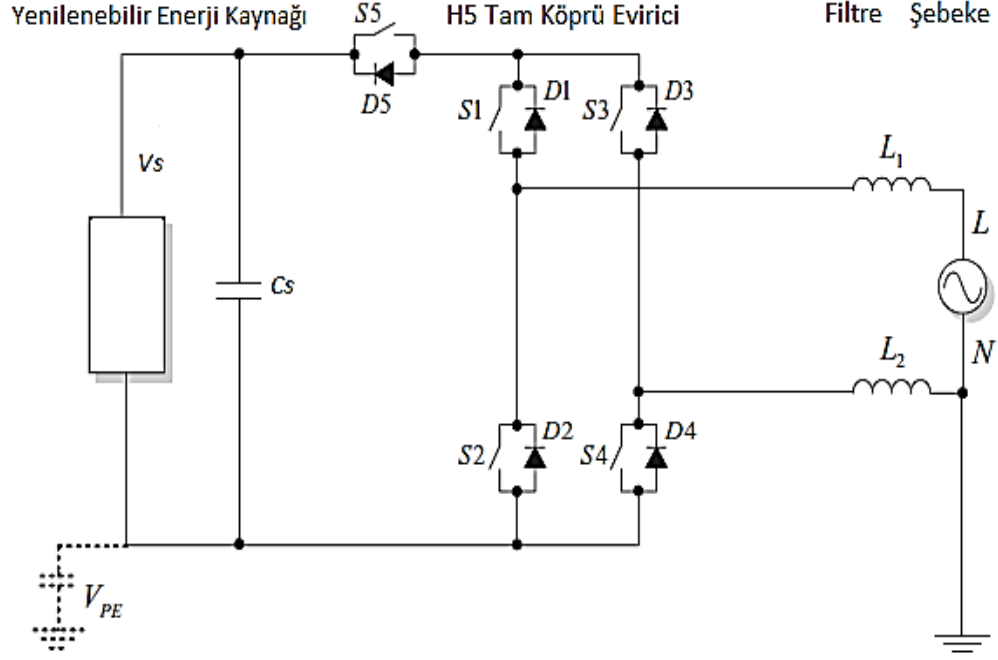
Bu modülasyon türünde eviricinin pozitif ve negatif akım durumları Şekil 2.5’de verildiği gibidir. Buradan görüleceği gibi filtre tarafında gerilim geçişleri $0, +V_S, 0, -V_S, 0$ şeklinde olduğundan dolayı çekirdek (core) kayıpları daha azdır. Akımdaki anahtarlama dalgalanmaları anahtarlama frekansının 2 katı değerinde olduğundan filtreleme gereksinimleri daha düşüktür. Tüm bunlardan dolayı verim daha yüksektir.



Şekil 2.5. Unipolar modülasyonda tam köprü evirici a) pozitif akım b) negatif akım çıkışı.

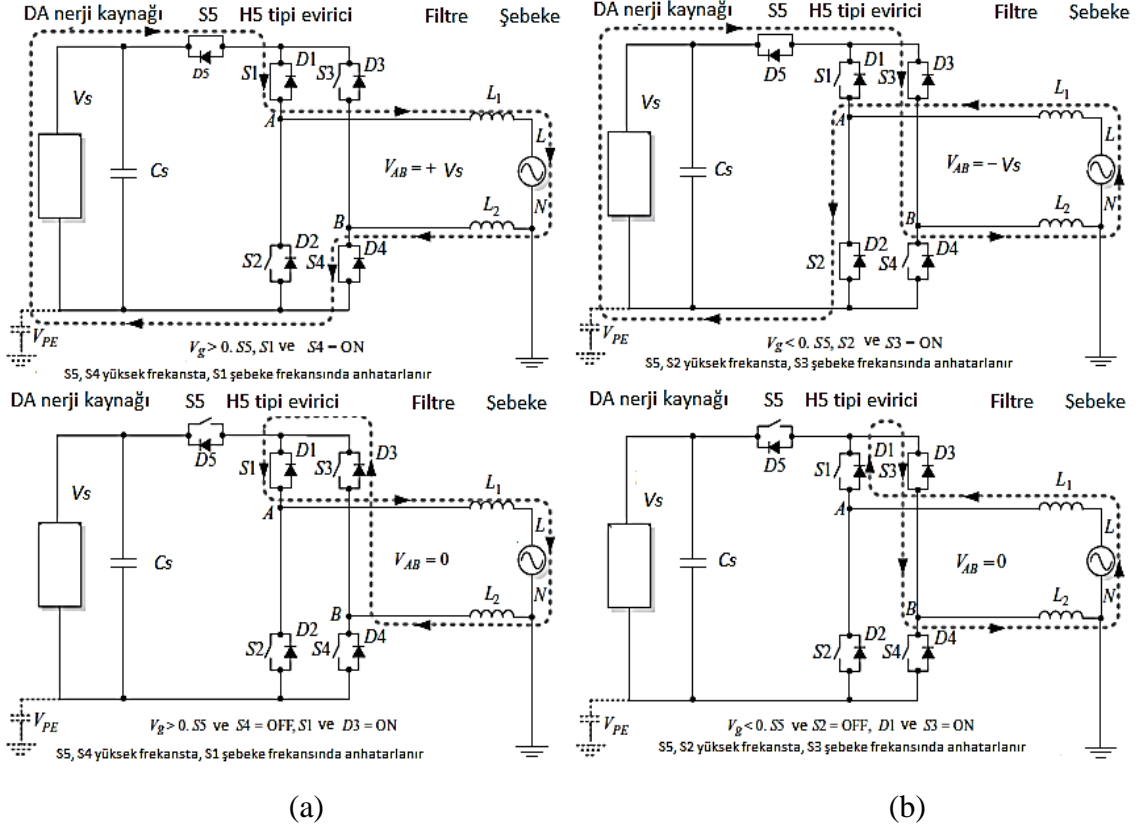
2.1.2. H5 Tipi Evirici

2005 yılında SMA firması tarafından patenti alınan H5 tipi evirici Şekil 2.6'da verilmiştir [30]. Temel tam köprü eviriciden farkı, isminden de anlaşılacağı üzere, ekstra beşinci bir anahtarın eklenmesidir.



Şekil 2.6. H5 tipi evirici.

Şekil 2.7'de anahtarlama durumları verilen bu evirici topolojisinde DA barının pozitif ayağına bağlanan beşinci anahtar, önceki topolojilerde bahsi geçen sıfır gerilim durumunda $L_{1,2}$ bobinleri ile C_s arasında reaktif güç değişimini engeller ve yine bahsi geçen V_{PE} gerilimin azaltır. Ayrıca, filtre tarafında gerilim geçişleri $0, +V_s, 0, -V_s, 0$ şeklinde olduğu için filtre gereksinimleri daha azdır. Fakat ekstra bir anahtarın devreye eklenmesi hem maliyet hem de evirici toplam alanını arttırmakta ve aynı anda 3 anahtarın iletimde olması durumu iletim kayıplarını arttırmaktadır [19].



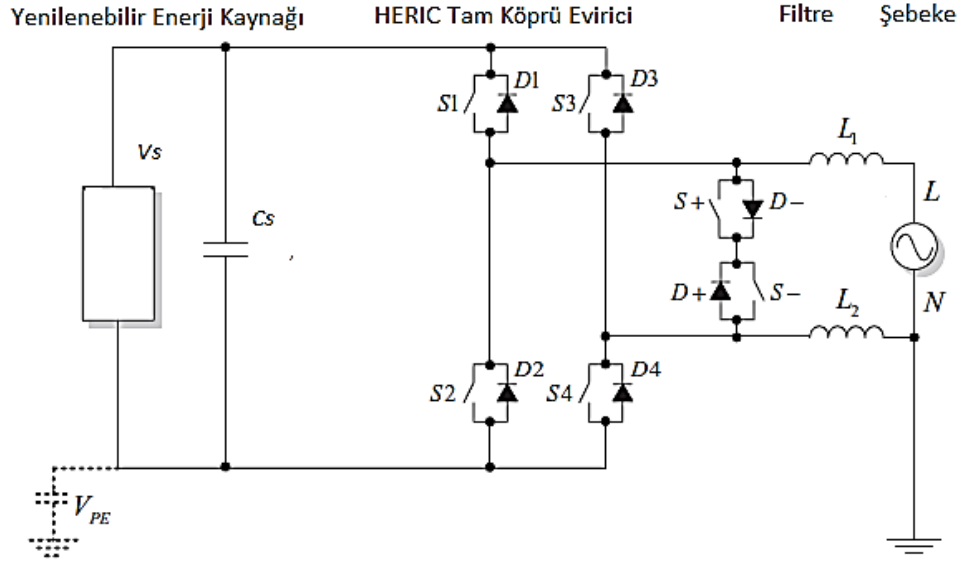
Şekil 2.7. H5 tipi evirici a) pozitif akım b) negatif akım çıkış durumları.

2.1.3. Heric Tipi Evirici

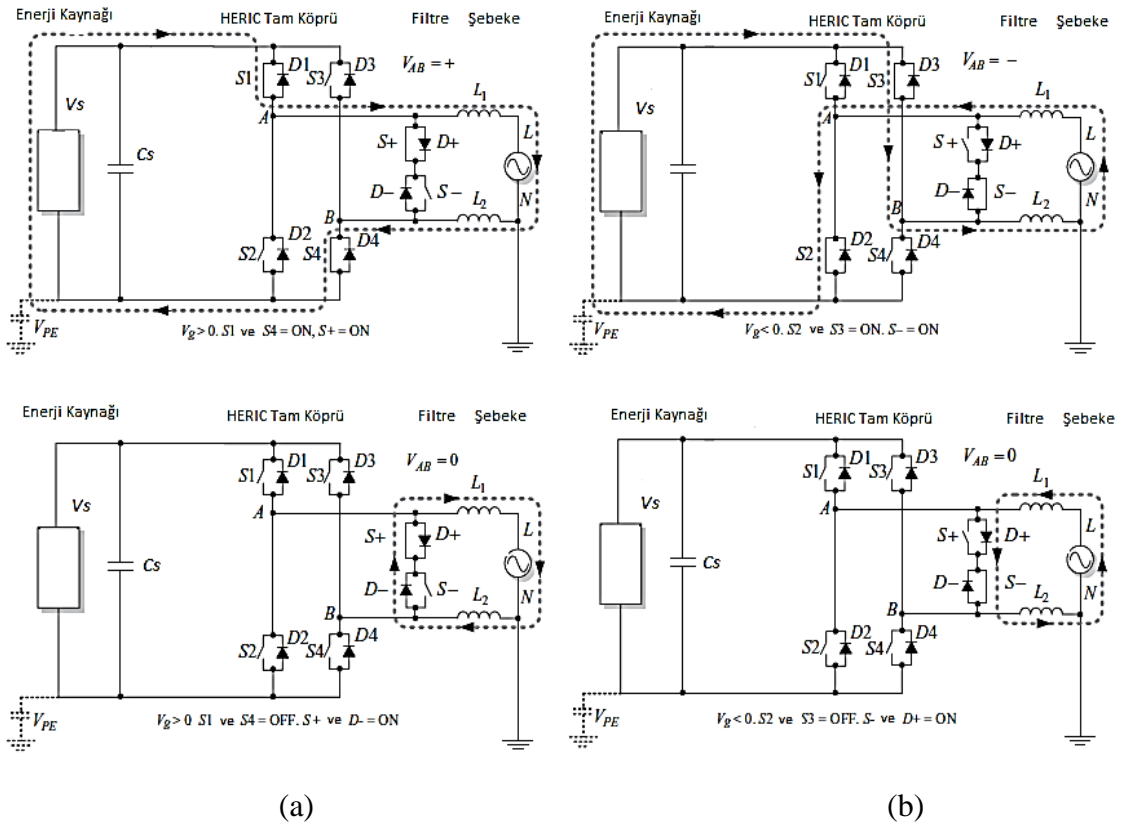
Sunway şirketi tarafından 2006 yılında patenti alınan bu evirici tipi Şekil 2.8’de görüldüğü gibi H-köprü eviriciden farklı olarak AA tarafına iki adet sırt sırta bağlı IGBT’ler bir kol ile eklenmiştir. Bu kol tıpkı H5 tipi eviricide beşinci anahtar gibi iki temel özelliği sunmaktadır. Bunlar; önceki topolojilerde bahsi geçen sıfır gerilim durumunda $L_{1,2}$ bobinleri ile C_s arasında reaktif güç değişimini engellemek ve V_{PE} geriliminde ki yüksek frekans bileşenlerini elimine etmektir.

Pozitif ve negatif AA çıkış akımları için anahtarlama durumları Şekil 2.9’da verilen eviricide iki kez sıfır gerilim durumu S+ ve S- anahtarları yardımı ile elde edilir. Bu durumda filtre tarafında gerilim geçişleri 0, $+V_s$, 0, $-V_s$, 0 şeklinde olduğu için filtre gereksinimleri daha azdır. Fakat klasik H-köprü eviriciye göre ekstra 2 adet anahtar içermektedir. Buda hem maliyet hem de eviricinin kapladığı alan bakımından olumsuz bir etki katmaktadır. Bunun yanında H5 tipiyle kıyaslandığında aynı anda 3 adet değil de 2 adet anahtarın iletimde olmasından dolayı iletim kayıpları daha azdır.

Burada bahsi geçen eviricilerin dışında H-Köprü topolojisinden türeyen Refu tipi, Tam Köprü Sıfır Gerilim Doğrultucu tipi gibi eviricilerde literatür mevcuttur [19].



Şekil 2.8. Heric tipi evirici.



Şekil 2.9. Heric tipi evirici a) pozitif akım b) negatif akım çıkış durumları.

2.2. NPC TOPOLOJISINDEN TÜREYEN EVİRİCİLER

NPC topolojisi ilk olarak 1981 yılında Nabae, Magi ve Takahashi tarafından duyurulmuştur. Bu topoloji dV/dt 'nin azaltılmasında ve anahtarlama streslerinin azaltılması konusunda klasik tam köprü eviricilere göre iyi bir gelişme göstermiştir. Ayrıca, çok yönlü bir topoloji olup tek faz ve 3 faz uygulamalarında kullanılabilir [31-33].

Günümüzde evirici seçiminde topoloji ile birlikte çıkış gerilim seviyesi de önemli kriterlerden biri haline gelmiştir. Geçtiğimiz on yıllarda 2-seviyeli eviriciler tercih edilirken günümüzde ÇSE'ler, çıkışında THB'nin düşük seviyelerde olması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Özellikle 3-seviyeli (3L) ve yüksek verimli eviriciler, düşük gerilim uygulamalarında tercih edilmektedir [34,35].

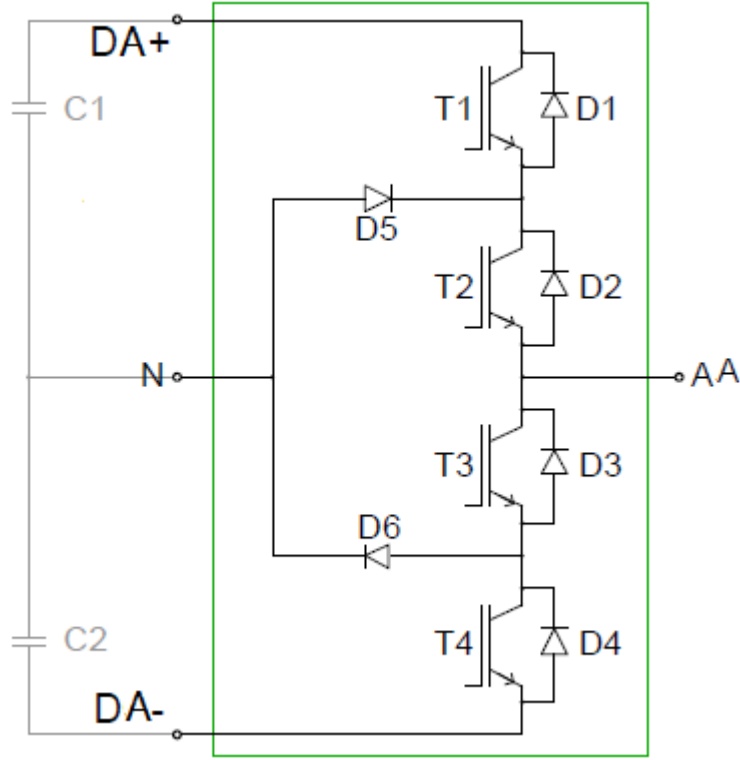
2.2.1. 2-Seviyeli ve 3-Seviyeli Eviricilerin Kıyaslanması

3L NPC evirici kullanmanın 2-seviyeli (2L)'ye göre faydalarından biri, düşük akım THB değeri sağlamasıdır. Bu durumda filtre gereksinimleri azalarak eviricinin kapladığı alan küçülür ve filtre kayıpları azalır. Diğer bir faydası ise kullanılan IGBT'lerin ve diyotların aynı DA bara gerilimi için daha düşük gerilim dayanımına ihtiyaç duymasındadır. Düşük gerilim dayanımlı yarı iletkenler ise daha az kayıplar oluşturarak verimi artırır.

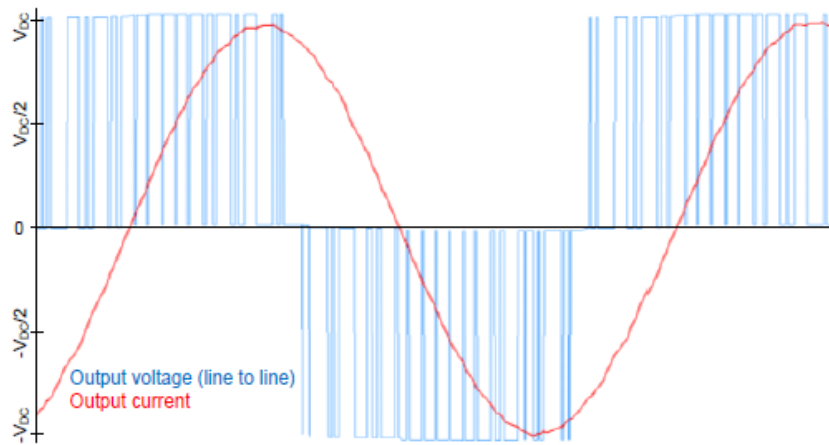
2L evirici ile 3L NPC eviricinin tek fazları için kullanılan yarı iletkenler karşılaştırıldığında; Şekil 2.10'da görüldüğü gibi T1, T2, T3 ve T4 numaralı 4 IGBT ile 4 adet bunlara ters paralel bağlı serbest geçiş diyotu (Free Wheeling Diode, FWD) ve 2 adet kenetlenme diyotundan (Clamping Diode, CD) oluşurken bu sayısı 2L evirici için sadece 4'dür.

Şekil 2.10 incelendiğinde 2L eviriciden farklı olarak; DA bara eşit gerilimdeki simetrik iki kutba bölünmüş, bu kutupların ortasında ise nötr noktası oluşturulmuştur. Böylelikle 2L eviricide AA çıkış gerilimi Şekil 2.11'deki gibi V_{DC} ile $-V_{DC}$ arasında değişirken 3L eviricide AA çıkış Şekil 2.12'de görüldüğü gibi $V_{DC}/2$, nötr ve V_{DC} arasında değişerek 3.

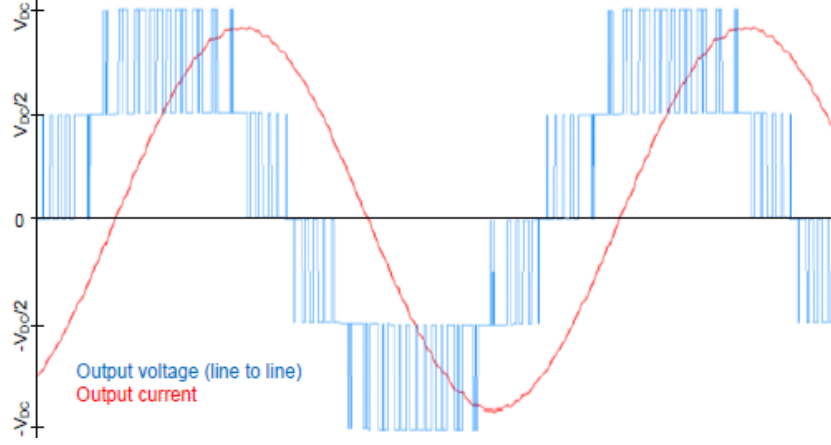
seviyeyi oluşturmaktadır. Bu seviye artışı çıkış akımının ideal sinüse yaklaşmasını sağlayarak THB değerini azaltmaktadır. THB değeri düşük şebeke bağlantılı evirici, şebeke enerji kalitesi açısından daha olumlu sonuçlar vermektedir.



Şekil 2.10. 3L NPC tipi evirici [9].



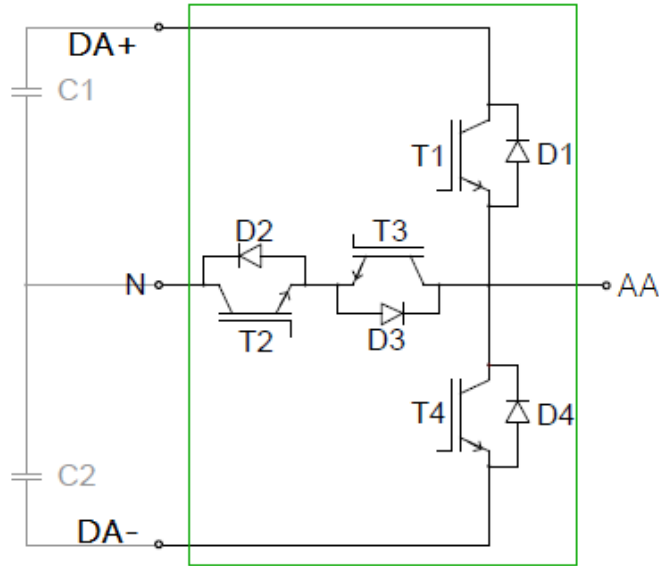
Şekil 2.11. 2L evirici çıkış akım ve gerilimi [9].



