

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**





**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORCID : - - -**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**ORCID : - - -**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan :** .....

**Üye :** .....

**Üye :** .....

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı'nda yapılmıştır. Yapılan tez çalışması günümüzde popülerliği giderek artan elektrikli araçlarda kullanılan dönüştürücülerden bir tanesinin incelenmesini içermektedir. Seçilen dönüştürücünün temel çalışma mantığı ve teorik altyapısı araştırılarak dönüştürücü kontrolünün bazı kontrol yöntemleriyle nasıl yapılacağı karşılaştırma yapılarak gösterilmiştir.

Tez çalışmasının her aşamasında bilgi birikimini ve tecrübesini benimle paylaşarak bana yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ'ye, bu süreçte yoğun çalışma temposunda benden yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Ömür AKYAZI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam süresince yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Emin MOLLAHASANOĞLU, Arş. Gör. Burak AYDIN, Arş. Gör. Bora ÇAVDAR, İnşaat Yüksek Mühendisi Mert Ahmet Yılmaz ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölüm arkadaşım Müslüm Serhat ÜNVER'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Son olarak tez çalışmam ve tüm eğitim hayatım boyunca bende büyük emekleri olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Miraç ÖZTÜRK

Trabzon 2023

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Mayıs Sineği Optimizasyonu Tabanlı İki Yönlü Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücünün Tasarımı ve Denetimi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ'nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 04/05/2023

Miraç ÖZTÜRK

## İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| ÖNSÖZ .....  | III             |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....  | IV              |
| İÇİNDEKİLER.....   | V               |
| ÖZET .....   | VIII            |
| SUMMARY .....  | IX              |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....   | X               |
| TABLolar DİZİNİ.....   | XIII            |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....  | XIV             |
| 1. GENEL BİLGİLER.....   | 1               |
| 1.1. Giriş .....   | 1               |
| 1.2. Literatür Araştırması .....   | 3               |
| 1.3. Çift Yönlü Doğru Akım Dönüştürücüler.....                                 | 6               |
| 1.3.1. İzolesiz Çift Yönlü Doğru Akım Dönüştürücüler .....                     | 7               |
| 1.3.1.1. Temel Çift Yönlü Azaltan (Buck) ve Yükselten (Boost) Dönüştürücü..... | 7               |
| 1.3.1.2. İzolesiz Çift Yönlü Azaltan (Buck)-Yükselten (Boost) Dönüştürücü..... | 8               |
| 1.3.1.3. İzolesiz Çift yönlü Cuk Dönüştürücü .....                             | 9               |
| 1.3.1.4. İzolesiz Çift Yönlü SEPIC-Zeta Dönüştürücü.....                       | 10              |
| 1.3.1.5. İzolesiz Çift Yönlü Kaskad Dönüştürücü .....                          | 11              |
| 1.3.1.6. Çift Yönlü Anahtarlamaalı Kapasitörlü Dönüştürücü.....                | 12              |
| 1.3.1.7. Çift Yönlü İnterleaved Dönüştürücü .....                              | 13              |
| 1.3.1.8. Çift Yönlü Çok Seviyeli Dönüştürücü.....                              | 14              |
| 1.3.2. İzoleli Çift Yönlü Doğru Akım Dönüştürücüler .....                      | 15              |
| 1.3.2.1. İzoleli Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü .....                          | 16              |