Şekil 2.12. 3L evirici çıkış akım ve gerilimi [9].

2.2.2. T-NPC Ve NPC Eviriciler

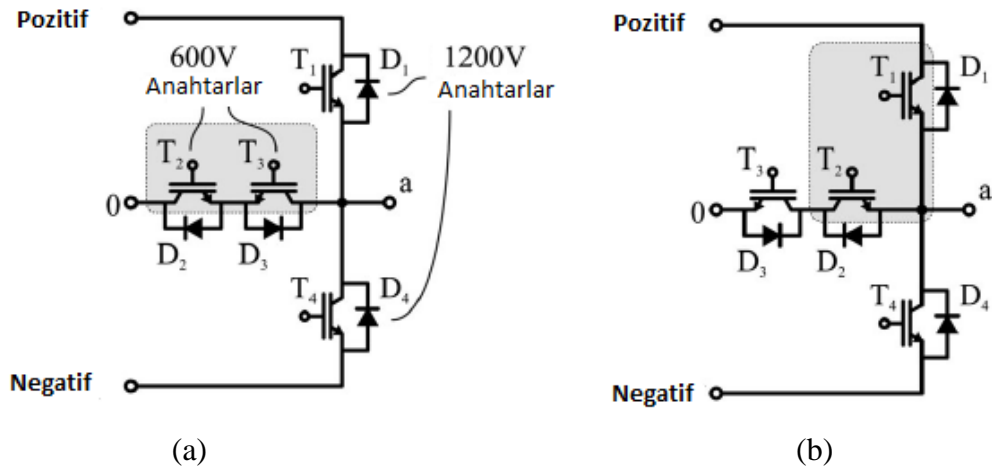
Şekil 2.10’da verilen klasik tip NPC eviriciden farklı olan ve günümüzde düşük gerilim uygulamalarında yaygınlaşmış T-NPC topolojisi Şekil 2.13’de verilmiştir. NPC tipi evirici ile kıyaslandığında DA baranın orta noktasında konumlandırılmış çift yönlü anahtarlar vardır. Bu evirici, 2-seviyeli eviricinin iletim kayıplarının az olması ve basit anahtarlama tekniğinin kullanılabilmesi avantajları ile 3-seviyeli eviricinin düşük anahtarlama kayıpları ve yüksek kalitede AA çıkış vermesi gibi avantajları sağlamaktadır [8,35,36].



Şekil 2.13. T-NPC evirici [9].

Düşük gerilim uygulamalarında, örneğin 650V DA gerilimde, alt (T1, D1) ve üst (T4, D4) yarı iletkenler tüm DA gerilimi bloke edebilmek için 1200V gerilim dayanımlı seçilir, fakat T-NPC yapısında nötr noktasında kenetli çift yönlü yarı iletkenler sadece DA bara geriliminin yarısı kadar olan gerilime dayanımlı olması yeterlidir. Düşük gerilim dayanımlı iletkenlerin kullanımı ise anahtarlama kayıplarını azaltmaktadır.

T-NPC eviricide nötr noktasındaki çift yönlü anahtarlar iki farklı şekilde bağlanabilmektedir. Şekil 2.14a ve b’de sırasıyla ortak emiterli ve ortak kollektörlü bağlantı verilmiştir. 3-fazlı yapıda göz önünde bulundurulduğunda ortak emiterli bağlantı her faz kolu için ekstra bir tane izole sürücü gerilim kaynağına ihtiyaç duyar [8].



Şekil 2.14. T-NPC eviricinin a) ortak emiter b) ortak kollektör bağlantısı [8].

Eviricilerin uygulamada çeşitli kontrol teknikleri ile kontrolü bazı sınırlar içerisinde sağlanmaktadır. Bu kontrolün gerçekleşmesi ise eviricinin istenilen kriterlere uygun tetiklenmesine bağlıdır. Ayrıca oluşabilecek kısa devre gibi istenmeyen durumların önlemi tetikleme sinyalleri oluşturulurken alınabilir. Bu nedenlerden dolayı eviricinin anahtarlama durumlarının incelenmesi önemlidir. Çizelge 2.1’de NPC tip eviricinin tüm anahtarlama olasılıkları/durumları verilmiştir. Toplamda 4 adet yarı iletkenin Açık (ON) ve Kaplı (OFF) iki farklı durumunun olması olasılık sayısını 16 adet yapmıştır.

Çizelge 2.1. NPC eviricinin tüm anahtarlama durumları.

| Anahtar | Anahtar Durumları | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| T2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| T3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| T4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

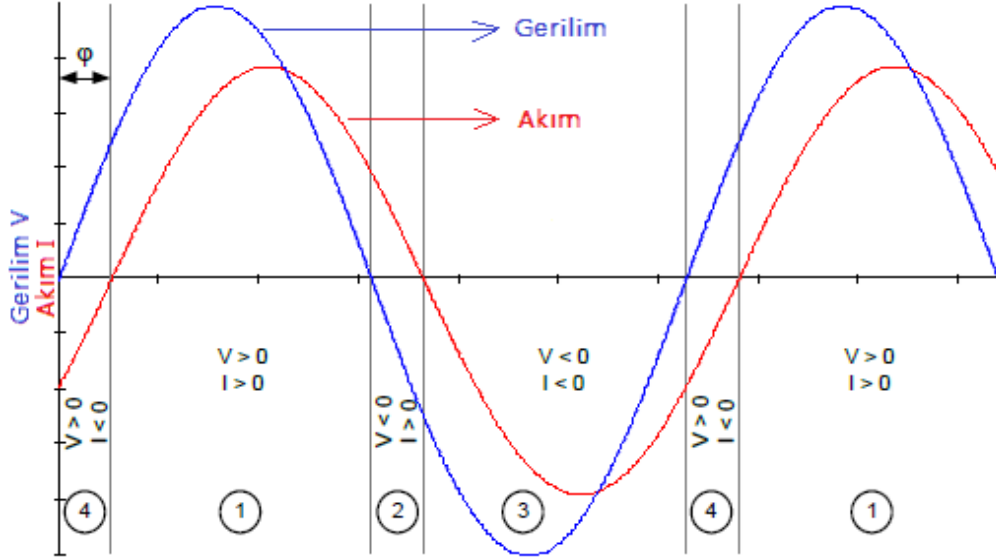
Çizelge 2.1’de yeşil renk ile belirtilen durumlar evirici çalışması için uygun olan ve herhangi bir tehlike içermeyen durumlardır. Bu durumlardan tüm IGBT’lerin OFF durumunda olması, T2 veya T3’ün tek başlarına ON durumunda olması ve komşu iki IGBT’nin (T1 ile T2, T2 ile T3, T3 ile T4) ON olması normal çalışma modunda gerçekleşen durumlardır. Sarı renk ile gösterilen durumlar ise potansiyel tehlike içeren durumlarken kırmızı renkli durumlar tehlikeli durumlardır. Bu durumlardan bitişik 3 IGBT’nin ON olması DA bara geriliminin alt veya üst yarısından kısa devre olması demektir. Bitişik olmayan 3 IGBT’nin ON olması durumlarında T2 veya T3 IGBT’leri tam DA gerilimine maruz kalmaktadır. 4 IGBT’ nin ON olmasında ise DA baranın tümü kısa devre olmaktadır.

T-NPC için ise anahtarlama durumları Çizelge 2.2’de verildiği gibidir. NPC tipinden farklı olarak, T1 ve T4 anahtarlarının tek başlarına ON durumunda bulunmaları orta anahtarlar (T2, T3) sayesinde herhangi bir tehlike arz etmezken, komşu olmayan 2 IGBT’nin (T1 ve T3, T2 ve T4, T1 ve T4) aynı anda ON olması durumu DA baranın tamamının veya üst/alt yarısının kısa devre olmasına sebep olduğu için bu anahtarlama kombinasyonu tehlikeli durumlar arasında yer almıştır.

Çizelge 2.2. T-NPC eviricinin tüm anahtarlama durumları.

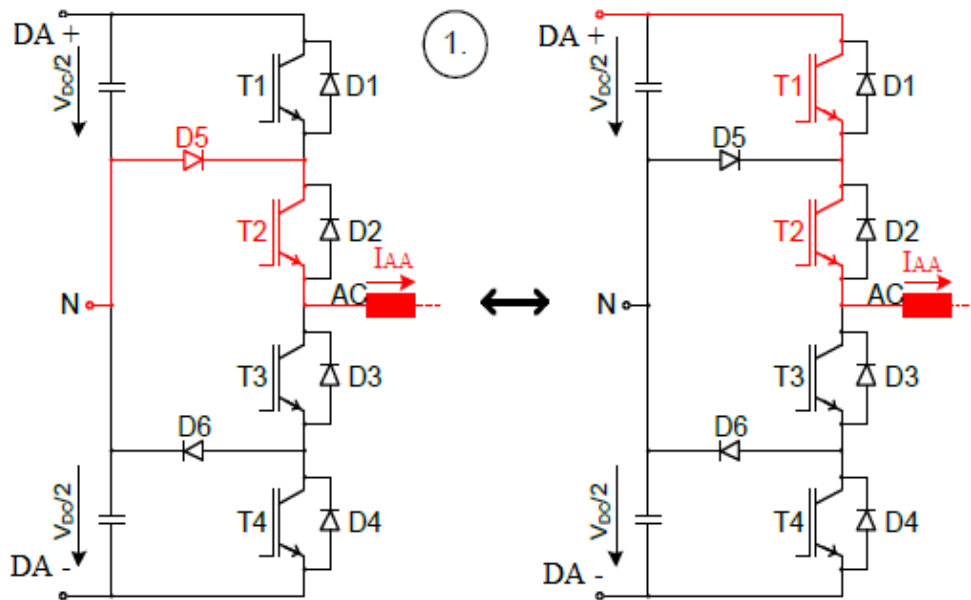
| Anahtar | Anahtar Durumları | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| T2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| T3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| T4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tüm anahtarlama durumları değerlendirildikten sonra komütasyonu ve komütasyon yollarını incelemek için Şekil 2.15’de gerilim ve akım grafikleri verilen endüktif bir yük grafikteki gibi 4 farklı çalışma bölgesine ayrılabilir. Buradaki ϕ gerilim ile akım arasındaki faz farkını temsil etmektedir.



Şekil 2.15. Evirici için endüktif bir yükte çalışma bölgeleri [9].

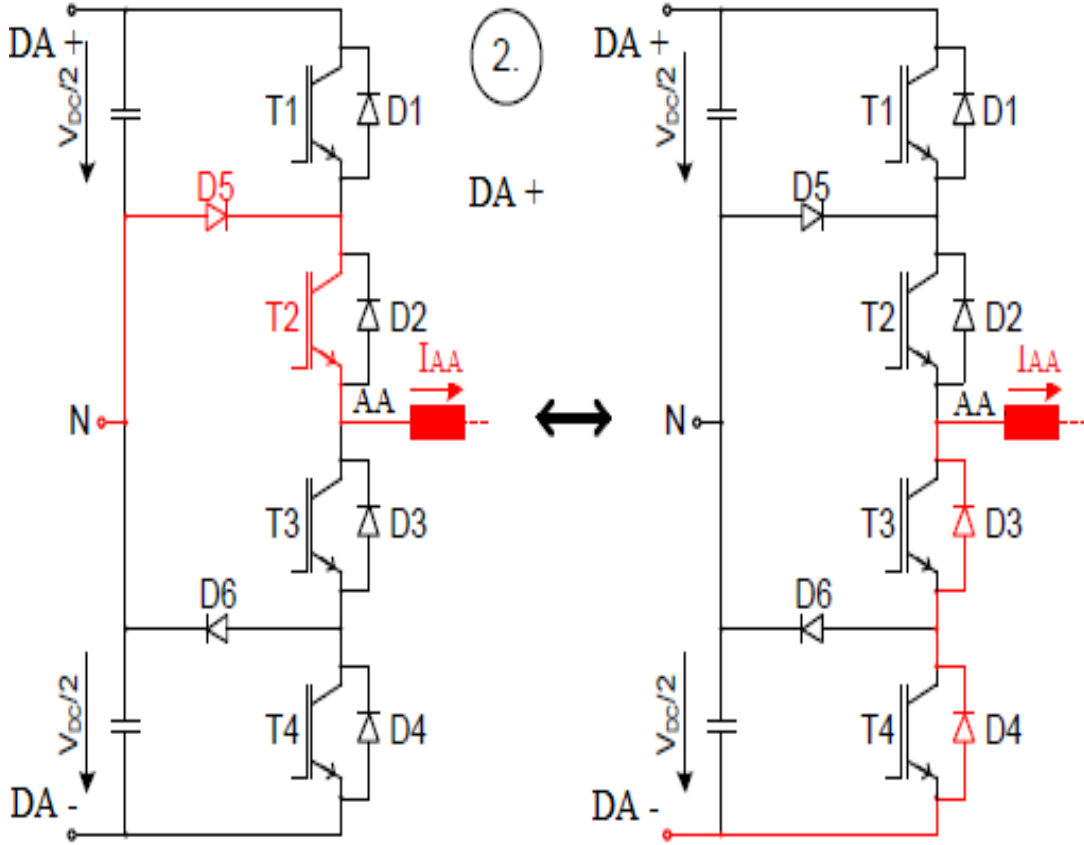
Şekil 2.15’de ki 1. Bölgede gerilim ve akımın her ikisi de pozitif bölgededir. Komütasyon T1 ve D5 diyotları arasında Şekil 2.16’daki gibi gerçekleşir. Akım, T1 anahtarı ON durumuna anahtarlandığı sürece +DA geriliminden T1 ve T2 vasıtasıyla AA tarafına akar. T1 anahtarı OFF durumuna anahtarlandığında akım D5 diyotu vasıtasıyla T2’den geçerek nötrden AA’ya akar. Bu süre boyunca T2 anahtarı sürekli ON konumuna anahtarlanır.



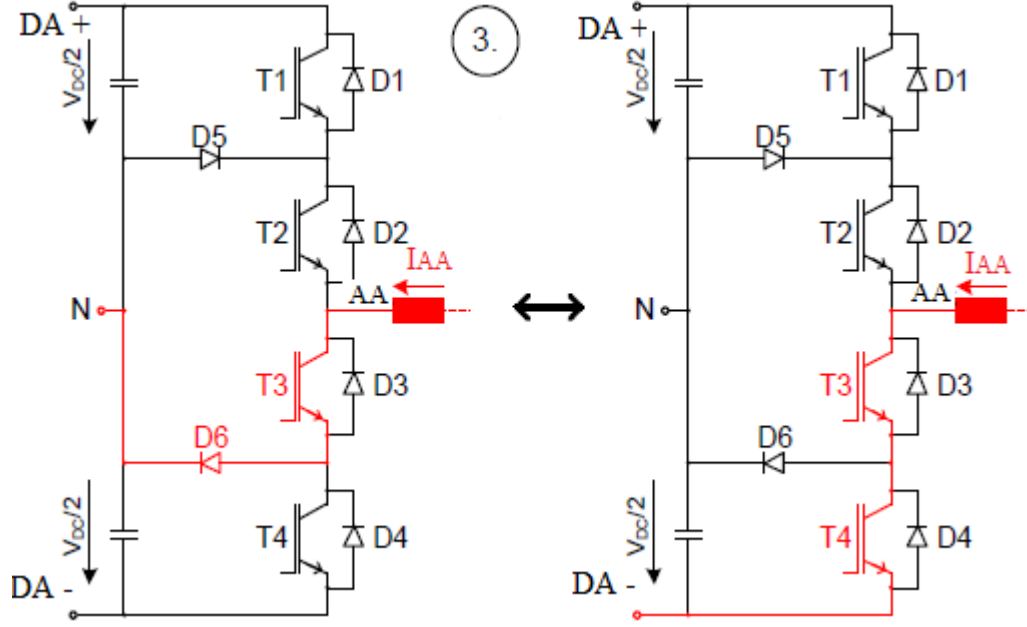
Şekil 2.16. NPC evirici için birinci bölge çalışma durumu [10].

Şekil 2.15'deki 2. Bölgede ise akımın pozitif iken gerilim negatiftir. Komütasyon D5, T2 ile D3, D4 diyotları arasında Şekil 2.17'deki gibi gerçekleşir. Akım, T2 anahtarı ON durumuna anahtarlandığında nötrden D5 ve T2 vasıtasıyla AA tarafına akar. T2 anahtarı OFF durumuna anahtarlandığında akım D3 ve D4 diyotları vasıtasıyla $-DA$ 'dan AA'ya akar.

Gerilim ve akımın her ikisinin de negatif olduğu 3. Bölge çalışma durumunda komütasyon Şekil 2.18'de görüldüğü gibi D6 ve T4 arasında gerçekleşir. Akım, T4 anahtarı ON durumuna anahtarlandığı sürüce AA tarafından $-DA$ 'ya doğru T3 ve T4 vasıtasıyla akarken, OFF durumunda AA'dan T3 ve D6 vasıtasıyla nötre akar. Bu süre boyunca T3 anahtarı sürekli ON konumundadır.

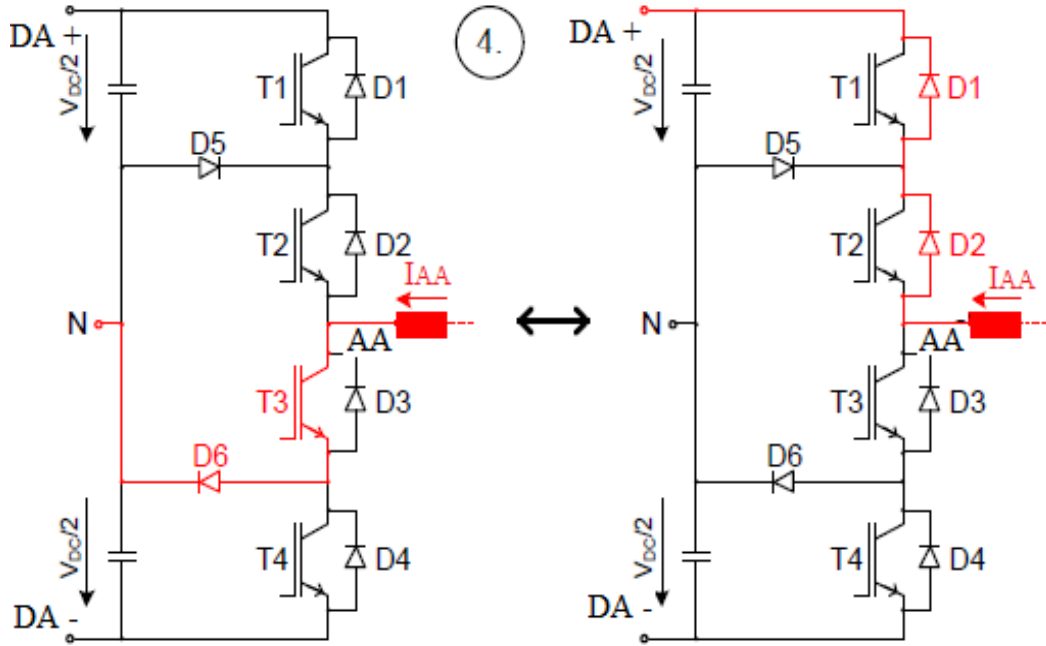


Şekil 2.17. NPC evirici için ikinci bölge çalışma durumu [9].



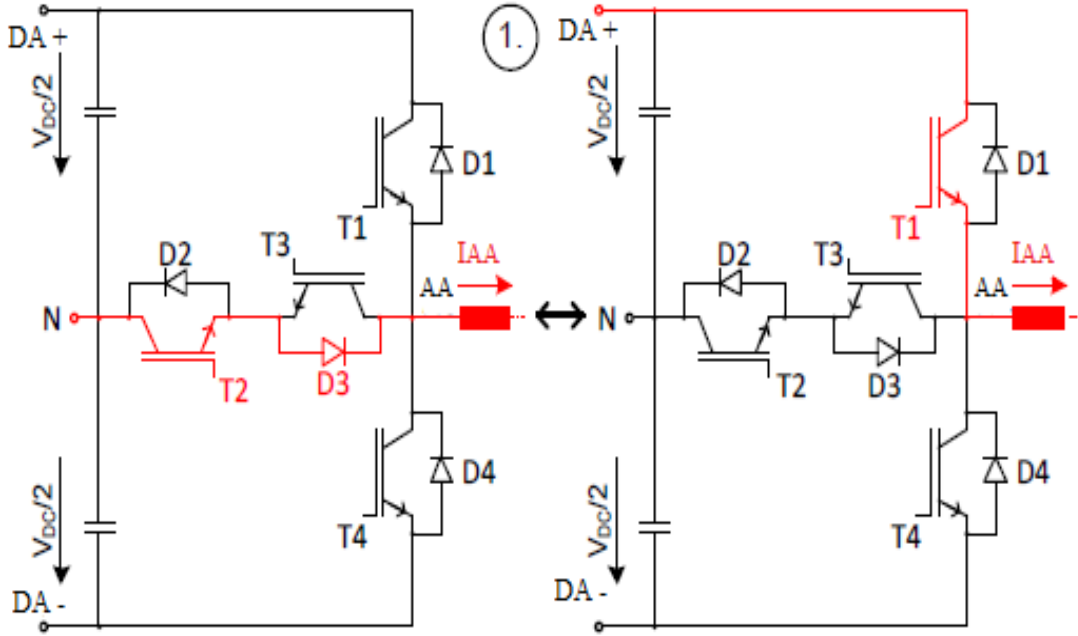
Şekil 2.18. NPC evirici için üçüncü bölge çalışma durumu [9].

Dördüncü bölgede ise gerilim pozitif iken akım negatif yöndedir. Şekil 2.19'daki gibi T3 anahtarı ON durumunda anahtarlandığında akım T3 ve D6 vasıtasıyla AA'dan nötre akar. OFF durumuna anahtarlandığında D1 ve D2 vasıtasıyla AA'dan +DA'ya akar.



Şekil 2.19. NPC evirici için dördüncü bölge çalışma durumu [9].

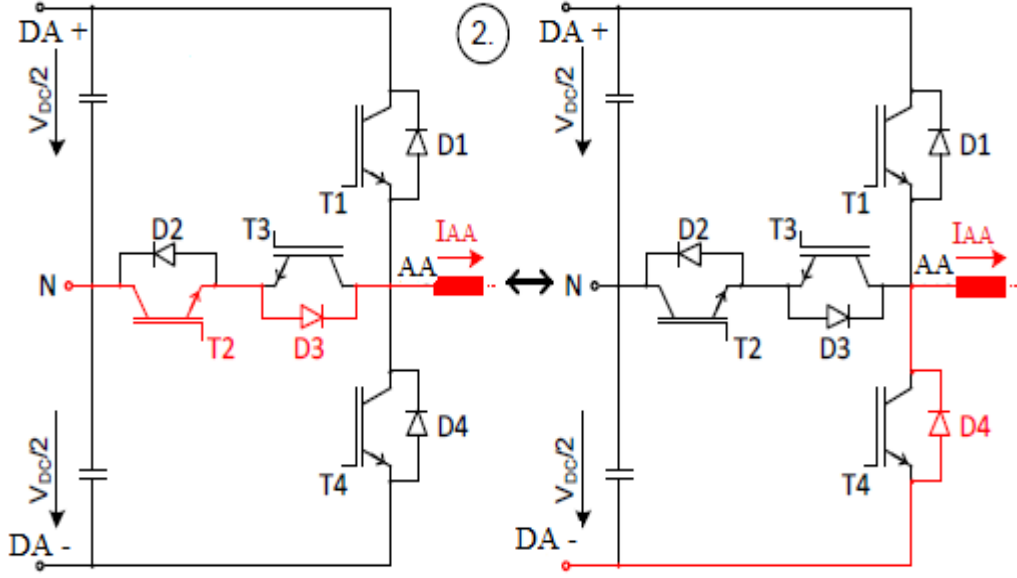
T-NPC tipi eviricide akım yolları NPC eviriciye göre daha kısadır. Buda yüzey endüktansının (stray inductances) azalarak anahtarlama sırasında yarı iletken üzerindeki gerilim aşımalarını azaltır. Akım yolları incelenecek olursa, Şekil 2.15’deki gibi endüktif bir yük durumu ele alındığında birinci bölgede çalışan T-NPC eviricinin komütasyon durumu Şekil 2.20’deki gibidir.



Şekil 2.20. T-NPC evirici için birinci bölge çalışma durumu [9].

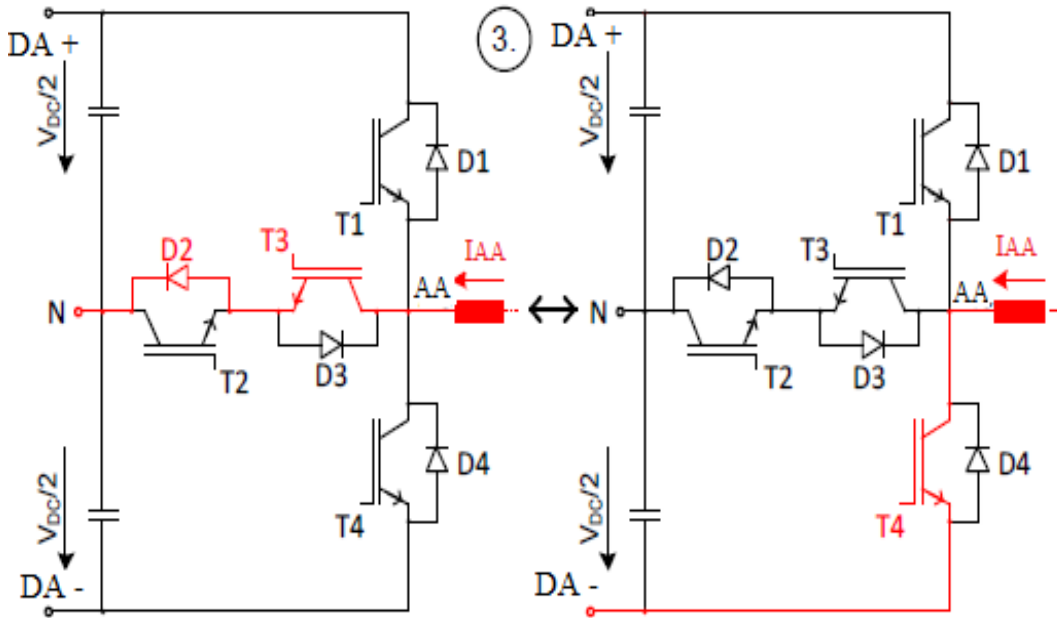
T-NPC eviricisi için komütasyon durumları incelenecek olursa; birinci bölgede akım ve gerilim pozitif bölgededir. Komütasyon T1 ile T2, D3 arasındadır. T1 anahtarı ON konumuna anahtarlandığı sürece akım +DA’dan AA’ya doğru akar. T1 anahtarı OFF konumuna anahtarlandığında komütasyon T2, D3’e geçer ve bu durumda akım nötrden AA’ya doğrudur. Bu bölgedeki çalışmada T2 anahtarı sürekli ON konumundadır, T1 ON durumuna anahtarlandığı an D3 diyotu DA bara gerilimini yarısını bloke ederek kısa devre oluşumunu engeller.

İkinci bölge çalışmada ise akım pozitif iken gerilim negatif yöndedir. Bu durumdaki komütasyon Şekil 2.21’de verilmiştir. Burada komütasyon T2, D3 ile D4 diyotu arasında değişmektedir.



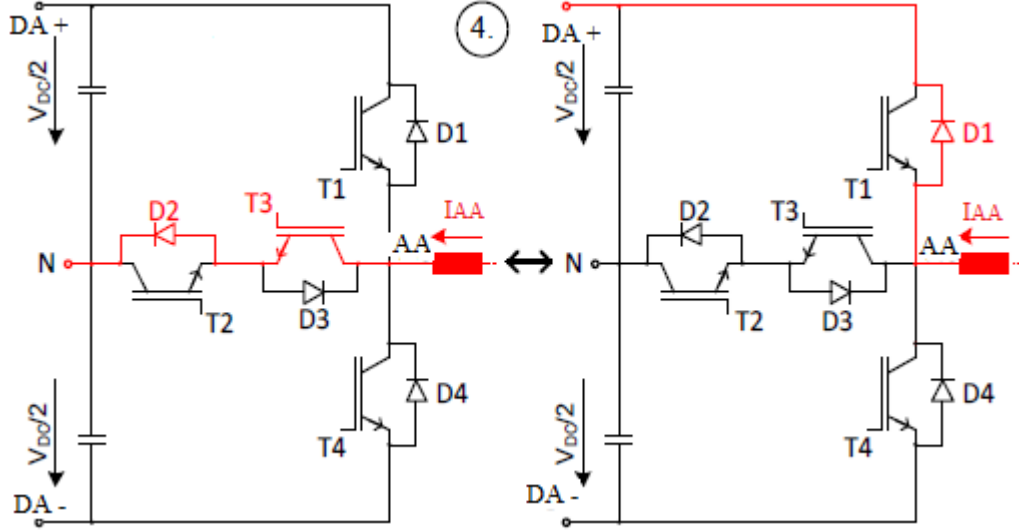
Şekil 2.21. T-NPC evirici için ikinci bölge çalışma durumu [9].

Akım ve gerilimin negatif olduğu üçüncü bölgede evirici komütasyon değişimi Şekil 2.22'deki gibidir. Bu bölgede komütasyon T3, D2 ile T4 arasında gerçekleşmektedir. T3 anahtarı sürekli ON durumuna anahtarlanırken eğer T4 OFF konumuna anahtarlanırsa akım yolu AA'dan T3 ve D2 üzerinden geçerek nötre doğrudur, T4 ON konumuna anahtarlandığında akım AA'dan -DA'ya doğru T4 üzerinden akar. Bu durumda D2 diyotu DA bara geriliminin yarısını bloke ederek kısa devre oluşumunu engeller.



Şekil 2.22. T-NPC evirici için üçüncü bölge çalışma durumu [9].

Akımın negatif, gerilim pozitif olduğu dördüncü bölgede komütasyon durumları Şekil 2.23'deki gibidir.

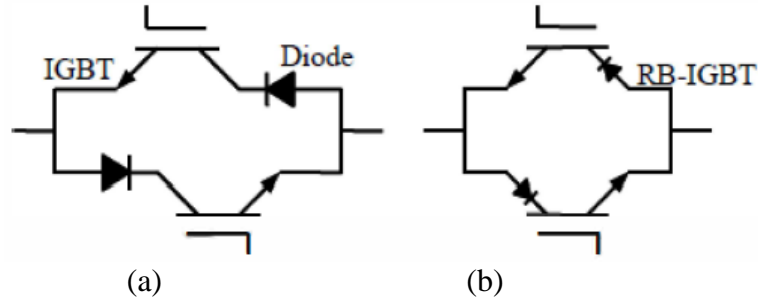


Şekil 2.23. T-NPC evirici için dördüncü bölge çalışma durumu [9].

2.2.3. AT-NPC Evirici

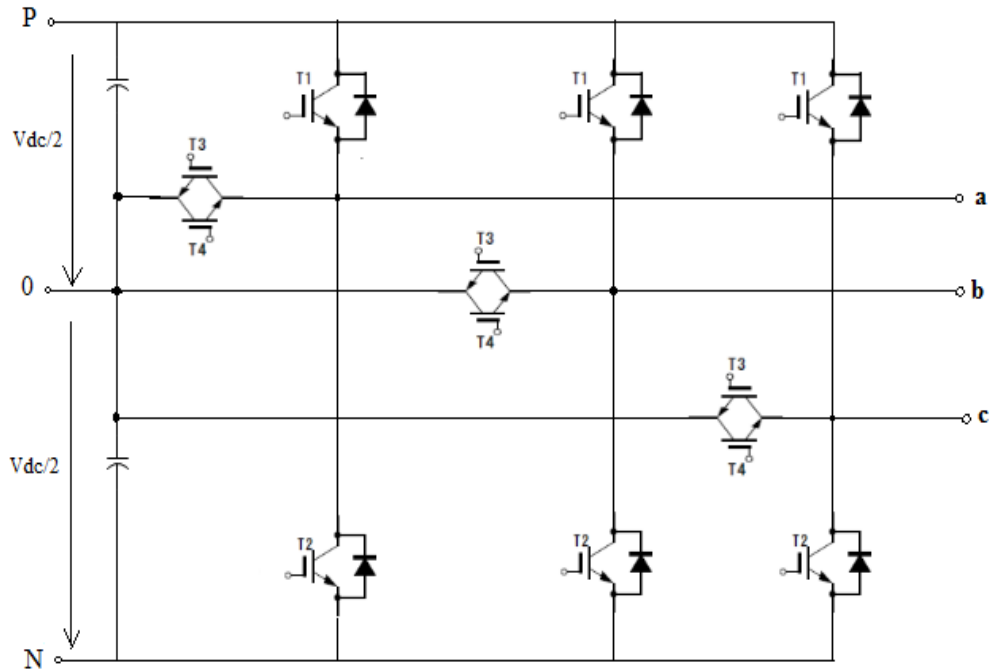
Son yıllarda güç elektroniği yarı iletkenlerindeki ilerleyiş güç dönüşümü konusunda kullanılan cihazların verimine önemli katkılar sunmuştur. Günümüze yakın dönemde 2L eviriciler pratik uygulamalarda sık tercih edilse de artık 3L NPC veya T-NPC gibi ÇSE'ler enerji verimliliği ve harmonik seviyesindeki gelişmeler nedeniyle daha popüler olmaya başlamıştır. Bunlar arasında da 3L T-NPC 2L ve klasik NPC'lerle kıyaslandığında daha iyi performansa sahip olduğu [25,36,37] nolu referanslarda verilmiştir.

3L T-NPC gibi eviricilerde kullanılan anahtarların AA'da hem ileri yön polarlamada hem de ters polarlamada belirli gerilimlere dayanabilmesi için Şekil 2.24a'da klasik IGBT'lerden oluşan bağlantı verilmiştir. Bu bağlantıda seri yol üzerinde iki adet yarı iletkenin bulunması iletim durumunda toplam gerilim düşümünü artırarak kayıpları yükseltir. Böyle bir bağlantıya alternatif olarak Şekil 2.24b'de verilen RB-IGBT fikri ilk 2001 yılında ortaya atılmıştır [37].



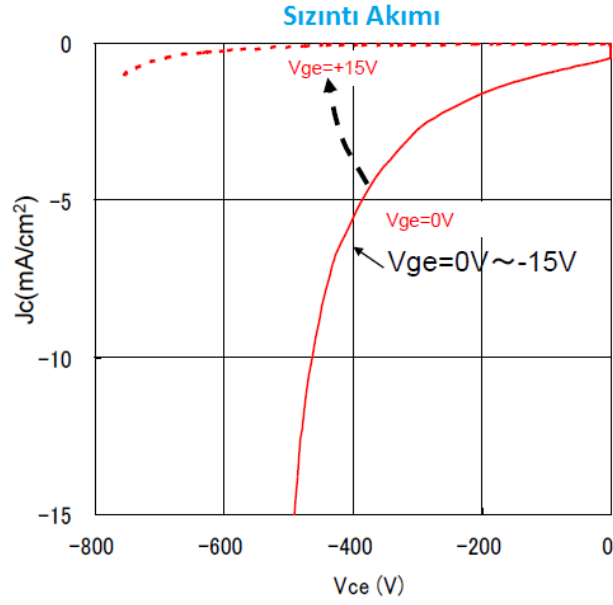
Şekil 2.24. a) klasik çift yönlü anahtar b) RB-IGBT.

3L T-NPC eviriciden sonra RB-IGBT kullanılarak daha verimli olan 3L AT-NPC tipi eviricisi geliştirilmiştir. Bu eviricinin 3-fazlı bağlantısı Şekil 2.25’deki gibidir.



Şekil 2.25. 3-fazlı 3L AT-NPC evirici yapısı.

Teorik olarak, kullanılan IGBT’lerin hem ters gerilim bloke etme hem de doğru gerilime dayanımının olduğu kabul edilir, fakat pratikte bu doğru değildir. Pratikte ters polarlama altında IGBT’den sızıntı akımı akmaktadır. RB-IGBT’nin klasik tip IGBT’lerden farkı sızıntı akımının daha düşük olmasıdır. Bu durumu sağlamak için Şekil 2.26’da görüldüğü gibi IGBT kapı (gate) ucuna +15V uygulanır [38,39].



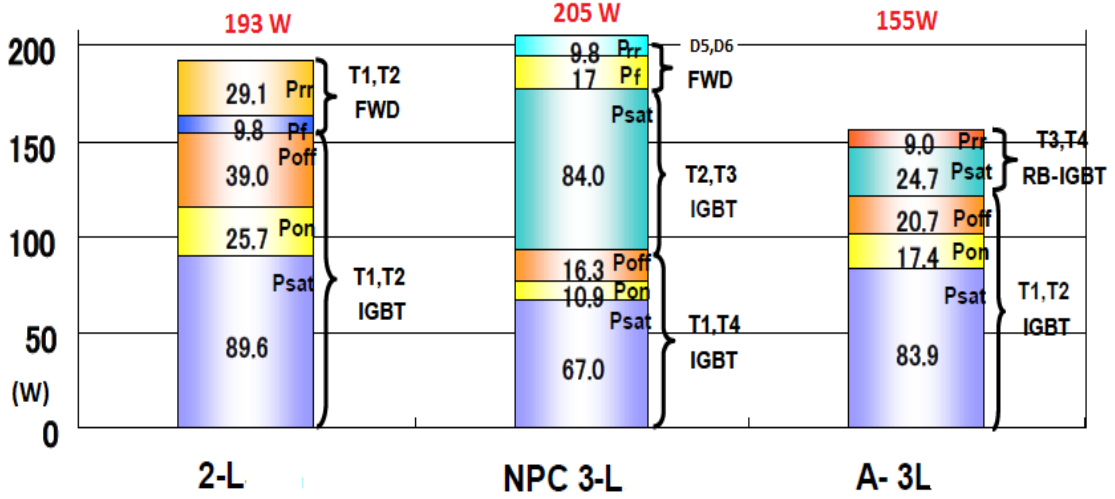
Şekil 2.26. RB-IGBT sızıntı akım değişimi.

Şekil 2.10’da verilen klasik tip NPC eviricide T2 anahtarı T4, T4 anahtarı T2 olarak adlandırıldığında AT-NPC eviricisi ile anahtarlama durumları Çizelge 2.3’de görüldüğü gibi aynıdır [40]. Bu da AT-NPC eviriciyi daha basit ve uygulanabilir yapmaktadır.

Çizelge 2.3. NPC ve AT-NPC eviricilerinin anahtarlama durumları.

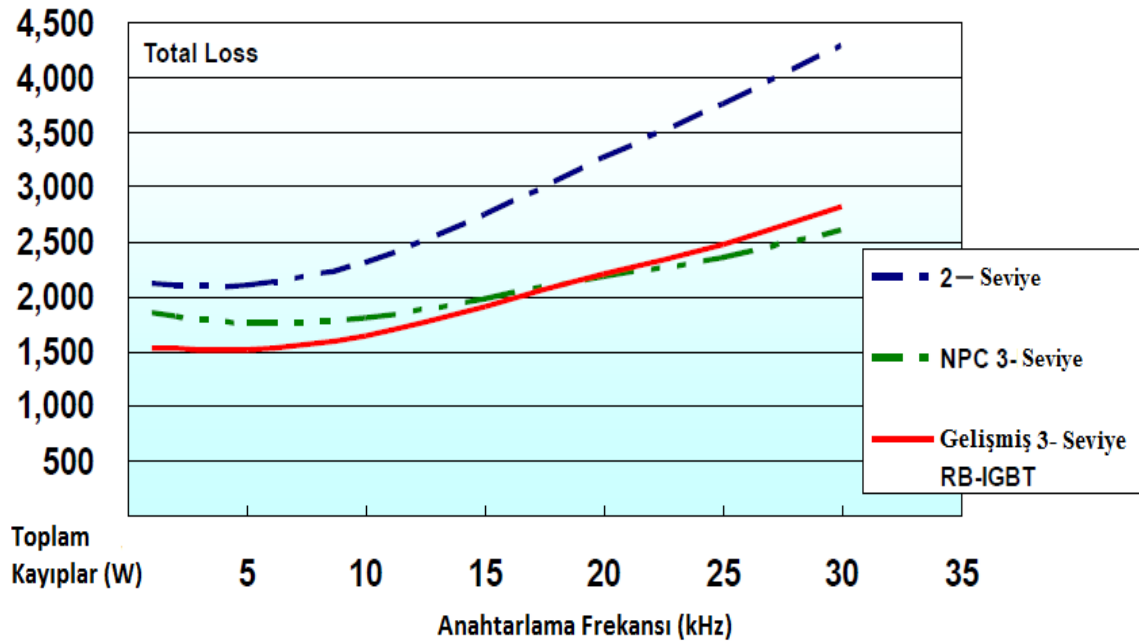
| Output V | Type | T1 | T2 | T3 | T4 |
|---------------------|--------|-----|-----|-----|-----|
| +V _{da} /2 | NPC | ON | OFF | OFF | ON |
| | AT-NPC | ON | OFF | OFF | ON |
| 0 | NPC | OFF | OFF | OFF | ON |
| | AT-NPC | OFF | OFF | OFF | ON |
| -V _{da} /2 | NPC | OFF | ON | ON | OFF |
| | AT-NPC | OFF | ON | ON | OFF |
| 0 | NPC | OFF | OFF | ON | OFF |
| | AT-NPC | OFF | OFF | ON | OFF |

Tüm özellikleri düşünüldüğünde AT-NPC eviricinin anahtarlama kayıplarının diğer eviriciler ile kıyaslaması Şekil 2.27’de verilmiştir. Bu şekilde verilen değerler 100kVA, 400 V_{aa}, 140A, cosφ=1 ve V_{da}=330V+330V olarak oluşturulmuş prototipten alınmıştır [40].



Şekil 2.27. AT-NPC eviricinin anahtarlama kayıplarının kıyası.

Anahtarlama kayıplarının ölçülmesi sırasında ölçüme etken birçok değişken vardır. Bunlardan biride anahtarlama frekansıdır. Şekil 2.28’de AT-NPC ile diğer evirici kayıplarının anahtarlama frekansı ile nasıl değiştiği verilmiştir. Verilen değerler 100kVA, 400 V_{aa}, 140A, cosφ=1 ve V_{da}=330V+330V olarak oluşturulmuş prototipden alınmıştır [41]. Şekilde görüldüğü üzere anahtarlama kayıpları 20 kHz seviyesine kadar diğer eviricilere göre AT-NPC’de daha azdır.