|   |    |
|---|----|
| 1.3.2.2. İzoleli Çift Yönlü Cuk Dönüştürücü .....   | 16 |
| 1.3.2.3. İzoleli Çift Yönlü Push-Pull Dönüştürücü .....   | 17 |
| 1.3.2.4. İzoleli Çift Yönlü İleri Yön Dönüştürücü.....  | 18 |
| 1.3.2.5. Çift Yönlü İki Yarım Köprü Dönüştürücü .....   | 19 |
| 1.3.2.6. Çift Yönlü Bir Tam Köprü Bir Yarım Köprü Dönüştürücü .....   | 20 |
| 1.3.2.7. Çift Yönlü Çok Girişli İki Tam Köprü Dönüştürücü .....   | 21 |
| 1.3.2.8. İki Yönlü Çift Aktif Köprü Dönüştürücü .....   | 21 |
| 1.4. İki Yönlü Doğru Akım Dönüştürücülerin Anahtarlama Yöntemleri .....                                       | 29 |
| 1.4.1. Tek Faz Kaydırma Yöntemi .....   | 29 |
| 1.4.2. Genişletilmiş Faz Kaydırma Yöntemi .....   | 30 |
| 1.4.3. Çift Faz Kaydırma Yöntemi .....  | 31 |
| 1.4.4. Üç Faz Kaydırma Yöntemi.....   | 32 |
| 1.5. İki Yönlü Doğru Akım Dönüştürücülerde Kontrol Yöntemleri .....   | 33 |
| 1.5.1. Klasik PID Kontrol.....  | 33 |
| 1.5.2. Kesir Dereceli PID Kontrol .....   | 34 |
| 1.5.2.1. Mayıs Sineği (Mayfly) Optimizasyon Algoritması .....   | 35 |
| 1.5.3. Model Öngörülü Kontrol .....   | 37 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....  | 38 |
| 2.1. İki Yönlü Çift Aktif Köprülü Doğru Akım Dönüştürücünün Tasarımı ve Devre Elemanlarının İncelenmesi ..... | 38 |
| 2.1.1. Kaçak Endüktans .....  | 39 |
| 2.1.2. MOSFET Elemanı .....   | 40 |
| 2.1.3. Transformatör Elemanı.....   | 41 |
| 2.1.4. Kapasitör Elemanı .....  | 41 |
| 2.1.5. Anahtarlama Frekansı.....  | 42 |
| 2.1.6. Faz Kayması .....  | 43 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.2.   | İki Yönlü Çift Aktif Köprülü DA Dönüştürücünün Kontrol Yöntemi Tasarımının İncelenmesi ..... | 44 |
| 2.2.1. | Klasik PID Denetleyici Tasarımı.....   | 46 |
| 2.2.2. | Kesir Dereceli PID Denetleyici Tasarımı .....  | 47 |
| 2.2.3. | Mayıs Sineği Optimizasyon Algoritması Tasarımı .....   | 47 |
| 3.     | BULGULAR .....   | 49 |
| 3.1.   | Tek Faz Kaydırma ve Faz Farkı Oluşumu .....  | 49 |
| 3.2.   | Sabit Yük Analizi .....  | 50 |
| 3.3.   | Değişken Yük Analizi .....   | 53 |
| 3.4.   | Giriş Geriliminde Bozulma Analizi.....   | 56 |
| 3.5.   | Dönüştürücünün Düşük Güçte Çalıştırılması .....  | 59 |
| 4.     | TARTIŞMA.....  | 60 |
| 5.     | SONUÇLAR.....  | 63 |
| 6.     | ÖNERİLER .....   | 64 |
| 7.     | KAYNAKLAR.....   | 65 |

ÖZGEÇMİŞ

## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

# MAYIS SİNEĞİ OPTİMİZASYONU TABANLI İKİ YÖNLÜ ÇİFT AKTİF KÖPRÜLÜ DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN TASARIMI VE DENETİMİ

Miraç ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan KAHVECİ  
2023, 72 Sayfa

Günümüz teknolojisi gün geçtikçe hayatımızı kolaylaştırmak için gelişmektedir. Teknolojik gelişmelerin gerçekleştiği önemli alanlarından birisi de güç aktarımı yapabilen dönüştürücülerdir. Dönüştürücüler günümüzde elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu ve enerji depolama sistemleri gibi birçok önemli faaliyet alanında sıklıkla kullanılmaktadır. İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü yapısı gereği çift yönlü olduğundan dolayı kapladığı alan, güç akışı veriminin yüksek olması ve güvenilir olması gibi birçok farklı alanda benzer içerikli diğer dönüştürücülere göre avantajlıdır. Bundan dolayı bu tez çalışmasında dönüştürücünün temel çalışma prensibi ve teorik hesaplamaları üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda dönüştürücü için en iyi kontrol yönteminin belirlenmesi üzerine literatürde mevcut çalışmalardan klasik PI kontrolü ve model öngörülü kontrole karşı katsayıları optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolü ve katsayıları optimize edilmiş klasik PI kontrolüyle karşılaştırılmalı değerlendirilmesi yapılmıştır. Kontrolcülerde kullanılacak olan parametreler mayıs sineği optimizasyon algoritmasıyla belirlenmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde çıkış geriliminin referansa oturma süresi ve aşma miktarının en düşük değerleri optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolcü ile elde edildiği görülmüştür. Dönüştürücü ve dönüştürücüye uygulanacak kontrolcünün tasarımı MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çift Aktif Köprü, Faz Kaydırma, Kesir Dereceli PI, Mayıs Sineği Optimizasyonu, Model Öngörülü Kontrol