Şekil 2.28. AT-NPC eviricinin anahtarlama kayıplarının frekans ile değişimi

3. ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİ DENETİMİ

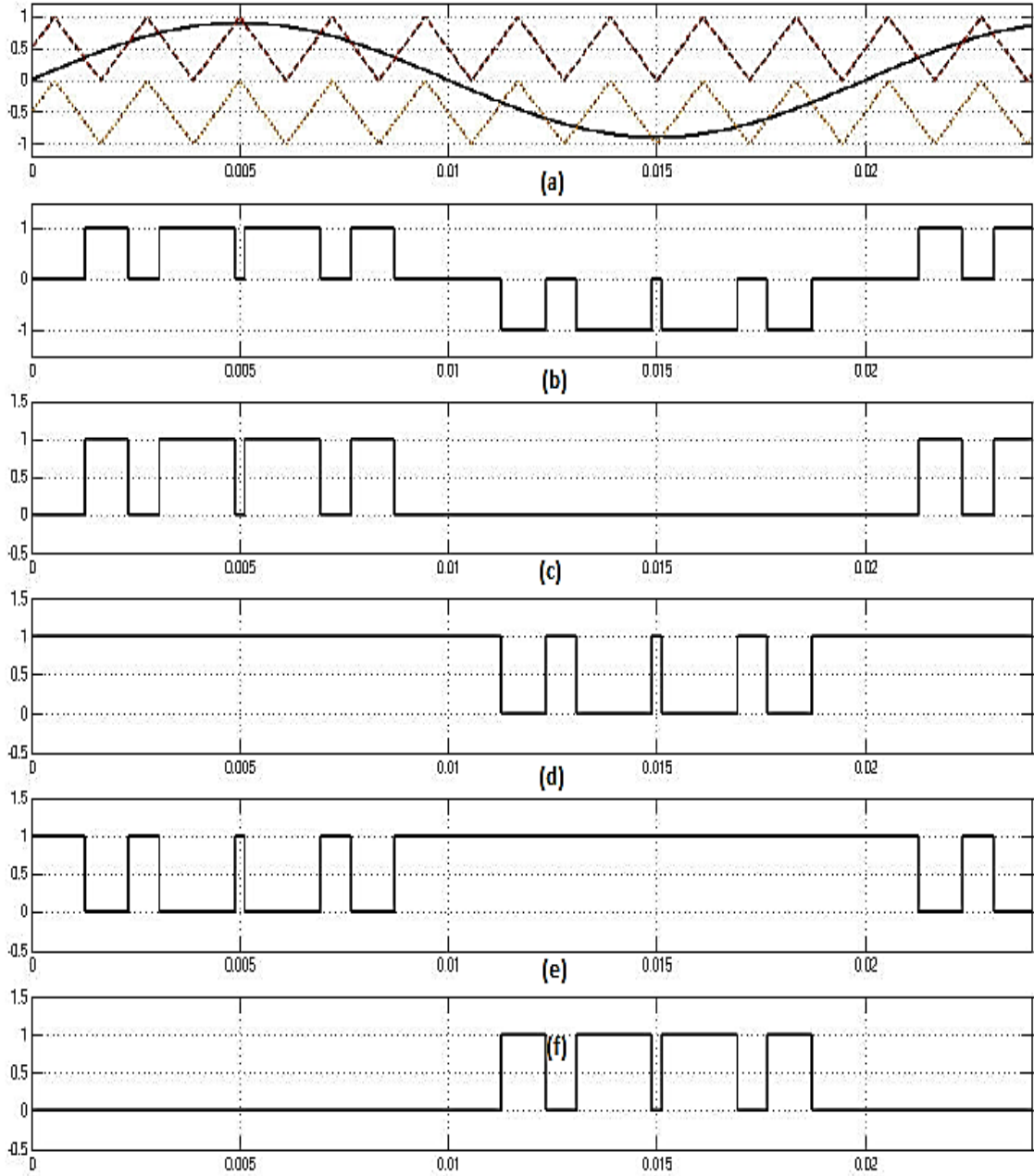
Literatürde Gerilim Kaynaklı Eviricilerin (GKE) akım denetimi için histerezis bant ve Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) tekniği gibi bir çok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan klasik histerezis bant akım denetim tekniğinde alt limit ve üst limit akım değerleri belirlenir. Evirici akımı ölçülür ve bu değer eğer alt limitin altında ise evirici çıkış gerilimini arttırmaya yönelik anahtarlamalar yaparak çıkış akımı artırılır. Eğer ölçülen akım değeri bant üst limit değerinden üstte ise evirici çıkış gerilimini azaltacak şekilde anahtarlamalar yaparak çıkış gerilimi ve dolayısıyla çıkış akımı azaltılır. Bu tekniğin basit ve gürbüz olması gibi avantajları vardır. Ancak, belirli limitler arasında akım kontrolü yapıldığından değişken anahtarlama frekansına sahip olur. Bu da evirici filtre tasarımının ve buna bağlı olarak da soğutucu tasarımının zorlaştırması gibi dezavantajlara neden olmaktadır. Literatürde anahtarlama frekansının sabit tutulmasını sağlayabilen adaptif histerezis bant denetim tekniği de geliştirilmiştir [42].

3.1. Genel Kontrol Şeması

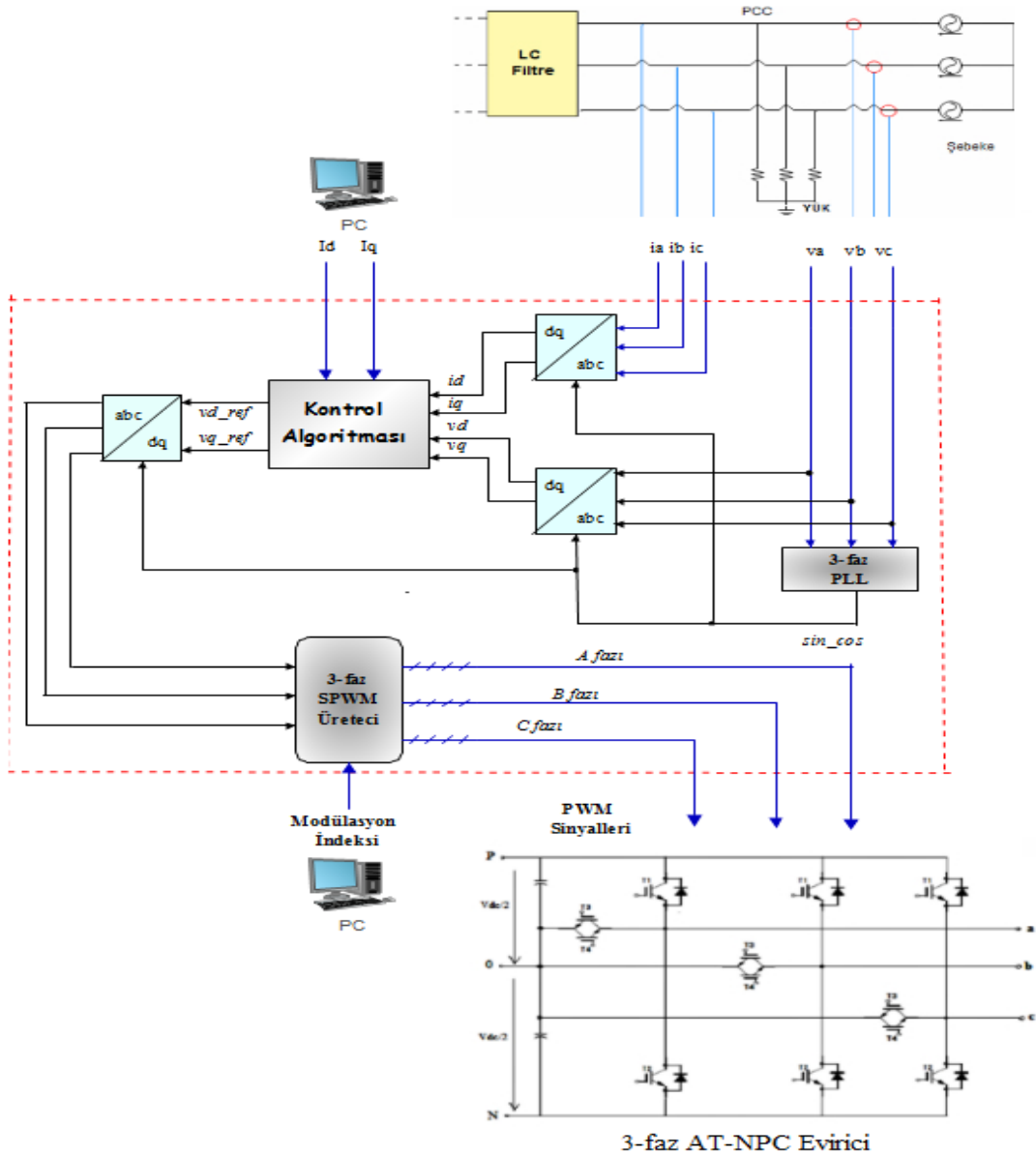
SDGM tekniği, en yaygın DGM tekniklerden biri olup uygulanması da basittir. Bu teknikte klasik oransal-integratör (PI) kontrol akım denetiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Anahtarlama sinyallerinin oluşumu için, kontrol algoritması sonucu oluşturulan referans sinüs sinyalinin tepe değeri bu işaretten daha büyük taşıyıcı üçgen dalga ile karşılaştırılır ve evirici denetimi sağlanır. ÇSE'ler için bu teknikte, evirici çıkış gerilim seviyesinin bir eksiği kadar taşıyıcı üçgen dalga sinyali kullanılarak anahtarlama sinyalleri oluşturulur. Şekil 3.1'de 3-seviyeli evirici için anahtarlama sinyalleri ve oluşturulma şekli verilmiştir.

Şebeke bağlantılı eviricilerde uygulanan kontrol stratejisi genellikle iki adet birbirine seri bağlı döngüden oluşmaktadır. Böyle bir kontrol algoritması, şebeke akımını ayarlayan bir iç akım döngüsünden ve DA bara gerilimini ayarlayan bir dış gerilim döngüsünden oluşur.

Bu tez çalışmasında şebeke bağlantılı 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli evirici için kullanılan kontrol tekniğinin blok diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir. Burada eviricinin şebeke bağlantısı için PLL ve akım denetiminde ise Senkron Referans Çerçeve (SRÇ) yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler tezin bir sonraki başlıkları altında kısaca incelenecektir.



Şekil 3.1. 3-seviyeli eviricide anahtarlama sinyalleri için a) modülasyon b) çıkış gerilim değişimi c), d) pozitif gerilim anahtarları e), f) negatif gerilim anahtarları anahtarlama sinyalleri.

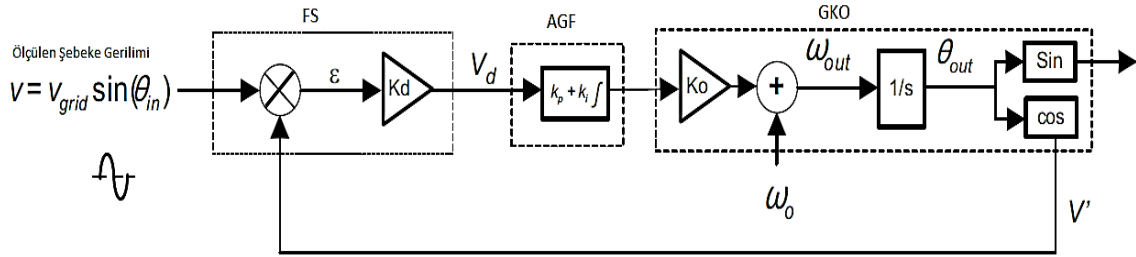


Şekil 3.2. 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin kontrol blok diyagramı.

3.2. PLL Yapısı

Şebekenin faz, genlik ve frekans değerleri şebeke bağlantılı evirici sistemlerinde kritik parametrelerdir. Bu tür uygulamalarda, IEEE 1547 gibi standartların gereksinimlerini yerine getirecek, eviricinin çalışması için gerekli referans sinyallerin üretilmesinde şebekenin faz açısının, genliğinin ve frekansının hızlı ve doğru bir şekilde saptanması büyük önem arz etmektedir. Tüm bunlar için şebeke gerilimi ile evirici akımlarının senkronize olmasını sağlayacak ve literatürde sık kullanılan PLL ve Sıfır Geçiş Tespiti (SGT) yöntemleri vardır [43].

Bu tez çalışmasında şebeke senkronizasyonu için temel yapısı Şekil 3.3’de verilen PLL tekniği kullanılmıştır. Bu yapı Faz Saptayıcısı (FS), Alçak Geçiren Filtre (AGF) ve Gerilim Kontrollü Osilatör (GKO)’den oluşmaktadır.



Şekil 3.3. PLL temel yapısı.

Ölçülen şebeke gerilimi, şebeke frekansına (w_{grid}) bağlı olarak (3.1) denkleminde verildiği gibi yazılabilir.

$$V = v_{grid} \sin(\theta_{in}) = v_{grid} \sin(w_{grid}t + \theta_{grid}) \quad (3.1)$$

GKO'nun şebeke sinüzoidal dalga şekline yakın bir sinüs sinyal ürettiği varsayılarak GKO'nun çıkışı (3.2) denkleminde verilmiştir.

$$v' = \cos(\theta_{out}) = \cos(w_{PLL}t + \theta_{PLL}) \quad (3.2)$$

FS bloğunun amacı girişindeki sinüs işareti ile GKO'dan alınan kenetlenilmiş sinüs işaretini kıyaslamak ve faz açısı hatasıyla orantılı hata sinyali üretmektir. Bunun için FS bloğu GKO'nun çıkışı ile ölçülen şebeke gerilimini çarparak (3.3) denklemindeki ifade elde edilmektedir.

$$v_d = \frac{K_d}{2} v_{grid} [\sin((w_{grid} - w_{PLL})t + (\theta_{grid} - \theta_{PLL})) + \sin((w_{grid} + w_{PLL})t + (\theta_{grid} + \theta_{PLL}))] \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'de FS'nin kenetlenme hatasını içerdiği görülmektedir. Fakat bu hata bilgisi FS'de doğrusal değildir ve şebeke frekansının iki katında bileşene sahiptir. PLL açısına kenetlenmek için kullanılacak FS hata bilgisindeki şebeke frekansının iki katı olan bileşen yok sayılmalıdır. Bu durumda kenetlenme hatası (3.4) denkleminde verildiği gibi olmaktadır.

$$\overline{v_d} = \frac{K_d}{2} v_{grid} \sin((\omega_{grid} - \omega_{PLL})t + (\Theta_{grid} - \Theta_{PLL})) \quad (3.4)$$

Sürekli hal durumunda küçük Θ değerlerinde $\sin(\Theta) \sim \Theta$ olduğundan $\omega_{grid} - \omega_{PLL}$ ifadesi yok sayılabilir. Bu durumda doğrusallaştırılmış hata sinyali (3.5) denklemindeki gibi elde edilir.

$$\text{hata} = \frac{v_{grid}}{2} (\Theta_{grid} - \Theta_{PLL}) \quad (3.5)$$

Bu hata PI kontrolör olarak kullanılan AGF'nin girişidir. Bundan sonra kapalı çevrim transfer fonksiyonu kolayca elde edilebilen PLL için Notch filtre gibi literatürde bulunan çeşitli teknikler PLL yapısının performansını iyileştirmek ve adaptasyonunu arttırmak için uygulanabilir [44].

3.3. Senkron Referans Çerçeve Yöntemi

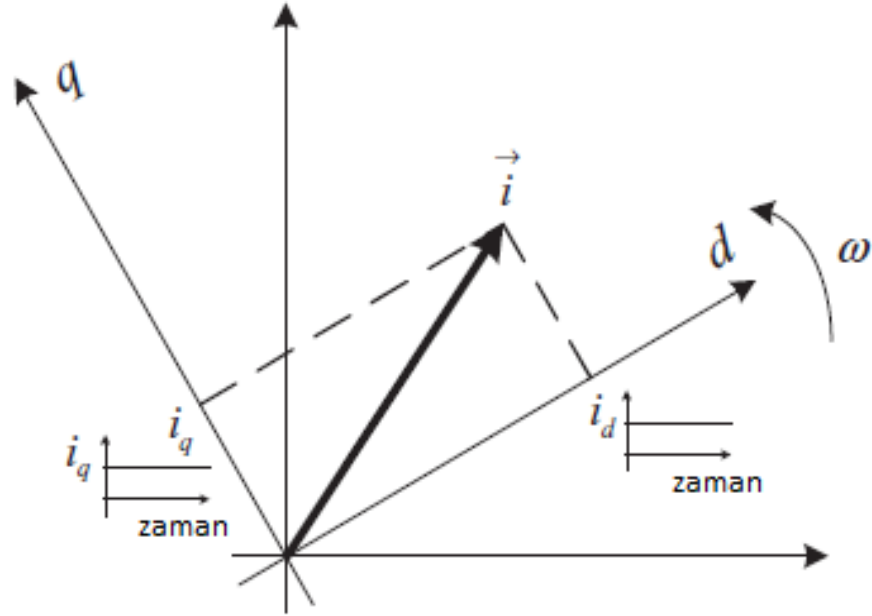
Dengeli 3-fazlı sistemlerde sadece iki tane bağımsız akım ve gerilim olduğunda üçüncü akım ve gerilim diğer ikisine bağlı olarak elde edilebilir. Buda 3-fazlı bir sistemi farklı 2-fazlı sisteme çevirerek AA akım ve gerilimlerle işlem yapmak yerine DA ifadelerle işlem yapma olanağı tanır.

SRÇ veya $dq0$ yöntemi olarak da bilinen bu teknikte durağan a , b ve c fazları w gibi bir açısal hızla hareket eden d ve q eksenlerine dönüştürülür. 3-fazlı dengeli sistemde 3-fazın toplamı sıfır olduğundan dengeli sistemlerde sadece d ve q eksenleri gösterilebilir. Bu durum Şekil 3.4'de ifade edilmiştir. Dönüşümün elde edilmesi için ise (3.6)-(3.8) denklemleri kullanılmaktadır. Burada verilen gerilim dönüşümünün aynısı akımlar içinde uygulanabilir.

$$V_d = \frac{2}{3} (V_a \sin(\omega t) + V_b \sin(\omega t - 2\pi/3)) + V_c \sin(\omega t + 2\pi/3)) \quad (3.6)$$

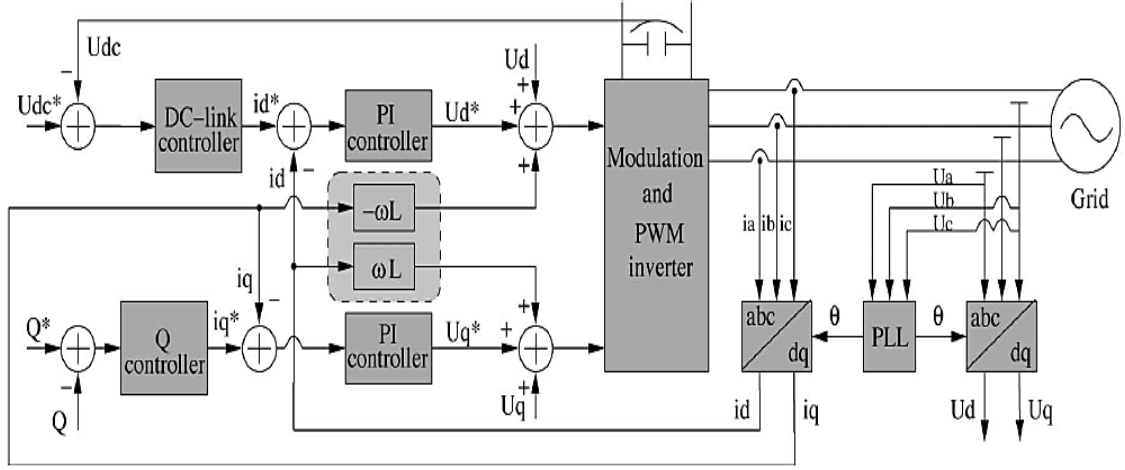
$$V_q = \frac{2}{3} (V_a \cos(\omega t) + V_b \cos(\omega t - 2\pi/3)) + V_c \sin(\omega t + 2\pi/3)) \quad (3.7)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (3.8)$$



Şekil 3.4. SRÇ yönteminin vektörel gösterimi.

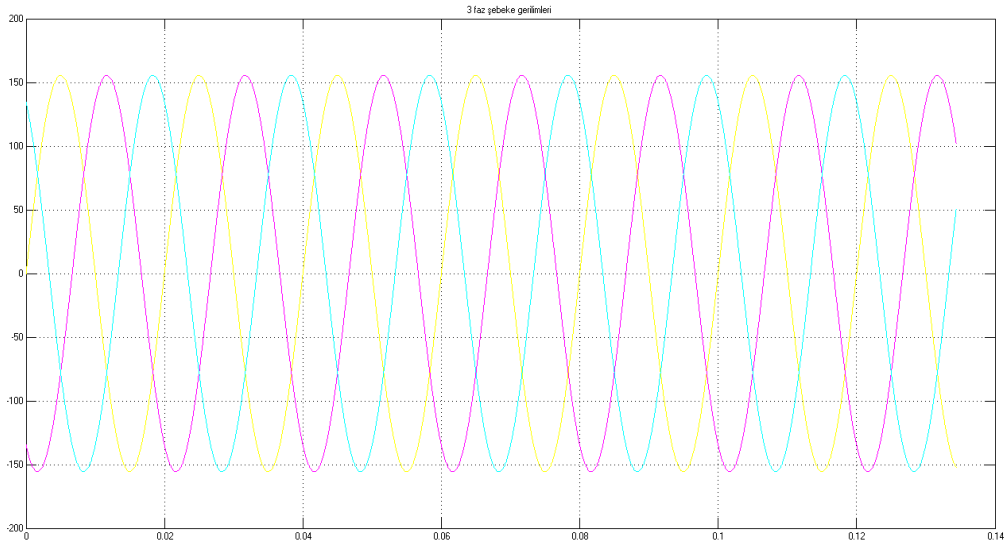
Bu çalışmada SRÇ yöntemiyle 3-fazlı AA değişkenler farklı 2 fazda DA bileşenlere dönüştürülerek tüm sistemin kontrolü kolaylaştırılmıştır. Ayrıca SRÇ yöntemiyle beraber ayrıştırma yöntemi uygulanmış ve sistem doğrusal hale gelmiştir. Şekil 3.5’de verilen blok diyagramda SRÇ yöntemi hem evirici sonrasındaki filtre akımları hem de şebeke gerilimleri için kullanılmış olup ardından doğrusal PI kontrolcü ile akım kontrolü sağlanmıştır. Bu diyagramda DA-bara gerilimi kontrol edilirken tez çalışmasında DA-bara gerilimi sabit kabul edildiği için işlem yükünü azaltmak amacıyla algoritmada kullanılmamıştır.



Şekil 3.5. SRÇ tabanlı PI kontrolcü ile akım denetiminin blok diyagramı [45].

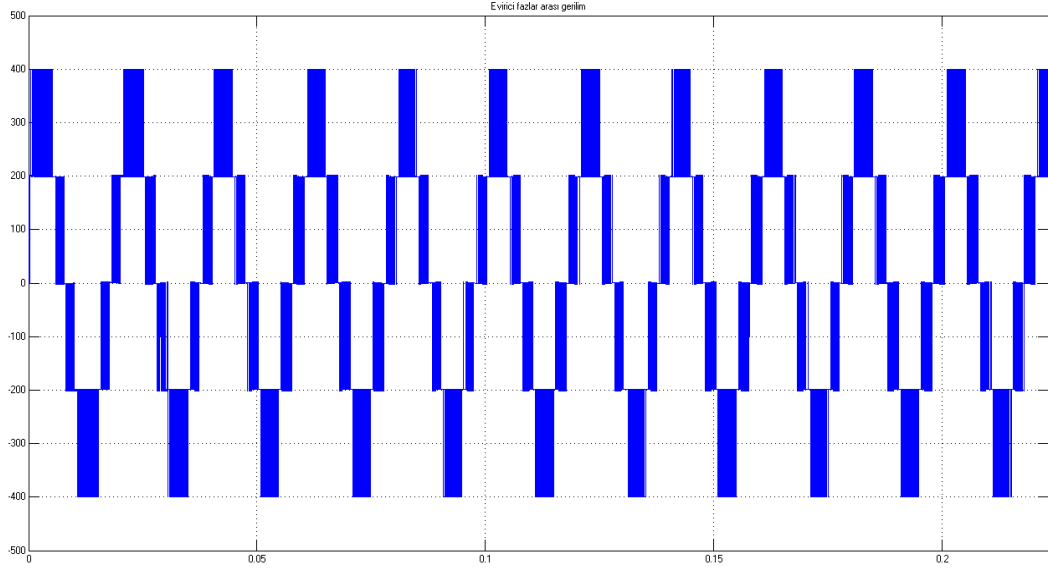
3.4. Benzetim Çalışmaları

Bu tez çalışmasında tasarlanan sistemin bilgisayar destekli benzetimi MATLAB/Simulink yardımı ile yapılmıştır. Uygulaması gerçekleştirilecek olan evirici prototipinin tüm parametre ve değerleri tümüyle Simulink ortamına aktarılarak alınan benzetim sonuçları incelenmiştir. Şekil 3.6'da benzetim çalışmasında kullanılan 3-fazlı şebekenin gerilim dalga şekli verilmiştir.



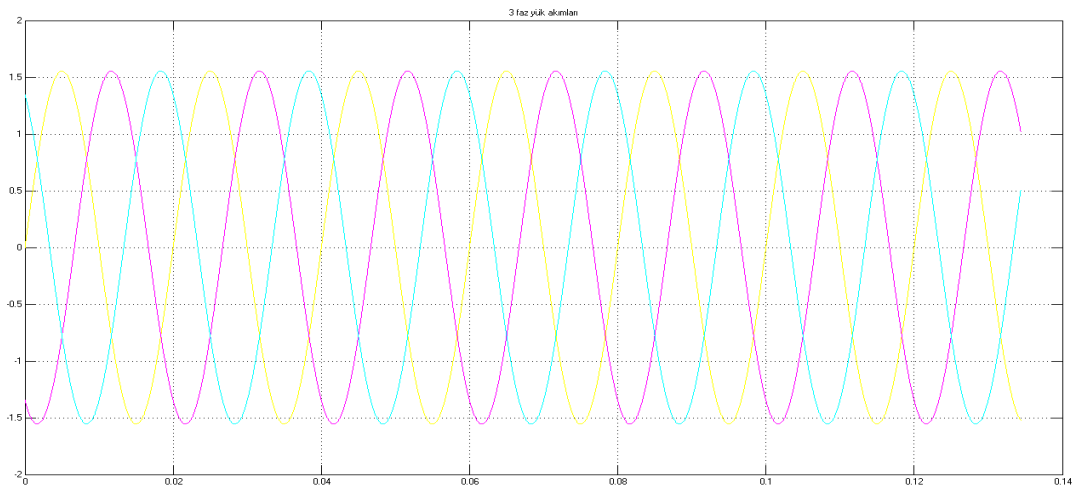
Şekil 3.6. 3-fazlı şebeke gerilimleri

DA tarafından 400 V gerilim uygulanan 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin filtre öncesindeki fazlar arası gerilim dalga şekli Şekil 3.7’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi evirici çıkışında 3 seviye oluşmuştur.

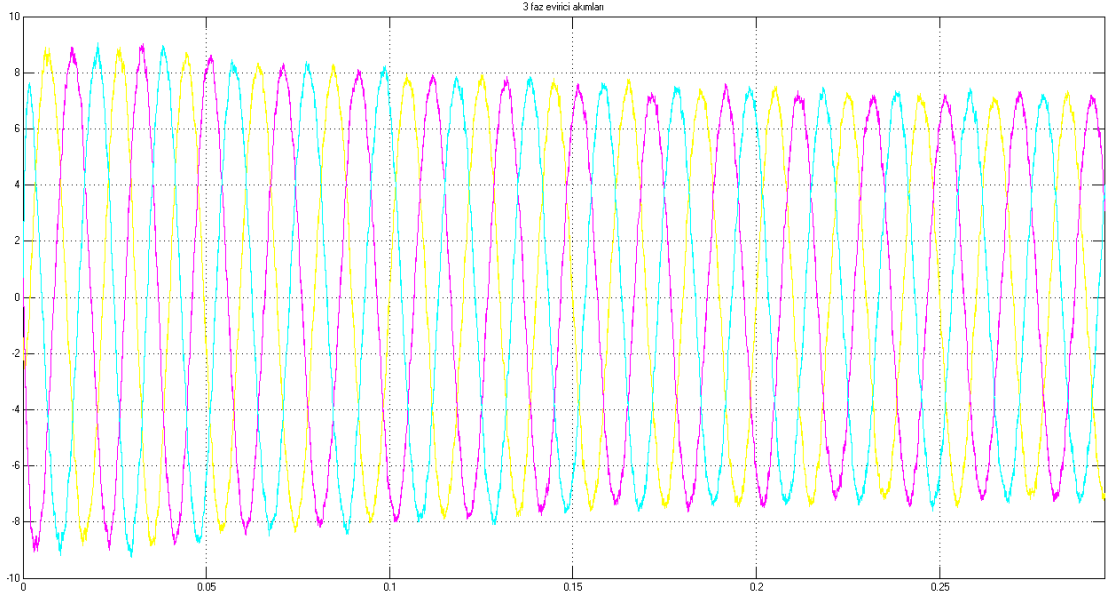


Şekil 3.7. 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin fazlar arası çıkış gerilimi.

Referans akım tepe değeri 7A olarak girilen eviriciye bağlı olan 100 ohm’luk dirençlerden geçen akımlar Şekil 3.8’de verilmiştir. Şekil 3.9’da ise evirici çıkış akımları verilmiştir. Evirici çıkış akımı Şekil 3.9’dan görüldüğü üzere 7A olan referans değerine oturmuştur.

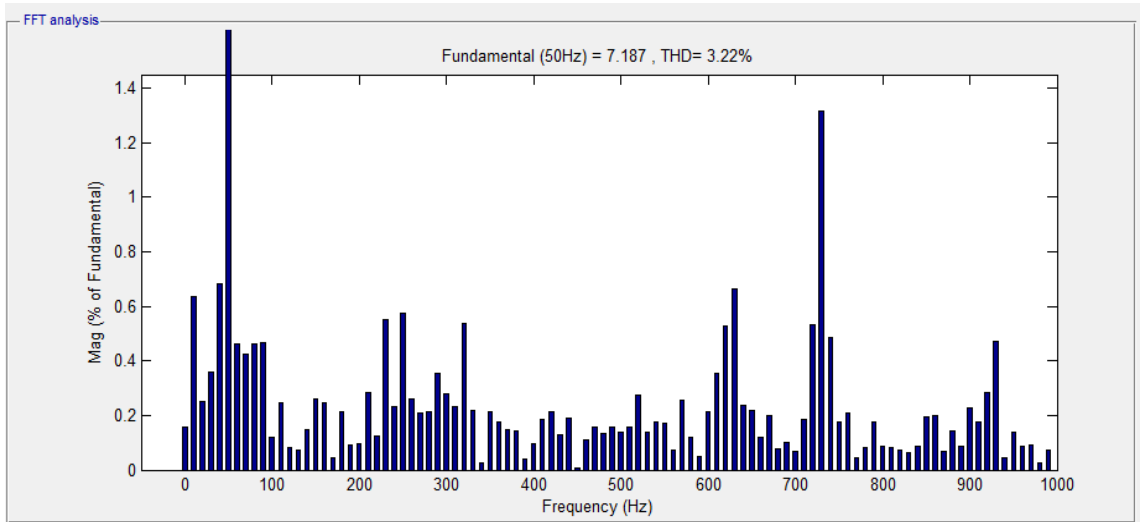


Şekil 3.8. 3-faz yük akımları.



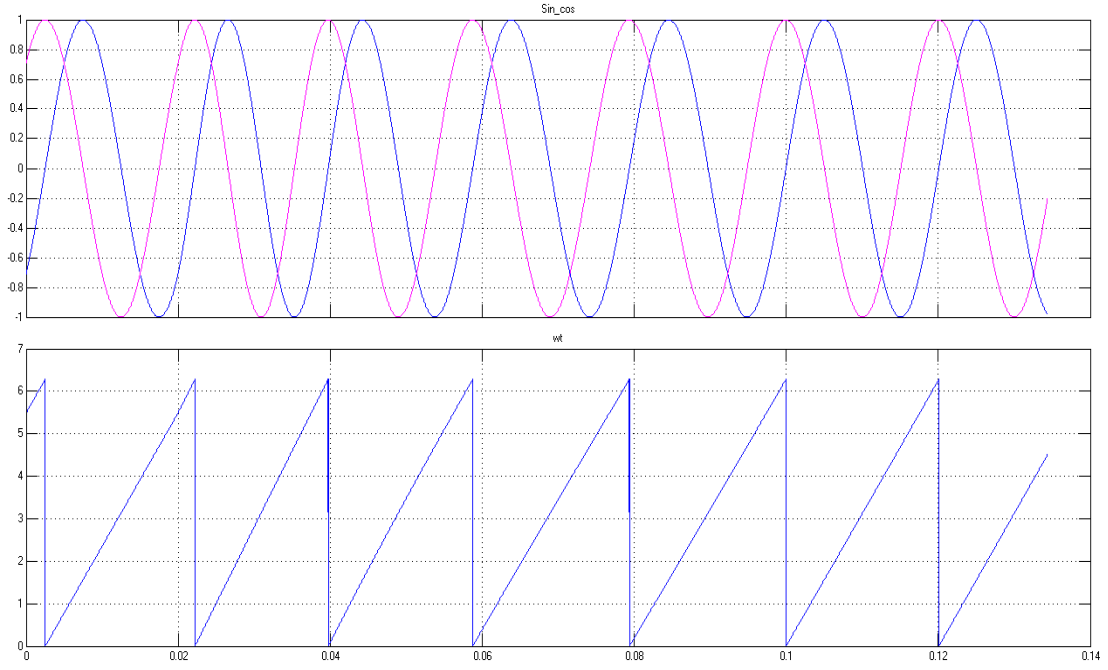
Şekil 3.9. 3-fazlı AT-NPC tipi 3-seviyeli evircinin akımları.

Şebeke bağlantılı evircilerde üretilen gücün kalitesinde önemli bir kriter olan THB'nin incelenmesi amacıyla evirci akımlarının harmonik analizi yapılarak Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi THB değeri %3,22 civarındadır.



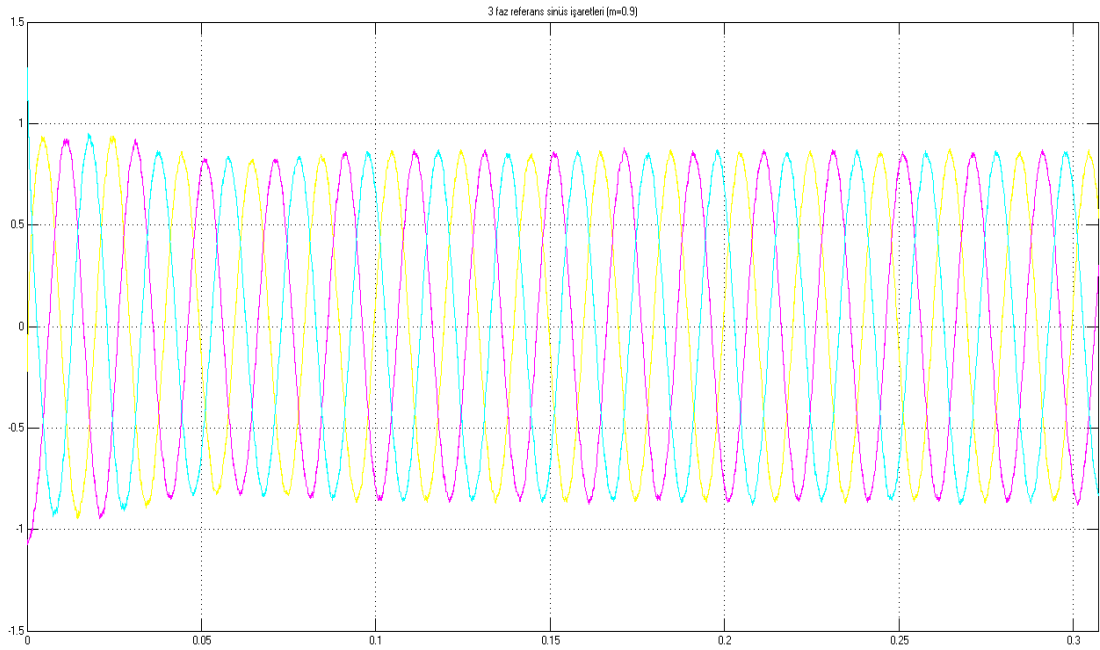
Şekil 3.10. Evirci akımlarının harmonik analizi.

Evircinin şebeke senkronizasyonunu sağlayan PLL çıkışındaki wt ve \sin_cos değerleri bu yapının çalışmasındaki doğruluğu gözlemlenmek açısından önemlidir. Şekil 3.11'de benzetim çalışmasındaki PLL bloğunun çıkışındaki \sin_cos ve wt değerleri verilmiştir.



Şekil 3.11. PLL çıkış sin_cos ve wt parametre değişimleri.

Eviricinin istenilen referansı takip etmesini sağlamak amacıyla üretilen referans sinyaller modülasyon indeksi (m) 0,9 için Şekil 3.12’de verilmiştir.



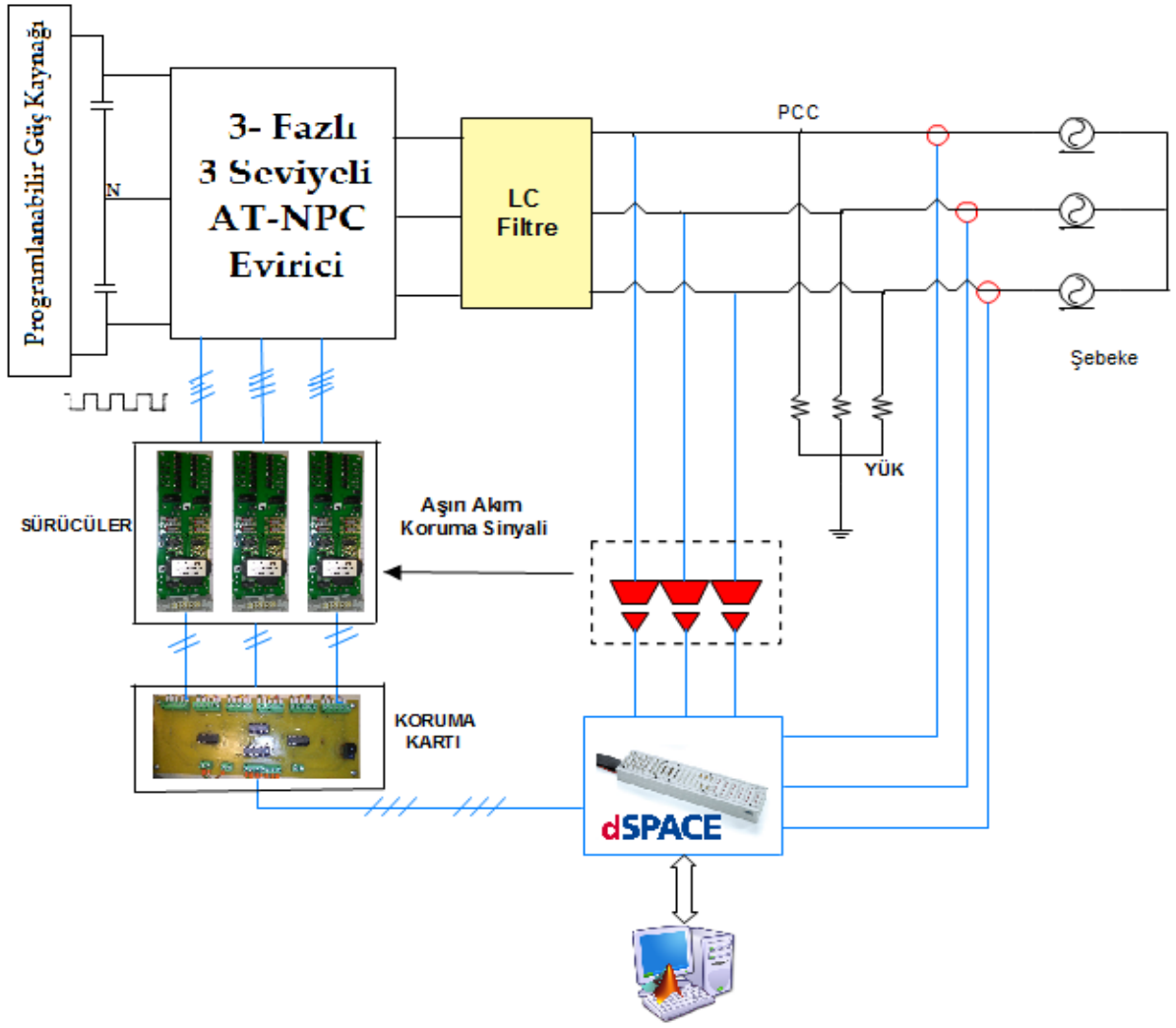
Şekil 3.12. Üretilen referans sinüs sinyalleri.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde daha önce teorik hesaplamaları ve MATLAB/Simulink ile benzetim çalışmaları yapılan 3-fazlı şebeke bağlantılı AT-NPC tipi 3-seviyeli evirici devresinin gerçekleştirilmesi, deneysel çalışmada kullanılan kontrolcü, yarı iletken elemanlar, sürücüler, ölçüm ve koruma devreleri açıklanmıştır. Ardından deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar verilmiştir.

4.1. DENEYSEL KURULUM

Deneysel sistemin blok diyagramı Şekil 4.1’de gösterilmiştir. DA-barada yenilenebilir enerji kaynağını temsilen Chroma firmasının 62050H-600S model programlanabilir DA güç kaynağı kullanılmıştır. DA-barada bulunan 2 adet 450V, 2200 μ F kondansatörle ile evirici çıkışında 3 seviye oluşması için gerekli nötr noktası elde edilmiştir. Evirici çıkışında akım harmoniklerinin minimum düzeyde tutulmasını sağlamak için LC filtre kullanılmıştır. Filtre sonrasında evirici akımının geri beslemesi için her fazın akım sinyalleri ortak bağlantı noktasından (Point of Common Coupling, PCC) önce Hall etkili izole akım sensörleriyle alınmıştır. Şebeke senkronizasyonu için gerekli olan şebeke gerilimleri ise Hall etkili izole gerilim sensörleri yardımıyla ölçülmüştür. Bu akım ve gerilim sinyalleri uygulamada kontrolcü olarak kullanılan dSPACE DS1103’e alınarak, kontrol algoritmaları sonucu üretilen anahtarlama sinyalleri koruma kartı ve ardından da sürücü devrelerinden geçirilerek IGBT’lere uygulanmıştır. Böylece sisteme girilen referans akım sinyalleri evirici çıkışında üretilmiştir. Evirici akımları, 3-fazlı dengeli omik yükün şebeke gerilimi altında çekeceği akım değerinden büyük olduğu durumlarda evirici akımı PCC noktasından ikiye ayrılarak, yükün fazlası olan akım değeri şebekeye aktarılmıştır.