Master Thesis

SUMMARY

DESIGN AND CONTROL OF BIDIRECTIONAL DUAL ACTIVE BRIDGE DC-DC  
CONVERTER BASED ON MAYFLY OPTIMIZATION

Miraç ÖZTÜRK

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program  
Supervisor: Asst. Prof. Hakan KAHVECİ  
2023, 72 Pages

Today's technology is developing day by day to make our lives easier. One of the important areas where technological developments take place is the converters that can transfer power. Converters are frequently used in many important fields of activity such as electric vehicles, integration of renewable energy sources into the grid and energy storage systems. Since the bi-directional dual active bridge direct current converter is bidirectional due to its structure, it has advantages over other converters with similar content in many different areas such as the area it occupies, high power flow efficiency and reliability. Therefore, in this thesis, the basic working principle of the converter and studies on theoretical calculations have been carried out. As a result of the studies, in order to determine the best control method for the converter, a comparative evaluation has been made with the classical PI control and model predictive control with coefficients optimised fractional PI control and coefficients optimised classical PI control. The parameters to be used in the controllers were determined by the mayfly optimisation algorithm. Looking at the results, the lowest values for settling time and output voltage overshoot to reference are obtained with the optimised fractional PI controller. The design of the converter and the controller to be applied to the converter was carried out in MATLAB/Simulink environment.