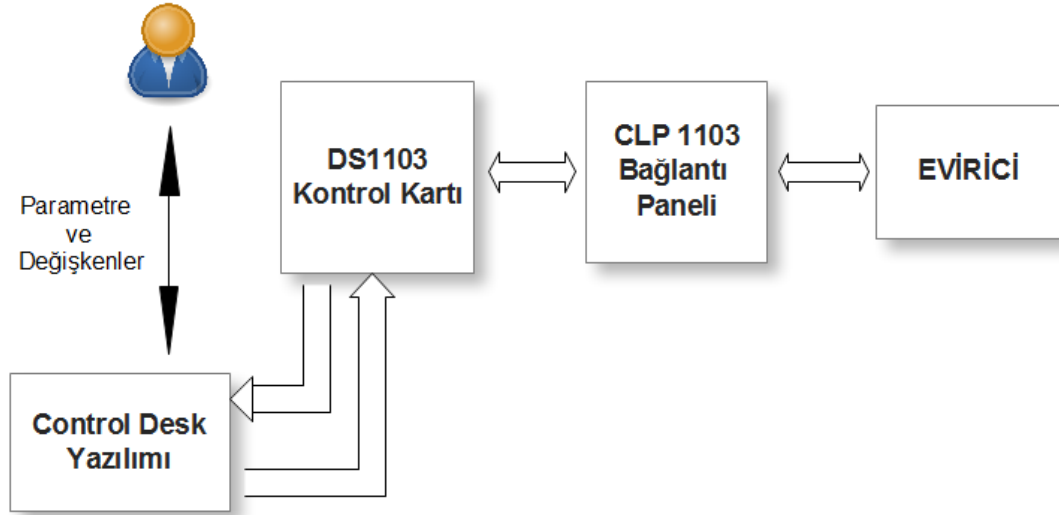


Şekil 4.1. Uygulama sisteminin genel blok diyagramı.

4.1.1. DSPACE Tabanlı Kontrolcü

3-fazlı şebeke bağlantılı AT-NPC tipi eviricinin gerçek zamanlı kontrolü dSPACE DS1103 kontrol kartı ve CLP1103 bağlantı paneli ile yapılmıştır. 20 adet $\pm 10V$ giriş aralığında ADC (analogdan dijitale dönüştürücü), 8 adet DAC (dijitalden analoğa dönüştürücü), CAN ve seri haberleşme ara yüzü ile bağlantı ledleri olan CLP1103 paneli, DS1103 kontrol kartı ile gerçek dünya arasındaki bağlantıyı sağlamaktadır. Şekil 4.2’de bu bağlantılar blok diyagramlarıyla gösterilmiştir. Kontrol kartı ise gerekli algoritmaların yürütülmesi için PowerPC 750GX ve TMS320F240 mikroişlemcilerini içermektedir. Gerekli kontrol algoritmaları MATLAB/Simulink ortamında geliştirildikten sonra gerçek zamanlı çalışma için DS1103 kartına ait gerçek zamanlı uygulama (RTI) modülleri Real-Time Workshop kütüphanesinden eklenmiştir. Böylece

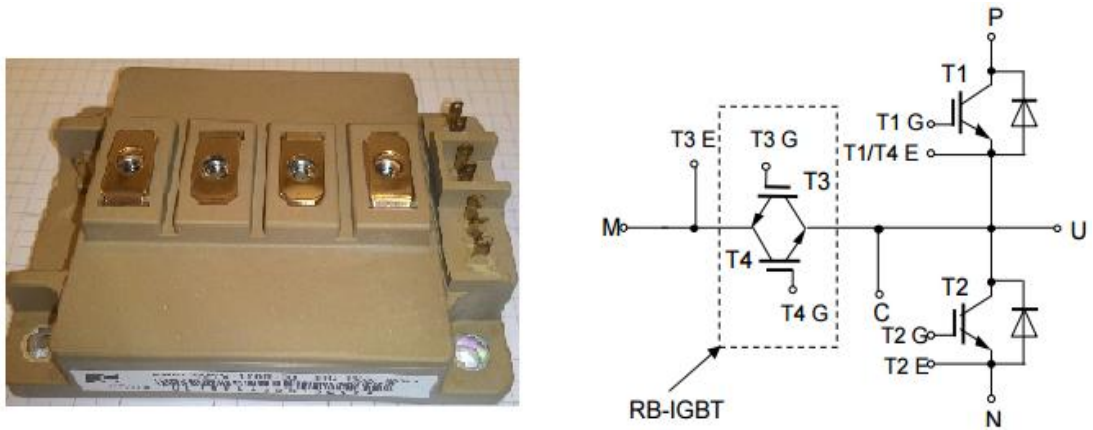
dSPACE'e ait ControlDesk programına geçerek bu program yardımıyla dış dünyadan alınan veriler ve algoritmadaki bazı değişkenler gerçek zamanlı gözlemlenebilmektedir.



Şekil 4.2. DSPACE bağlantı blok diyagramı.

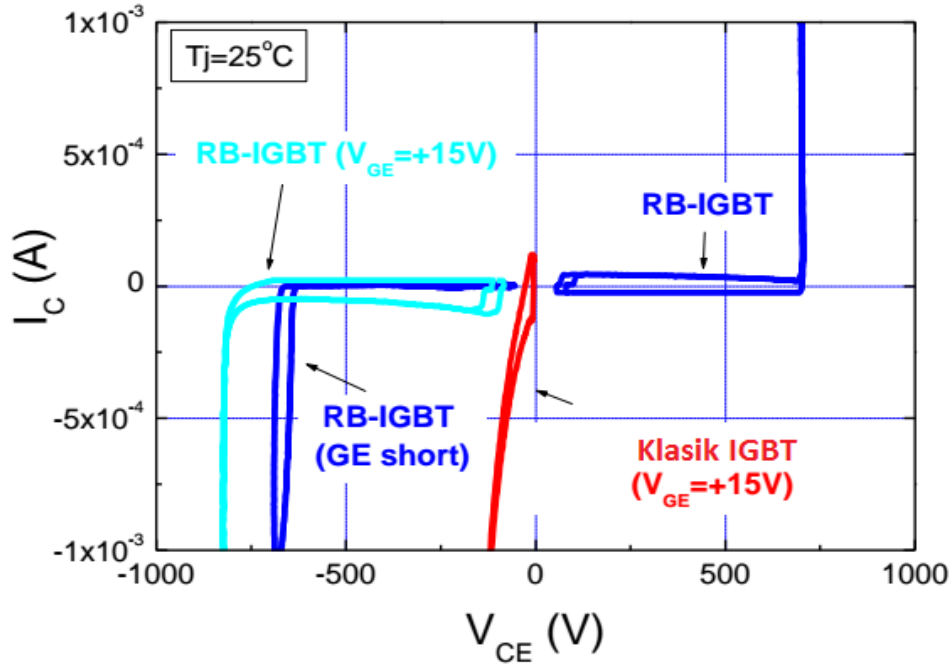
4.1.2. Yarı İletken Anahtarlar

Güç elektroniği devrelerinin birçoğunda kullanılan yarı iletken anahtarların verimleri tüm sistem veriminde önemli hale geldiğinden, bu uygulamada yüksek verimli Fuji Electric firmasına ait Şekil 4.3'de eşdeğer devresiyle verilen 4MBI300VG-120R-50 yarı iletken anahtar modülü kullanılmıştır. Her faz için bir adet kullanılan bu modülün içerisinde 2 adet 1200V, 300A değerlerinde klasik IGBT (T1, T4) ve 2 adet 600V, 300A değerinde ters bloke özelliikli IGBT (RB-IGBT) (T2, T3) vardır.



Şekil 4.3. IGBT modülü ve eşdeğer devresi.

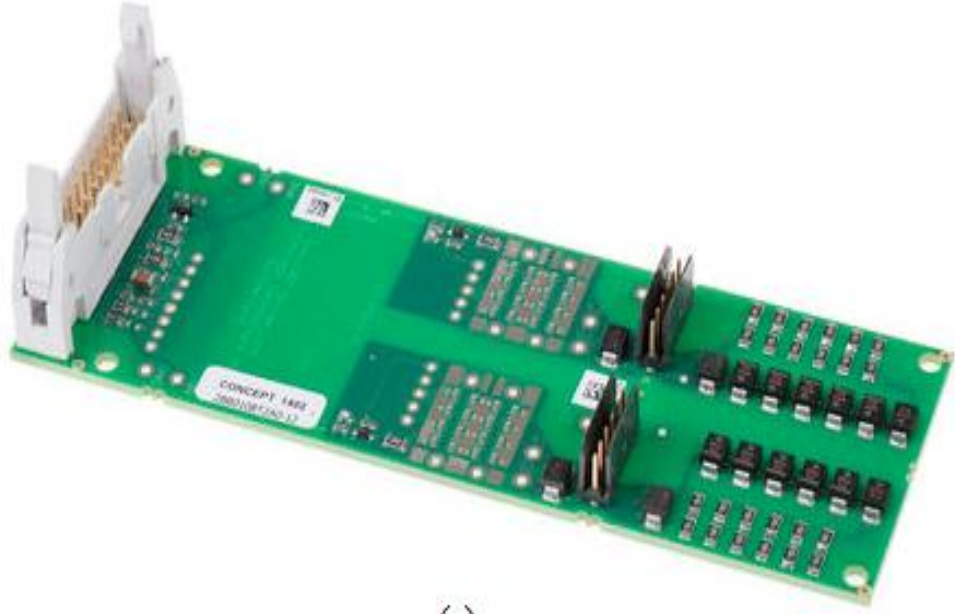
Kullanılan RB-IGBT'ler klasik tiplerden farklı olarak kendisine paralel bir diyot içermez, böylece iletim durumunda gerilim düşümleri az olacağından iletim kayıpları daha azdır. Ek olarak, Şekil 4.4'de görüldüğü gibi gerilim bloke dayanımları daha yüksektir, bu nedenle evirici bara gerilimi daha yüksek uygulamalarda kullanılabilir. Ayrıca bu modülün orta kısmında yer alan anahtarlar (T2, T3) Serbest Geçiş Diyodu (SGD) olarak kullanılırken gate-emiter arasına +15V gerilim uygulandığında sızıntı akım (leakage current) değeri düşük olur. Böylece kayıplar klasik IGBT'li modüllere göre daha azdır.



Şekil 4.4. Klasik ve RB- IGBT'lerin gerilim dayanım grafiği.

4.1.3. IGBT Sürücü Kartları

Kontrolcü çıkışından alınan DGM sinyallerinin IGBT modüllerine uygulanabilmesi için sürücü devreler kullanılmaktadır. Bu çalışmada Şekil 4.5'de görülen Concept firmasının Scale-2 serisi 2SC0108T sürücüsü ve bu sürücü için 2BB0108T sürücü ara yüz kartı kullanılmıştır. Çift kanallı ve kompakt yapıdaki bu sürücü 600A/1200V yada 450A/1700V üst sınırına kadar olan genel IGBT'ler için uygundur.



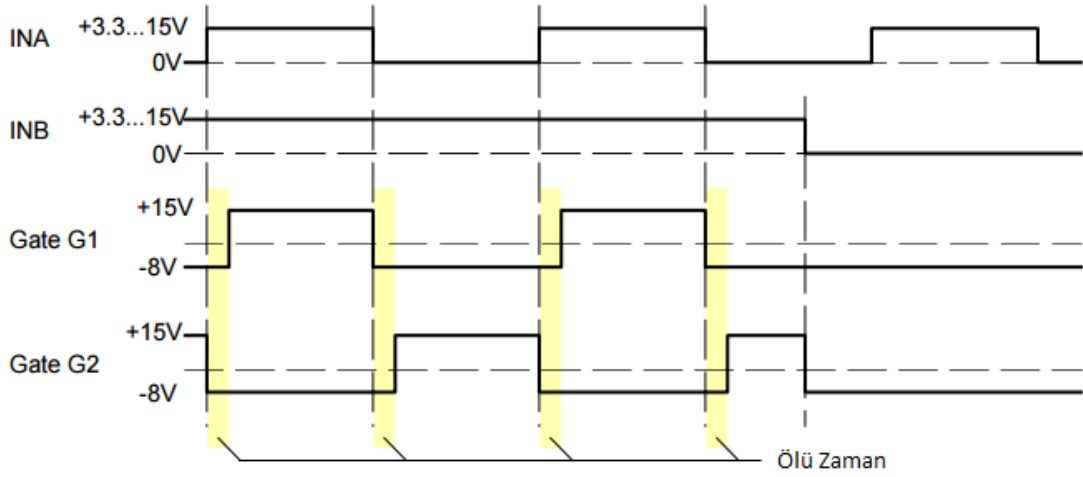
(a)



(b)

Şekil 4.5. Kullanılan a) ara yüz kartı b) sürücü

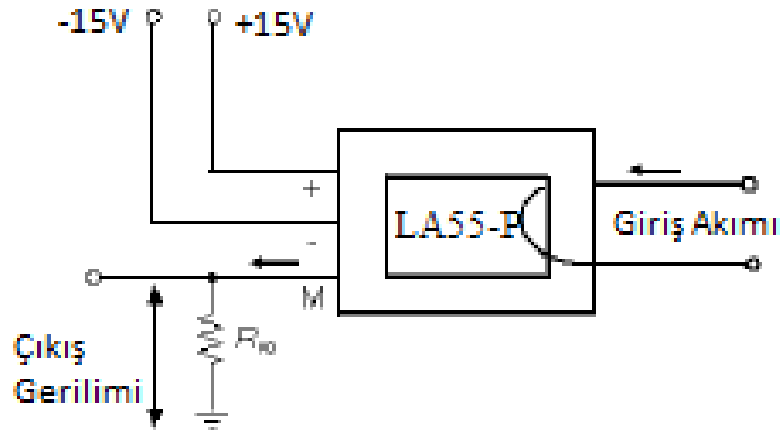
Ayrıca bu sürücü direkt mod (Direct Mode) ve yarım köprü modu (Half-Bridge Mode) olarak iki farklı çalışma moduna sahiptir. Direkt modda INA ve INB girişlerinin birbirleriyle ilişkisi yoktur; INA sadece Kanal 1'i, INB Kanal 2'yi etkilemektedir. Şekil 4.6'da ise yarım köprü çalışma modu verilmiştir. Bu modda INA girişi sinyal girişi olarak davranırken INB ise etkinleştirme (enable) girişi olarak davranır. INB girişi düşük seviyeye çekildiğinde tüm kanallar bloke edilirken, yüksek seviye konumunda INB giriş sinyalinin tersi ve ölü zamanlı durumu diğer kanala verilir. Deneysel uygulamada yarım köprü çalışma modu kullanılarak T1 ve T2 sinyalleri sürücü girişlerine verilerek T1, T2, T3 ve T4 IGBT'leri için sinyaller alınmıştır. INB girişi ise aşırım akım koruması için kullanılmıştır.



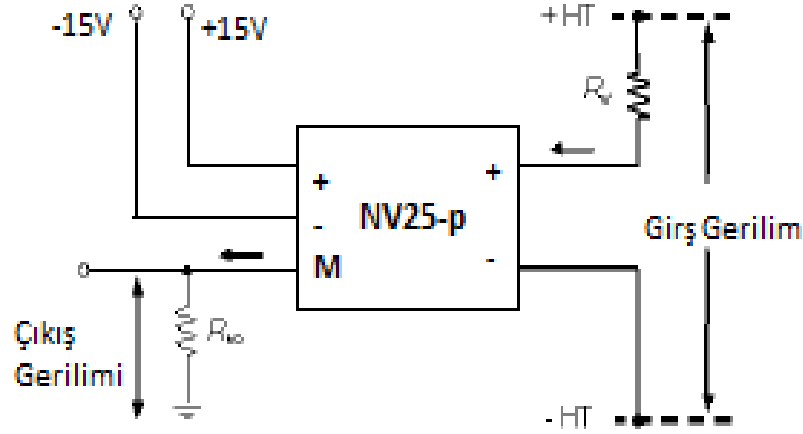
Şekil 4.6. Sürücü yarım köprü çalışma modu sinyalleri.

4.1.4. Akım Ve Gerilim Sensörleri

Uygulamada 3-faz evirici akımının ölçülmesi için galvanik izolasyonlu Hall etkili LEM LA55P akım sensörü kullanılmıştır. 3-faz şebeke gerilimlerinin ölçümü için ise yine izolasyonlu ve Hall etkili TEG NV25P gerilim sensörleri kullanılmıştır. Sensör çıkışlarından gerilim almak için çıkışlarına direnç bağlanarak ölçüm devresi oluşturulmuştur. Şekil 4.7 ve 4.8’de sırasıyla akım sensörü ve gerilim sensörü devre bağlantısı verilmiştir.



Şekil 4.7. Akım sensörü bağlantı şeması.

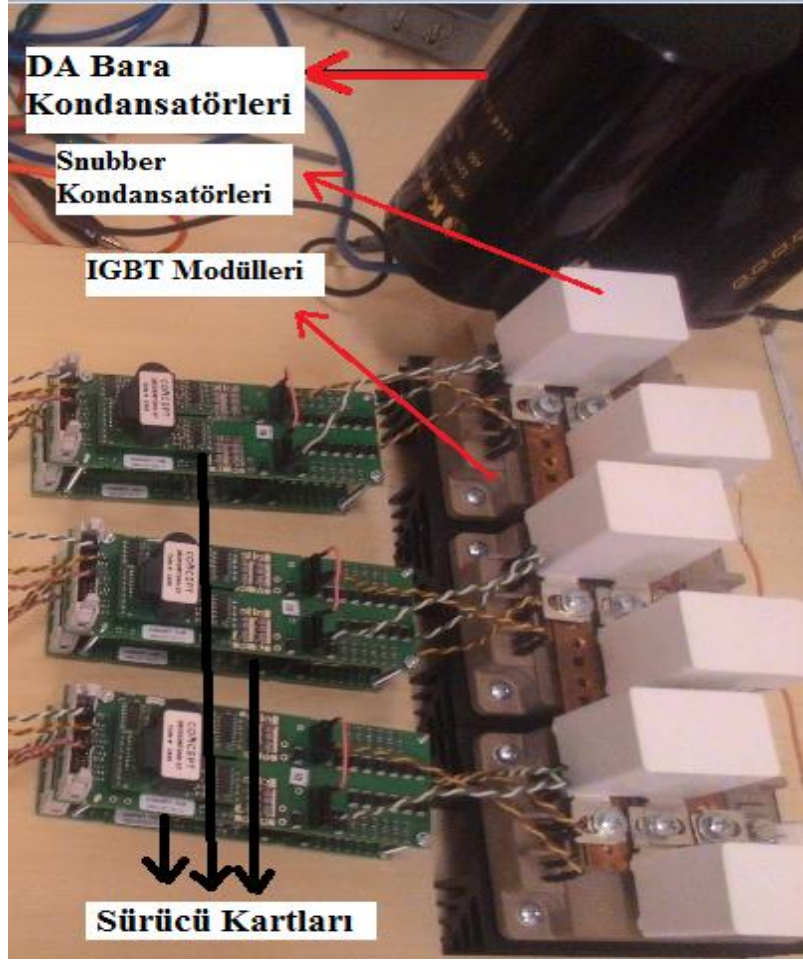


Şekil 4.8. Gerilim sensörü bağlantı şeması.

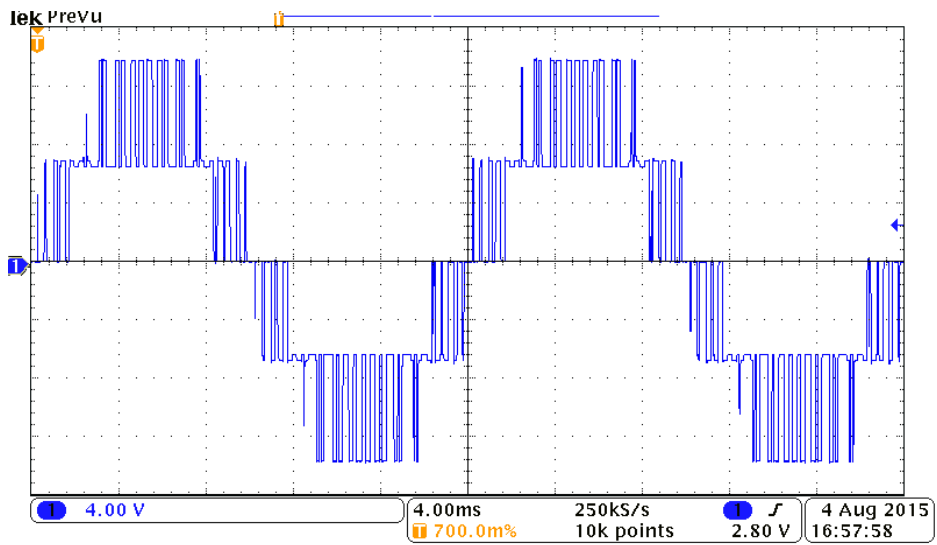
4.2. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, 3-fazlı şebeke bağlantılı AT-NPC tipi 3-seviyeli evirici prototipinin güç katı Şekil 4.9'da görüldüğü şekilde kurulmuştur. Toplamda 2 adet DA bara kondansatörü, 6 adet snubber kondansatör, 6 adet sürücü kartı ve 12 yarı iletkenlerden oluşan 3 adet IGBT modülden oluşan güç katı ile birlikte akım ve gerilim sensör kartları, koruma kartı ve sürücü kartları birleştirilerek tüm sistem elde edilmiştir. Sistem bir bütün haline getirilmeden önce güç katı, sürücü devreler ile akım ve gerilim sensör devreleri gibi her bir yapı bağımsız olarak test edilerek, kalibrasyon işlemleri yapılmıştır. Böylece sistemin nominal gücünde çalışması sırasında hatalı ölçüm veya arızalı kart olması gibi olumsuz durumların meydana gelmesine sebep olacak aksaklıkların önüne geçilmiştir.

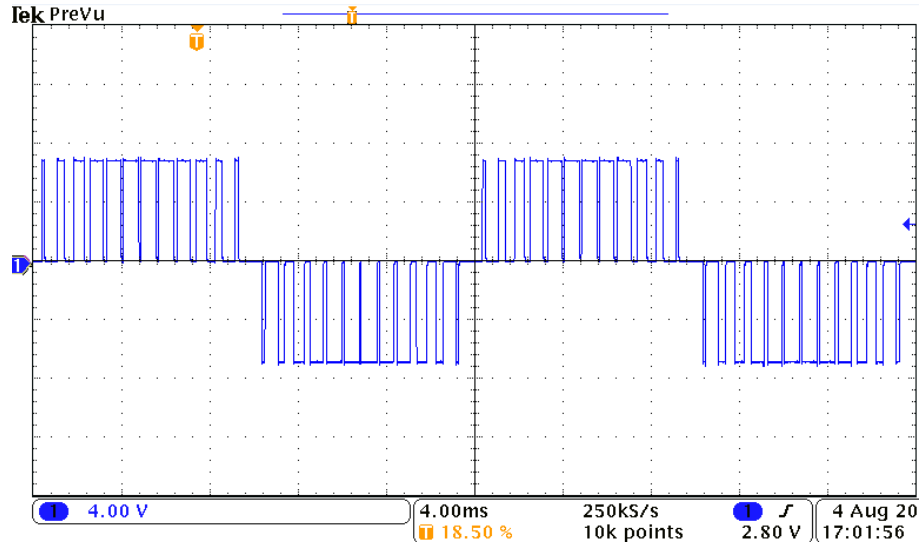
Bu kontrollerin ardından evirici prototipi şebekeden bağımsız olarak çalıştırılarak akım ve gerilim sensörleri ile ölçülen sinyaller denetim algoritmasına alınıp, PLL gibi algoritmadaki önemli blokların işleyişi 400V DA-bara değerinde kontrol edilmiştir. Pozitif, negatif ve nötr gerilimden oluşan eviricinin filtre öncesi 3-seviyeli fazlar arası gerilimi ve faz-nötr gerilimi Şekil 4.10a ve b'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.11'de ise 3-faz fazlar arası evirici çıkış gerilimi verilmiştir.



Şekil 4.9. 3-fazlı şebeke bağlantılı AT-NPC tipi 3-seviyeli evirici güç katı fotoğrafı.

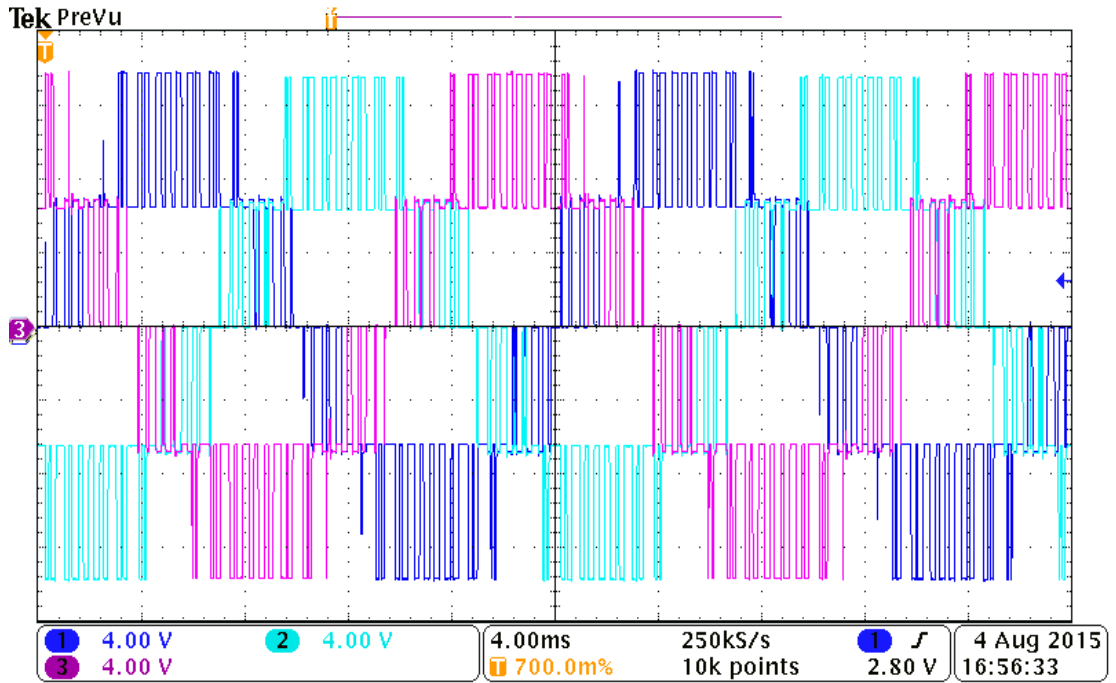


(a)



(b)

Şekil 4.10. Evirici çıkışı a) faz-faz gerilimi b) faz nötr gerilimi.



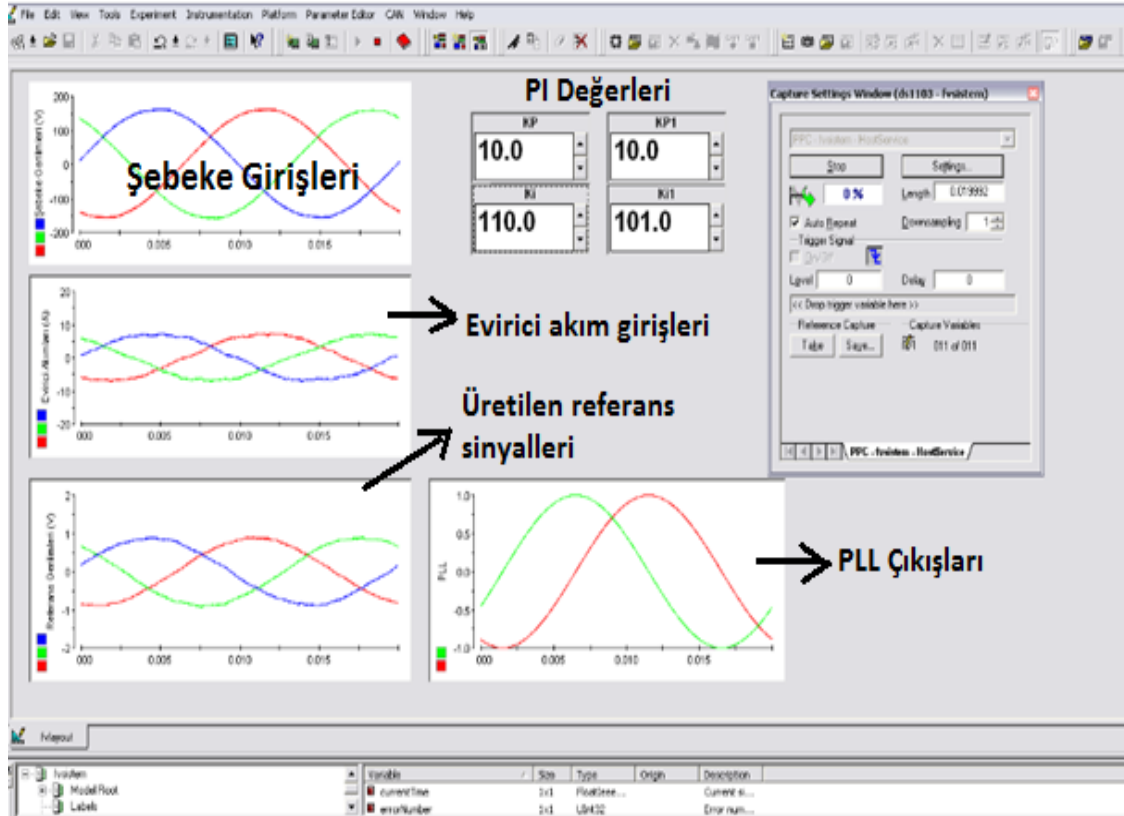
Şekil 4.11. 3-faz fazlar arası evirici çıkış gerilimi.

Tüm sistem bağlantıları tamamlanan şebeke bağlantısız evirici prototipinin şebeke bağlantısı yapılarak son haline getirilmiştir. Çizelge 4.1’de 3-fazlı şebeke bağlantılı AT-NPC tipi 3-seviyeli eviriciye ait bazı parametre ve değerler verilmiştir.

Çizelge 4.1. 3-fazlı şebeke bağlantılı evirici uygulamasına ait bazı parametreler.

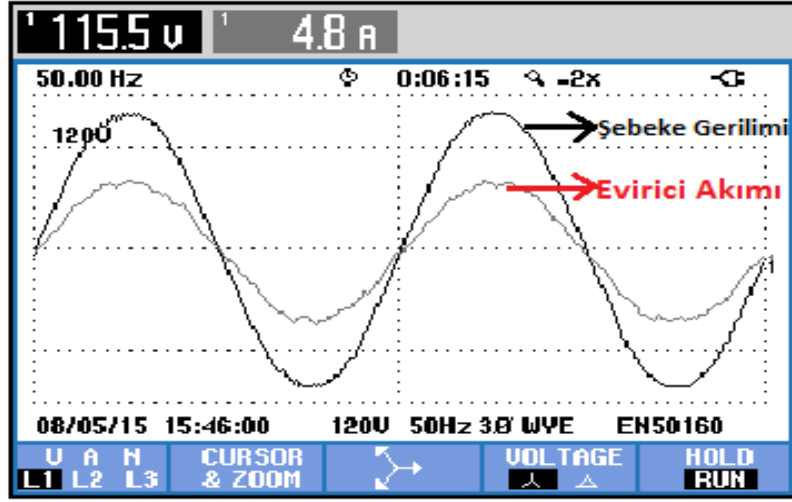
| Birim | Değeri |
|---|-------------------------|
| Şebeke Gerilimi ve Frekansı | 110V, 50Hz |
| DA Bara Gerilimi | 400V |
| Filtre Bobini | 8.9 mH |
| Filtre Kondansatörü ve Sönümlenme Direnci | 30 μ F, 10 Ω |
| Tek Faz Yük | 100 Ω |
| Anahtarlama Frekansı | 5kHz |
| Evirici Verimi | ~ % 95 |
| Örnekleme Zamanı | 17 μ sn |

Deneysel çalışma sırasında 3-faz şebeke gerilimleri, 3-faz evirici akımları ve PLL bloğunun çıkışı gibi bazı parametre ve değerler Şekil 4.12'deki gibi dSPACE ControlDesk arayüz programı yardımı ile gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Deneysel sonuçların alınması için Tektronix DPO 3054 4 kanalı osiloskop ve Fluke 434 3-fazlı güç analizörü kullanılmıştır.



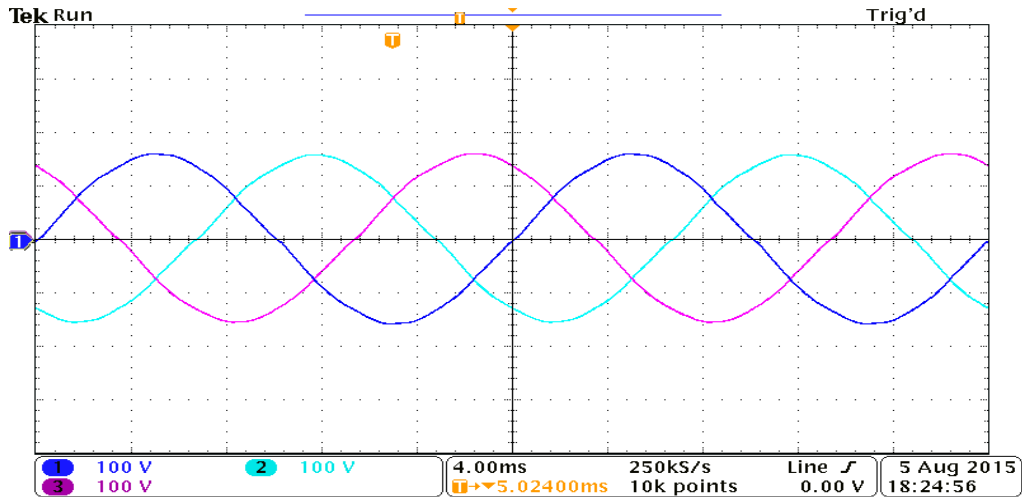
Şekil 4.12. ControlDesk arayüzü.

Evirici prototipi, faz-nötr gerilimi 110V/50Hz olan 3-fazlı şebekeye PLL algoritması yardımıyla senkronize olmuştur. Şekil 4.13’de görüldüğü üzere şebeke gerilimi ile evirici çıkış akım dalga şekli aynı fazda olduğundan şebeke senkronizasyonunun sağlandığı doğrulanmıştır.



Şekil 4.13. Şebeke gerilimi ve evirici akımı.

Deneysel çalışmada bağlanılan 3-faz şebeke gerilimleri (faz-nötr) Şekil 4.14’de, bu şebeke gerilimlerinin harmonik analizi Şekil 4.15’de, eviricinin çıkışındaki 3-faz akımlar ise Şekil 4.16’da ve bu akımlara ait harmonik analiz değerleri Şekil 4.17’de verilmiştir. Şekil 4.16’de görüldüğü gibi 3-faz evirici akımları dengeli ve sinüzoidal dalga şeklindedir. Bu akımların THB değerlerinin ise IEEE 519’da belirtilen %5 limit değerine yakın olduğu Şekil 4.17’de gösterilmiştir



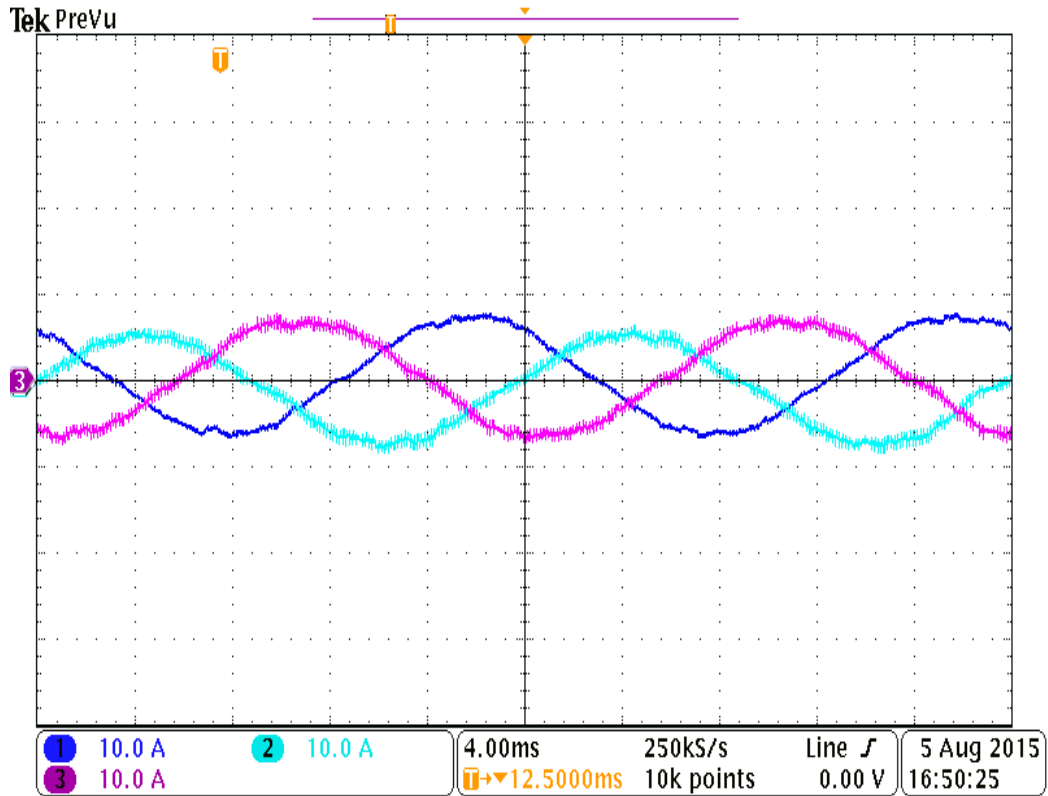
Şekil 4.14. 3-faz şebeke gerilimleri.

| HARMONICS TABLE | | | | |
|-----------------|-----|-----|-----|-------|
| Volt | L1 | L2 | L3 | N |
| THD%f | 1.1 | 0.9 | 1.2 | 197.4 |
| H3%f | 0.3 | 0.1 | 0.4 | 71.9 |
| H5%f | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 7.5 |
| H7%f | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 9.0 |
| H9%f | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 18.8 |
| H11%f | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 10.3 |
| H13%f | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 9.3 |
| H15%f | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 16.9 |

08/05/15 15:34:50 120V 50Hz 3Ø WYE EN50160

U A W U&A BACK TREND HOLD RUN

Şekil 4.15. Şebeke gerilim harmonikleri



Şekil 4.16. 3-faz evirici çıkışı akımları.

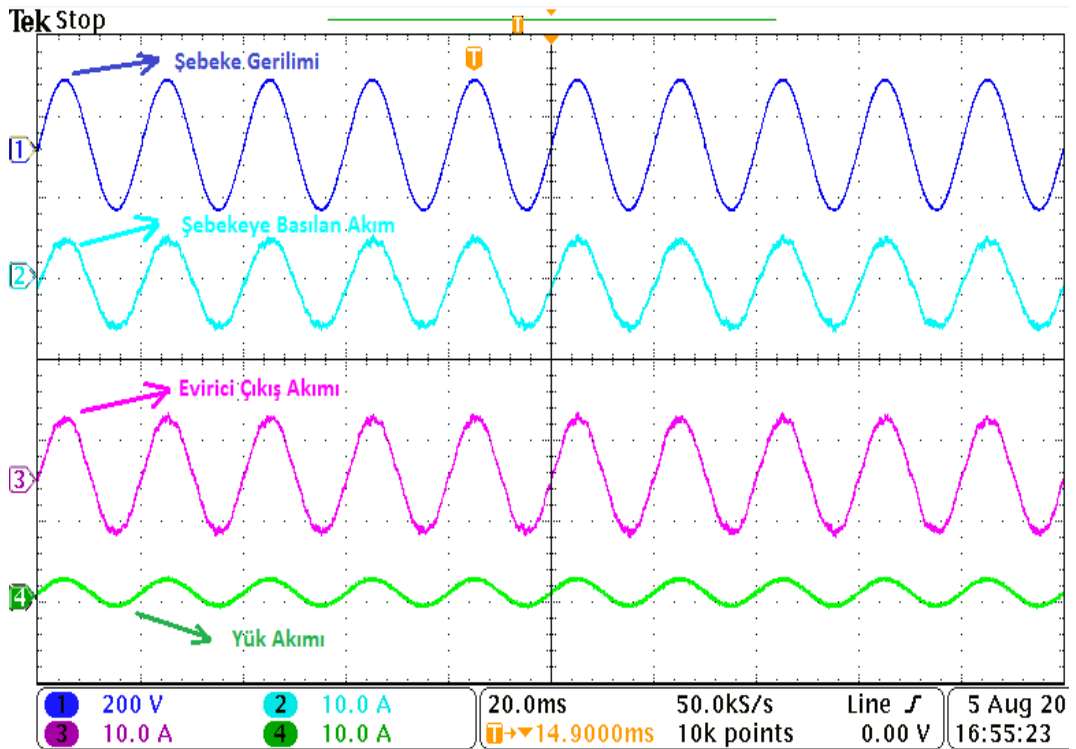
| HARMONICS TABLE | | | | |
|-----------------|-----|-----|-----|-------|
| Amp | L1 | L2 | L3 | N |
| THD%f | 4.3 | 5.8 | 5.4 | 243.2 |
| H3%f | 0.7 | 2.8 | 2.5 | 67.4 |
| H5%f | 2.6 | 3.2 | 3.2 | 25.7 |
| H7%f | 1.0 | 1.4 | 1.2 | 20.2 |
| H9%f | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 22.2 |
| H11%f | 0.6 | 0.9 | 0.7 | 26.7 |
| H13%f | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 17.7 |
| H15%f | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 21.5 |

08/05/15 15:31:17 120V 50Hz 3Ø WYE EN50160

U W U&A BACK TREND HOLD RUN

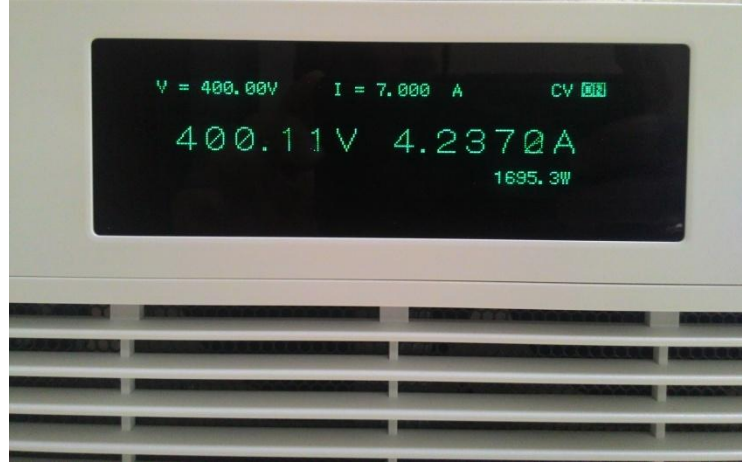
Şekil 4.17. Evirici çıkışı 3-faz akım harmonik değerleri.