**Key Words:** Dual Active Bridge, Phase Shift, Fractional order PI, Mayfly Optimization, Model Predictive Control

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil 1.1. Temel çift yönlü azaltan ve yükselten dönüştürücü .....                             | 8               |
| Şekil 1.2. İzolesiz çift yönlü azaltan-yükselten dönüştürücü .....                             | 9               |
| Şekil 1.3. İzolesiz çift yönlü cuk dönüştürücü .....   | 10              |
| Şekil 1.4. İzolesiz çift yönlü SEPIC-Zeta dönüştürücü .....                                    | 11              |
| Şekil 1.5. İzolesiz çift yönlü kaskad dönüştürücü .....  | 12              |
| Şekil 1.6. Çift yönlü anahtarlama kapasitörlü dönüştürücü .....                                | 13              |
| Şekil 1.7. Çift yönlü interleaved dönüştürücü .....  | 14              |
| Şekil 1.8. Çift yönlü çok seviyeli dönüştürücü.....  | 15              |
| Şekil 1.9. İzoleli çift yönlü flyback dönüştürücü.....   | 16              |
| Şekil 1.10. İzoleli çift yönlü cuk dönüştürücü.....  | 17              |
| Şekil 1.11. İzoleli çift yönlü push-pull dönüştürücü .....                                     | 18              |
| Şekil 1.12. İzoleli çift yönlü ileri yön dönüştürücü .....                                     | 19              |
| Şekil 1.13. Çift yönlü iki yarım köprü dönüştürücü .....                                       | 20              |
| Şekil 1.14. Çift yönlü bir tam bir yarım köprü dönüştürücü .....                               | 20              |
| Şekil 1.15. Çift yönlü çok girişli iki tam köprü dönüştürücü .....                             | 21              |
| Şekil 1.16. İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücü .....                                     | 22              |
| Şekil 1.17. İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücünün çalışma mantığı.....                   | 22              |
| Şekil 1.18. Anahtarlama, birincil ve ikincil gerilimler ve kaçak endüktans akımı .....         | 25              |
| Şekil 1.19. Güç aktarımı ve anahtar doluluk boşluk oranı arasındaki ilişki.....                | 27              |
| Şekil 1.20. Tüm çalışma aralıkları a-b) 1.aralık, c) 2.aralık, d-e) 3.aralık, f) 4.aralık..... | 28              |
| Şekil 1.21. Tek faz kaydırma yönteminin gösterimi .....  | 29              |
| Şekil 1.22. Genişletilmiş faz kayması yönteminin gösterimi .....                               | 30              |
| Şekil 1.23. Çift faz kaydırma yönteminin gösterimi .....                                       | 31              |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.24. Üç faz kaydırma yönteminin gösterimi .....   | 32 |
| Şekil 1.25. Temel kontrol diyagramı .....  | 33 |
| Şekil 1.26. PID kontrol bloğu.....   | 34 |
| Şekil 1.27. Kesir dereceli PID kontrol bloğu .....   | 35 |
| Şekil 1.28. Mayıs sineği optimizasyon algoritması akış diyagramı .....                           | 36 |
| Şekil 1.29. Model öngörülü kontrol diyagramı .....   | 37 |
| Şekil 2.1. İki yönlü çift aktif köprülü DA-DA dönüştürücü tasarımı.....                          | 39 |
| Şekil 2.2. Kaçak endüktansın aktarılan güce etkisi .....   | 40 |
| Şekil 2.3. Kaçak endüktans, faz kayması ve anahtarlama frekansı ilişkisi .....                   | 42 |
| Şekil 2.4. Faz kayma açısının kaçak endüktansla ilişkisi .....                                   | 43 |
| Şekil 2.5. Dönüştürücü ve kontrolcü genel görünümü .....   | 45 |
| Şekil 2.6. PI kontrolcü tasarımı .....   | 46 |
| Şekil 2.7. Kesir dereceli PI kontrolcü tasarımı.....   | 47 |
| Şekil 2.8. Mayıs sineği optimizasyon algoritmasının dönüştürücüye entegrasyonu.....              | 48 |
| Şekil 2.9. Çıkıştan amaç fonksiyonuna değer alınan blok.....                                     | 48 |
| Şekil 3.1. Tek faz kaydırma anahtarlamasının transformatör üzerinde oluşturduğu gerilimler ..... | 50 |
| Şekil 3.2. PI kontrolü altında çıkış gerilim ve akımı .....                                      | 51 |
| Şekil 3.3. Model öngörülü kontrol altında çıkış gerilim ve akımı.....                            | 51 |
| Şekil 3.4. Optimize edilmiş PI kontrol altında çıkış gerilim ve akımı .....                      | 52 |
| Şekil 3.5. Optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolü altında çıkış gerilim ve akımı .....      | 53 |
| Şekil 3.6. Değişken yük analizi için oluşturulan sistem .....                                    | 53 |
| Şekil 3.7. PI kontrol altında değişken yük analizi .....   | 54 |
| Şekil 3.8. Model öngörülü kontrol altında değişken yük analizi.....                              | 54 |
| Şekil 3.9. Optimize edilmiş PI kontrolcü altında değişken yük analizi.....                       | 55 |
| Şekil 3.10. Optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolcü altında değişken yük analizi .....      | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 3.11. Giriş gerilim değişimi için kullanılan sistem .....                             | 56 |
| Şekil 3.12. PI kontrol altında gerilim değişme analizi .....                                | 57 |
| Şekil 3.13. Model öngörölü kontrol altında gerilim değişme analizi .....                    | 57 |
| Şekil 3.14. Optimize edilmiş PI kontrolcü altında gerilim değişme analizi .....             | 58 |
| Şekil 3.15. Optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolü altında gerilim değişme analizi ... | 58 |



## TABLULAR DİZİNİ

|  | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|--|------------------------|
| Tablo 2.1. İki yönlü çift aktif köprülü DA-DA dönüştürücü elektriksel parametreleri..... | 38                     |
| Tablo 4.1. Sabit yükte kontrolcü önerilerinin karşılaştırılması .....                    | 60                     |
| Tablo 4.2. Değişken yükte kontrolcülerin karşılaştırılması.....                          | 61                     |
| Tablo 4.3. Gerilim değişme analizi kontrolcü karşılaştırılması.....                      | 62                     |



## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| A                               | Amper  |
| AA                              | Alternatif Akım  |
| AVR-VPC                         | Aktif Bozulmayı Reddeden Sanal Güç Kontrolü            |
| ÇFK                             | Çift Faz Kaydırma                                      |
| D                               | Doluluk-Boşluk Oranı                                   |
| DA                              | Doğru Akım   |
| F                               | Farad  |
| F <sub>s</sub>                  | Anahtarlama Frekansı                                   |
| g                               | Yer Çekimi Kuvveti                                     |
| g <sub>best</sub>               | Global En İyi Skor                                     |
| GFK                             | Genişletilmiş Faz Kayması                              |
| H                               | Henry  |
| HM-UPS                          | Hibrit Tabanlı Bileşik Faz Kayması                     |
| Hz                              | Hertz  |
| ITAE                            | Zaman ile Çarpılmış Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali |
| I <sub>ç</sub> , i <sub>o</sub> | Çıkış Akımı  |
| k                               | kilo   |
| k <sub>p</sub>                  | Oransal Sabit  |
| k <sub>i</sub>                  | İntegral Sabiti  |
| L                               | Endüktans  |
| MOSFET                          | Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör        |
| MÖK                             | Model Öngörülü Kontrol                                 |

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| MRK        | Model Referans Kontrolü              |
| n          | Transformatör Dönüştürme Oranı       |
| P          | Güç                                  |
| $p_{best}$ | Kişisel En İyi Skor                  |
| PIBD       | Oransal İntegral Bulanık Denetleyici |
| PID        | Oransal İntegral Türev               |
| PWM        | Darbe Genişlik Modülasyonu           |
| RMS        | Karekök Ortalama                     |
| R, R1      | Yük Direnci                          |
| r          | -1 ile 1 arası rastgele değer        |
| s          | Saniye                               |
| $T_s$      | Yarım Periyot                        |
| TFK        | Tek Faz Kaydırma                     |
| UPS        | Kesintisiz Güç Kaynağı               |
| V          | Volt                                 |
| $V_C, V_0$ | Çıkış Gerilimi                       |
| $V_G$      | Giriş Gerilimi                       |
| $v_i$      | Hız                                  |
| $V_p$      | Transformatör Giriş Gerilimi         |
| $V_s$      | Transformatör Çıkış gerilimi         |
| W          | Watt                                 |
| $\omega$   | Açısal Hız                           |
| x          | Konum                                |

|               |                                   |
|---------------|-----------------------------------|
| YÇFK          | Yeni Çift Faz Kaydırma            |
| Z             | İstenilen Aralıkta Rastgele Değer |
| $\emptyset$   | Faz Kayma Açısı                   |
| $\emptyset_d$ | Dış Faz Kayması                   |
| $\emptyset_i$ | İç Faz Kayması                    |
| $\lambda$     | Lamda                             |
| $\mu$         | Mikro                             |
| $\Omega$      | Ohm                               |
| %             | Yüzde                             |

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

İnsanlar son iki asırdan beri kömür, petrol ve diğer fosil yakıt kaynakları gibi çok fazla kaynağı tüketmektedir. Tüketilen kaynakların her geçen gün azalması insanları başka enerji kaynaklarının arayışına yönlendirmiştir. İnsanların sürekli ihtiyaç duyduğu ve sürekli ihtiyaç duyacağı öngörülen enerji kaynaklarından birisi de elektrik enerjisi olmuştur [1]. İnsanların teknolojiye olan bağımlılıklarının artması elektrik ihtiyacını daha fazla arttırmıştır. Artan talep insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Ancak yenilenebilir enerji sistemlerindeki sorun sürekliliğin sağlanamamasıdır [2]. Yenilenebilir enerji kaynakları günlük hava durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiği için sabit bir güç sağlayamama olasılığı vardır. Bu olasılığa karşı çift yönlü veya tek yönlü dönüştürücüler gibi güç elektroniği sistemleri kullanılmaktadır [3]. Dönüştürücülerde genelde batarya yönünde çalışma görülmektedir ancak batarya tarafından da aktarım sağlanabilmesi için çift yönlü dönüştürücülere gerek duyulmaktadır. Çift veya tek yönlü olarak çalışan dönüştürücü çeşitleri yükselten (boost), alçaltan (buck) dönüştürücü olarak kullanılabilir. Alçaltan (buck) dönüştürücü istenilen çıkış geriliminin giriş geriliminden daha küçük olduğu noktalarda kullanılmaktadır. Yükselten (boost) dönüştürücü ise istenilen çıkış geriliminin giriş geriliminden büyük olduğu noktalarda kullanılmaktadır. Her iki dönüştürücünün birleşimi de kullanılabilir [4]. Dönüştürücülerin çalışması AA (alternatif akım) veya DA (doğru akım) olarak değişmektedir. Bunlar AA-DA, AA-AA, DA-AA ve DA-DA olacak şekilde sınıflandırılmıştır [5].

Günümüzde fosil yakıtların azalması ve kullanılması ile çevreye verilen zararın artmasından dolayı elektrikli araçların kullanımı artmaktadır. Elektrikli araçların önemli noktalarından birisi bataryadır. Bataryanın şebeke üzerinden şarj olması için DA-DA güç aktarımı yapan dönüştürücüler önemli rol oynamaktadır. Araçlarda iç hacmin kullanıcılar tarafından tercih edilebilme sebebi olduğu düşünülecek olursa kullanılacak olan sistemlerin araç içerisinde mümkün olduğunca az yer kaplaması önemli olacaktır. Aracın içerisinde kullanılacak olan dönüştürücü çift yönlü seçilirse yer kaplama açısından da avantaj sağlayacaktır. Araç içerisinde tüm sistemlerin birbirine yakın olması ve alanın dar olması

yalıtım sorununu da ortaya çıkarmaktadır [6]. Sorun çözülmesi için izole olan çift yönlü dönüştürücüler arasında seçim yapılmaktadır. Çift yönlü dönüştürücülerde aktif anahtar sayısı, frekansı, izoleye sahip olup olmaması gibi kriterlere topoloji seçimi için bakılmaktadır [7, 8]. Çift yönlü dönüştürücüler minimum sayıda endüktans ve kapasite bulundurmaktadırlar. Basit bir şekilde düşünürsek ne kadar az sayıda eleman o kadar az sorun diyebiliriz. Az sayıda elemanın olması dönüştürücünün kontrol edilebilmesini de kolaylaştırır [9, 10].

DA-DA çalışan dönüştürücüler için birçok topoloji mevcuttur. Yaygın kullanılan topolojilerin avantajları ve dezavantajları kullanılacak olan sisteme göre belirlenir [11]. Hibrit bir elektrikli araçta İki yönlü çift aktif köprüye sahip bir dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi, bu gerilime ait salınımı etkileyen kapasitans değeri, kaçak endüktans akımının incelenmesi yapılmıştır [12]. İki yönlü çift aktif köprülü bir sistem uçakların elektrik sistemlerinde kullanılmıştır. Uçaklarda kullanılan bu sistem ile anahtarlama üzerinde olan kayıpların ve anahtarlarda oluşan aşırı yükün azaltılması için anahtarlama yöntemleri incelenerek sınırları belirlenmeye çalışılmıştır [13, 14].

Çift yönlü DA-DA dönüştürücü çeşitlerinden iki yönlü ve iki aktif köprüye sahip dönüştürücü hem izoleli olması hem de yüksek verimi sağlayabildiği için yüksek güçlerde tercih edilmektedir. İki yönlü çift aktif köprüye sahip olan dönüştürücü yenilenebilir enerji sistemlerinde güç akışı sağlamak amacıyla kaynak ile yük arasında bulunan enerji depolama birimlerine bağlı halde çalışmaktadır. Elektrikli araçlarda akü ve kaynak olan motor arasında çalışmaktadır. Elektrik şarj istasyonlarında da kullanıldığı zaman şarj portuna bağlanan cihaz ile şebeke arasında istenilen yöne göre çalışma sağlamaktadır [15, 16].

Bu tez çalışmasında, MATLAB / Simulink ortamında gerçekleştirilen mayıs sineği optimizasyonu tabanlı iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün tasarımı ve denetimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan dönüştürücünün mayıs sineği optimizasyon algoritması kullanılarak klasik PI ve kesir dereceli PI kontrolcülerin parametreleri belirlenmiştir. Literatür [1]'de PI ve model öngörülü kontrol (MÖK) karşılaştırılması yapılan tezdeki dönüştürücü parametreleri kullanılarak sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan bu dönüştürücünün denetimi optimize edilmiş klasik PI ve kesir dereceli PI ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür [1] ile karşılaştırılmıştır. Mayıs sineği optimizasyon algoritmasıyla elde edilen değerler kontrolcülere uygulanarak literatürdeki çalışma iyileştirilmiştir.