Şekil 4.18’de bir faza ait şebeke gerilimi (faz-nötr), şebekeye aktarılan akım, evirici akımı ve yük akımı dalga şekilleri gösterilmiştir. Burada programlanabilir DA güç kaynağı tarafından sağlanan DA akım, evirici çıkışında AA akıma dönüştürülmekte ve bu akım PCC noktasında ikiye bölünerek öncelikle yükün akımı karşılanıp kalan kısmının ise şebekeye aktarıldığı görülmektedir.



Şekil 4.18. Eviriciden çıkan akım ve dağılımları.

Deneysel çalışma sırasında eviricinin nominal çalışmasında alınan programlanabilir DA güç kaynağının ekran görüntüsü Şekil 4.19'de gösterilmiştir. Nominal çalışmasında AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin DA-barasına uygulanan gerilim 400,11V, çektiği akım 4,237A ve çektiği güç 1695,3W değerlerindedir.



Şekil 4.19. Programlanabilir DA güç kaynağının ekran görüntüsü.

Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de ise sırasıyla yükün, evirici çıkışının ve şebekenin akım, gerilim ve güç değerlerini gösteren analizör çıktısı verilmiştir.

| Power & Energy | | | | |
|--|-------|--------|-------|----------|
| | L1 | L2 | L3 | Total |
| kW | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.37 |
| kVA | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.37 |
| kVAR | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.02 |
| PF | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Cosφ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| A _{rms} | 1.1 | 1.1 | 1.1 | |
| U _{rms} | 115.2 | 115.1 | 115.2 | |
| 08/05/15 15:36:55 120V 50Hz 3Ø WYE EN50160 | | | | |
| VOLTAGE | | ENERGY | TREND | HOLD RUN |

Şekil 4.20. Yükün 3-faz akım, gerilim ve güç değerleri.

Burada görüldüğü gibi evirici prototipinin a-fazında sağladığı akımın rms değeri 4,8A'dır. Bu akımın 1,1A'ı yüke aktarılırken geri kalan kısmı olan 3,7A şebekeye

aktarılmıştır. Diğer fazlar için de bu durum aynı şekilde gerçekleşmiştir. Ayrıca, AT-NPC tipi 3-seviyeli eviricinin giriş DA ve çıkış AA gücü karşılaştırıldığında verimin yaklaşık %95 olduğu tespit edilmiştir.

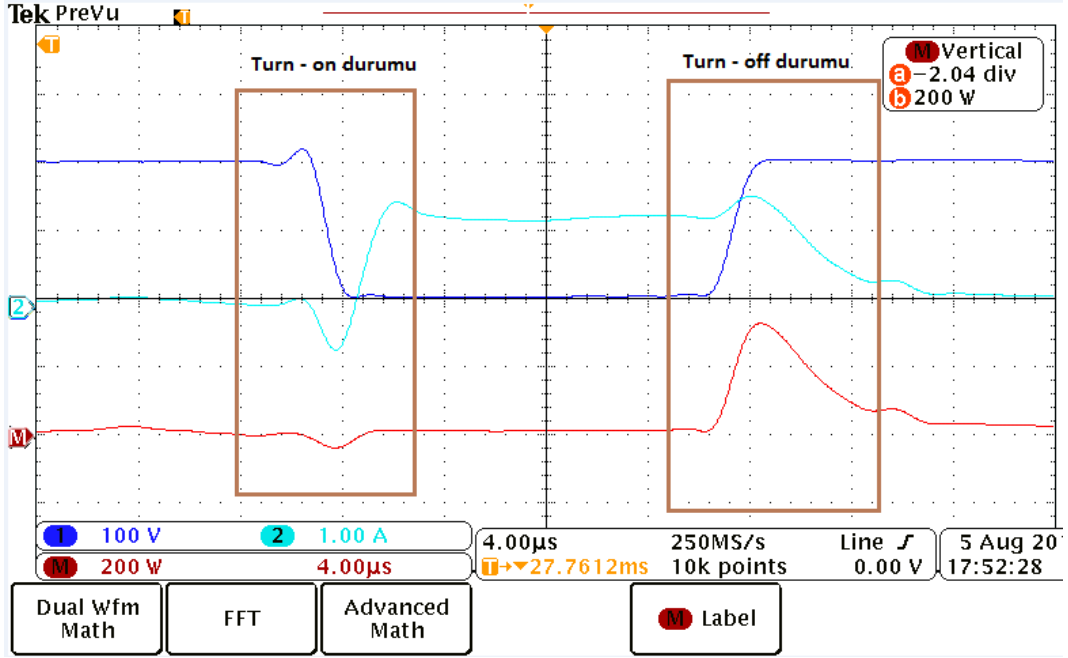
| Power & Energy | | | | |
|--|-------|--------|---------|----------|
| | FULL | Φ | 0:00:02 | |
| | L1 | L2 | L3 | Total |
| kW | 0.55 | 0.50 | 0.54 | 1.60 |
| kVA | 0.55 | 0.50 | 0.54 | 1.60 |
| kVAR | 0.03 | 0.03 | ÷ 0.04 | 0.12 |
| PF | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Cosφ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| A rms | 4.8 | 4.4 | 4.7 | |
| | L1 | L2 | L3 | |
| V rms | 115.4 | 115.2 | 115.4 | |
| 08/05/15 15:46:33 120V 50Hz 3Ø WYE EN50160 | | | | |
| VOLTAGE | | ENERGY | TREND | HOLD RUN |

Şekil 4.21. Evirici 3-faz akım, gerilim ve güç değerleri.

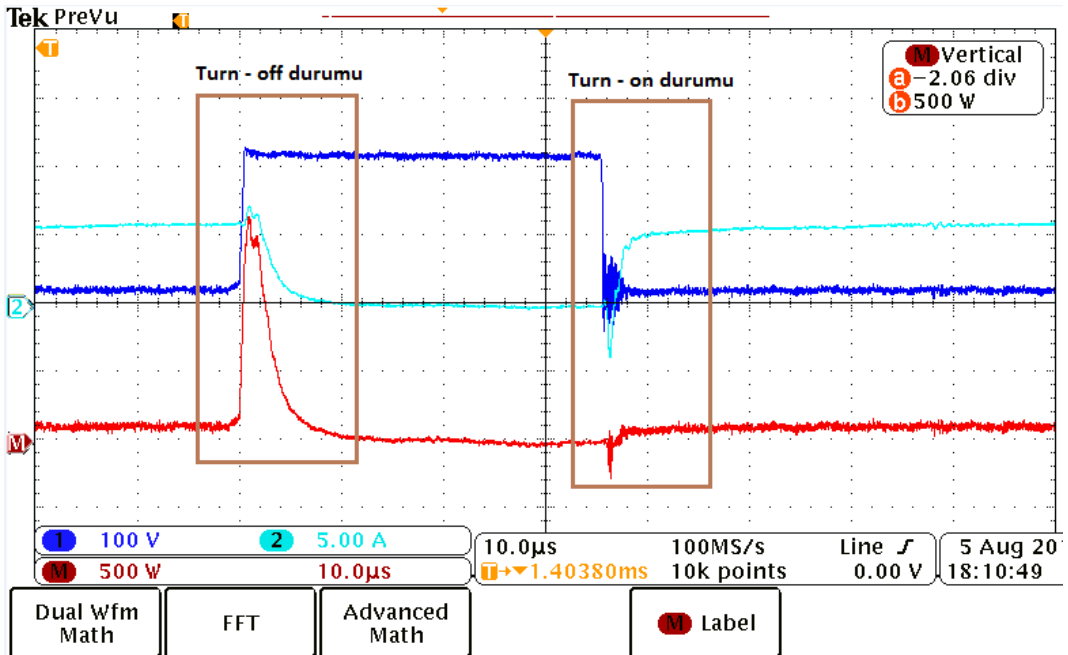
| Power & Energy | | | | |
|--|-------|--------|---------|----------|
| | FULL | Φ | 0:00:43 | |
| | L1 | L2 | L3 | Total |
| kW | 0.43 | 0.38 | 0.42 | 1.22 |
| kVA | 0.43 | 0.38 | 0.42 | 1.23 |
| kVAR | 0.03 | 0.03 | ÷ 0.04 | 0.12 |
| PF | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Cosφ | 1.00 | 1.00 | 1.00 | |
| A rms | 3.7 | 3.3 | 3.6 | |
| | L1 | L2 | L3 | |
| V rms | 115.2 | 115.1 | 115.3 | |
| 08/05/15 15:47:13 120V 50Hz 3Ø WYE EN50160 | | | | |
| VOLTAGE | | ENERGY | TREND | HOLD RUN |

Şekil 4.22. Şebeke 3-faz akım, gerilim ve değerleri.

Evirici kayıplarının önemli bir kısmını oluşturan anahtarlama kayıplarının gözlemlenmesi için Şekil 4.23’de T3 anahtarının, Şekil 4.24’de T1 anahtarının açılma ve kapanma anındaki üzerlerine düşen gerilim ve geçen akım şekilleri verilmiştir. Aynı zamanda bu anlardaki güç kayıpları da grafik üzerinde görülmektedir.



Şekil 4.23. T3 anahtarının iletim ve kesim durumundaki akım ve gerilimleri.



Şekil 4.24. T1 anahtarının iletim ve kesim durumundaki akım ve gerilimleri.

T3 anahtarı, kullanılan modülde RB özellikli, yüksek verime sahip, nötr noktasına bağlı olan anahtardır. Bu RB-IGBT'nin Şekil 4.23'den anahtarlama durumlarına bakılırsa turn-on (iletime geçme) olma durumu yaklaşık 1,6 μ sn, turn-off olma durumu ise yaklaşık 8 μ sn gibi kısa sürede gerçekleşmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarındaki DA gücü etkin bir şekilde AA gücüne dönüştüren, şebeke ile senkron olarak çalışan, 3 fazlı, 3 seviyeli yüksek verimli bir eviricinin tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ile bu kaynakların kullanımında eviricilerin etkin rolünden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan çeşitli topolojilerdeki eviricilerden bahsedilerek bunların bir birleriyle olan ilişkisi ve avantajlarından/dezavantajlarından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ise şebeke bağlantılı eviricilerin denetimi için sık tercih edilen yöntemlerden bahsedilerek çalışmada kullanılan PLL ile SRÇ yöntemleri detaylandırılmış ve tüm denetim sisteminin genel çalışma prensipleri verilmiştir. Ardından deneysel çalışmaya ışık tutacak benzetim çalışmalarından bahsedilerek sonuçları sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise deneysel çalışmada kullanılan yarı iletken, sürücü, ölçüm kartları gibi elemanlar teknik olarak anlatılarak deneysel çalışmanın hangi koşullarda yapıldığından bahsedilmiş, ardından alınan sonuçlar verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan AT-NPC tipi eviricinin şebeke ile senkron ve yüksek verimlerde çalıştığı görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda şebeke hataları göz önünde bulundurularak çeşitli kontrol ve koruma yöntemleri çalışmaya dahil edilebilir. Böylece eviricinin daha fonksiyonel çalışması sağlanmış olur.

Şebeke senkronizasyonu için kullanılan PLL ve evirici denetimi için kullanılan SRÇ yöntemleri geliştirilerek veya yeni teknikler araştırılarak, çeşitli şebeke hata ve bozukluklarında çalışabilecek, kalıcı durum hatalarının minimum olduğu, kontrol dinamikleri daha etkin olan bir sistem edilebilir.

Evirici verimini arttırmak için farklı anahtarlama teknikleri incelenebilir, farklı sürücüler tasarlanabilir veya daha verimli topolojiler türetilebilir. Ayrıca kullanılan filtre modeli değiştirilerek daha az yer kaplayan ve daha verimli filtreler tasarlanabilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Trappey A. J. C., Trappey C. V., Wang D. Y. C., Li S. J., Ou J. J. R., Evaluating renewable energy policies using hybrid clustering and analytic hierarchy process modeling, *Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD), Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on*, (2014) 716-720.
- [2] Cedric C., Adnan S., Ahmed A. D., Muyeen S. M., Modeling and analysis of battery performance for renewable energy application, *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, (2013) 1-10.
- [3] Fengjiang W., Bo S., Jiandong D., Ke Z., Online Variable Topology-Type Photovoltaic Grid-Connected Inverter, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 62 (8) (2015) 4814-4822.
- [4] Mohamad A. S., Mariun N., Sulaiman N., Radzi M. A. M., A new cascaded multilevel inverter topology with minimum number of conducting switches, *Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2014 IEEE*, (2014) 164-169.
- [5] Sivakumar K., Das A., Ramchand R., Patel C., Gopakumar K., A Hybrid Multilevel Inverter Topology for an Open-End Winding Induction-Motor Drive Using Two-Level Inverters in Series With a Capacitor-Fed H-Bridge Cell, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57 (11) (2010) 3707-3714.
- [6] Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Bin W., et al., Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57 (8) (2010) 2553-2580.
- [7] Colak I., Kabalci E., Bayindir R., Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes, *Energy Conversion and Management*, 52 (2) (2011) 1114-1128.

- [8] Schweizer M., Kolar J. W., Design and Implementation of a Highly Efficient Three-Level T-Type Converter for Low-Voltage Applications, *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 28 (2) (2013) 899-907.
- [9] Staudt I., 3L NPC & TNPC Topology, *Application Note AN-11001*, (2012).
- [10] Schweizer M., Kolar J. W., High efficiency drive system with 3-level T-type inverter, *Power Electronics and Applications (EPE 2011)*, Proceedings of the 2011-14th European Conference on, (2011) 1-10.
- [11] Teichmann R., Bernet S., A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 41 (3) (2005) 855-865.
- [12] Schweizer M., Friedli T., Kolar J. W., Comparison and implementation of a 3-level NPC voltage link back-to-back converter with SiC and Si diodes, *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE, (2010) 1527-1533.
- [13] Bruckner T., Bernet S., Guldner H., The active NPC converter and its loss-balancing control, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 52 (3) (2005) 855-868.
- [14] Leredde A., Gateau G., Floricau D., New three level topology with shared components: Properties, losses, and control strategy, *Industrial Electronics, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE*, (2009) 676-681.
- [15] Jin L., Jinjun L., Boroyevich D., Mattavelli P., Yaosuo X., Three-level Active Neutral-Point-Clamped Zero-Current-Transition Converter for Sustainable Energy Systems, *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 26 (12) (2011) 3680-3693.
- [16] Ewanchuk J., Salmon J., Knight A., Performance of a High Speed Motor Drive System Using a Novel Multi-Level Inverter Topology, *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008. IAS '08. IEEE, (2008) 1-8.
- [17] Huafeng X., Shaojun X., Transformerless Split-Inductor Neutral Point Clamped Three-Level PV Grid-Connected Inverter, *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 27 (4) (2012) 1799-1808.

- [18] Schweizer M., Lizama I., Friedli T., Kolar J. W., Comparison of the chip area usage of 2-level and 3-level voltage source converter topologies, *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, (2010) 391-396.
- [19] Teodorescu R., Liserre M., Rodríguez P., *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Wiley, (2011).
- [20] Brahmam P. V., Bharath D., Dubey M., Solar Based Three Level T-Type Converter For Low Voltage Application, *International Journal of ChemTech Research*, 5 (5) (2013) 2449-2455.
- [21] Kantar E., Hava A. M., Design of grid connected PWM converters considering topology and PWM methods for low-voltage renewable energy applications, *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)*, 2014 International, (2014) 2034-2041.
- [22] Hyunjin S., Kwanghee L., Jaeho C., Seokchan S., Jinguok L., Power loss comparison with different PWM methods for 3L-NPC inverter and 3L-T type inverter, *Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, 2014 International, (2014) 1322-1327.
- [23] Alemi P., Yoon-Cheul J., Dong-Choon L., DC-Link Capacitance Minimization in T-Type Three-Level AC/DC/AC PWM Converters, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 62 (3) (2015) 1382-1391.
- [24] Li Z., Kai S., Lipei H., Igarashi S., Comparison of RB-IGBT and normal IGBT in T-type three-level inverter, *Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013 15th European Conference on, (2013) 1-7.
- [25] Gang L., Kai S., Lipei H., Igarashi S., RB-IGBT gate drive circuit and its application in two-stage matrix converter, *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, (2005) 1-7.
- [26] Kyoung-Jun L., Jong-Pil L., Dongsul S., Dong-Wook Y., Hee-Je K., A Novel Grid Synchronization PLL Method Based on Adaptive Low-Pass Notch Filter for Grid-Connected PCS, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 61 (1) (2014) 292-301.

- [27] Hadjidemetriou L., Kyriakides E.,Blaabjerg F., A new hybrid PLL for interconnecting Renewable Energy Systems to the grid, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, **(2012)** 2075-2082.
- [28] Filipski P. S., Baghzouz Y.,Cox M. D., Discussion of power definitions contained in the IEEE Dictionary, *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 9 (3) **(1994)** 1237-1244.
- [29] Namboodiri A., Wani H. S., Unipolar and Bipolar PWM Inverter, *International Journal for Innovative Research in Science and Technology*, 1 (7) **(2015)** 237-243.
- [30] Jianhua W., Baojian J., Jianfeng Z.,Jie Y., From H4, H5 to H6 — Standardization of full-bridge single phase photovoltaic inverter topologies without ground leakage current issue, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, **(2012)** 2419-2425.
- [31] Dai S., A DSP controlled multi-level inverter providing DC-link voltage balancing, ride-through enhancement and common-mode voltage elimination, *Ph.D. Thesis*, **(2003)**.
- [32] Li J., Design, Control and Characteristics of Multilevel Active NPC Converters for High Power Applications, *Ph. D. thesis*, North Carolina State University, **(2010)**.
- [33] Wang L., Design and an analysis of the stacked multicell converter with comparison to the neutral point clamped converter, *Master of Science*, University of Manitoba, Manitoba, **(2003)**.
- [34] Teichmann R., Bernet S., A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 41 (3) **(2005)** 855-865.
- [35] Glauber de Almeida Cacau R., Torrico-Bascope R. P., Aberides Ferreira Neto J.,Torrico-Bascope G. V., Five-Level T-Type Inverter Based on Multistate Switching Cell, *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 50 (6) **(2014)** 3857-3866.
- [36] Wu Y., Sun Y., Lin Y.,Zhang J., Investigation on the dynamic behaviors of paralleling T-type IGBT modules, Information Science, *Electronics and*

- Electrical Engineering (ISEEE)*, 2014 International Conference on, **(2014)** 932-938.
- [37] De A., Roy S., Bhattacharya S., Comparative suitability evaluation of reverse-blocking IGBTs for current-source based converter, *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA)*, 2014 International, **(2014)** 2562-2568.
- [38] Shuangching C., Lu D. H., Wakimoto H., Nakazawa H., Otsuki M., T-type 3-level IGBT power module using authentic reverse block-ing IGBT (RB-IGBT) for renewable energy applications, *Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, 2013 1st International, **(2013)** 229-234.
- [39] Satheesh N., Takaku T., Advanced T-type NPC- 3 level modules: A novel possibility with RB-IGBT's, *Application Note*, Fuji Electric, **(2014)**.
- [40] Satheesh N., Advanced T-type NPC – 3 level modules: A new possibility with RB-IGBT's, *Application Note*, Fuji Electric Corp. of America, **(2014)**.
- [41] Headquarters E. D. B., T-type Advanced 3-level Inverter Module Power dissipation and comparison tables, *Application Note*, Fuji Electric Co., Ltd., **(2012)**.
- [42] Zong X., A single phase grid connected DC/AC inverter with reactive power control for residential PV application, *Master's of Applied Science*, University of Toronto, **(2011)**.
- [43] Raducu G. A., Control of grid side inverter in a B2B configuration for WT applications, *Master Thesis*, Aalborg University, **(2008)**.
- [44] Bhardwaj M., Software Phased-Locked Loop Design Using C2000™ Microcontrollers for Single Phase Grid Connected Inverter, SPRABT3, *Application Note*, Texas Instruments, **(2013)**.
- [45] Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M., Timbus A. V., Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53 (5) **(2006)** 1398-1409.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Emre AVCI
Uyruğu : T.C
Doğum tarihi ve yeri : 17/09/1988
Telefon : 03805421100
Faks : 03805421111
E-posta : emreavci@duzce.edu.tr

Eğitim

| Derece | Eğitim Birimi | Mezuniyet tarihi |
|---------------|----------------------------------|-------------------------|
| Yüksek Lisans | Düzce Üniversitesi | 2015 |
| Lisans | Sakarya Üniversitesi | 2011 |
| Lise | Milliyet Anadolu Öğretmen Lisesi | 2006 |

İş Deneyimi

| Yıl | Yer | Görev |
|------------|--------------------|---------------------|
| 2014- | Düzce Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |

Yabancı Dil

İngilizce (YDS :82)