## 1.2. Literatür Araştırması

Literatürde iki yönlü doğru akım dönüştürücüler üzerine yapılan çalışmalar bulunmaktadır. İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücüler üzerine olan çalışmalarda hem yüksek güçlerde hem de düşük güçlerde çalışabildiği görülmektedir. Dönüştürücünün kendinden izoleli olması ve her iki yöne doğru çalışabilmesi tercih önceliği sağlamaktadır.

Kumar ve arkadaşları yüksek güç yoğunluğu, boyut, az ağırlık ve maliyet için yüksek frekans bağlantısı olabilen dönüştürücülerin tercih sebebi olduğunu söylemişlerdir. İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün yüksek frekanslı bir trafo ile bağlantısının olması iki yönlü dönüştürücüler arasında en yaygın topoloji olmasını sağlamaktadır. Çalışma içerisinde iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü kesintisiz güç kaynaklarında (UPS) kullanılması ve tek faz kaydırma (TFK), çift faz kaydırma (ÇFK) anahtarlama metodları karşılaştırılmıştır [17].

Ma ve arkadaşları iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün giriş gerilimi ve yük üzerindeki bozulmanın sistem üzerindeki kontrolü için aktif bozulmayı reddeden sanal güç kontrolünü (AVR-VPC) önermişlerdir. Yapılan değerlendirme de kontrolün iyi yanıt verdiğini çıkışta oluşan gerilimin değişmeden korunabildiğini göstermişlerdir [18].

Chi ve arkadaşları iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücüler için yeni bir çift faz kaydırma metodu önermiştir. Geleneksel olarak kullanılan çift faz kaydırma modülasyonu düşük yüklerde az faz kayması değişkenliği, büyük tepe akımları ve reaktif güç altında büyük akımlar oluşturduğu için yeni çift faz kaydırma (YÇFK) yöntemi önermişlerdir. Yeni öneri ile küçük yüklerde geniş faz kayması değişkenliği tepe akımında azalma, reaktif gücün ortadan kalkmasını ve verim artışını sağlamışlardır [19]. Ranjan ve arkadaşları darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile ÇFK kullanarak iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün kapalı çevrim kontrolünü önermişlerdir. Geleneksel ÇFK geri çalışmada sistem üzerinde oluşan akım stresini önlemede etkilidir ve yüksek frekans altında iyi sonuç verdiği bilinerek iyileştirme çalışması yapmışlardır [20]. Singh ve arkadaşları çift faz kaydırma ve tek faz kaydırma anahtarlama yöntemlerini kullanarak bir karşılaştırma yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda çift faz kaydırma anahtarlama yöntemi ile daha detaylı anahtarlama özellikleri sergileyerek faz kaymasının iyileşme gösterdiğini

incelemiştirlerdir [21]. İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün anahtarlama yöntemleri iyileştirildikçe verim ve sistemin kaybında düzelme görülmektedir. Yapılan başka bir çalışmada çift faz kaydırma ve üç faz kaydırma (ÜFK) karşılaştırılmıştır. ÜFK anahtarlama yöntemi bir yumuşak anahtarlama etkisi göstermiştir ve bu durum anahtarlama üzerinde sistemin etkisinin iyileştirebileceğini göstermiştir [22].

Aghajani ve arkadaşları tek fazlı çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü için bir hibrit model tabanlı bileşik faz kayması (HM-UPS) kontrol yöntemini önermişlerdir. Sağladığı avantajlar hızlı tepki süresi, çıkış gerilim ve akımın kontrolü, faz kayma açısına etkisi ile verimliliğin artırılmasıdır. Önerilen yöntem ile farklı faz kaydırma yöntemleri karşılaştırması yapılmıştır [23].

Navarro ve arkadaşları elektrikli araçlara uygun olarak iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün basit PI denetleyicisi tasarımıyla çıkıştaki akım ve gerilimin kontrolünü sağlamışlardır. Bu çalışmayı elektrikli araçların şarj sistemi için tasarlanmış ve deneysel olarak yapmışlardır [24]. Choi ve arkadaşları çift aktif köprüye sahip dönüştürücülerin güç dönüşümü yapılan sistemlerde kullanıldığını söylemişlerdir. Güç dönüştürme işlemlerinde en yaygın olarak kullanılan iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün içerisinde bulunan yüksek frekanslı transformatörün hacmi ve kayıplarının önemli bir etkide olduğunu söylemişlerdir. Gözlemlenen kayıpların azaltılması için seri bağlı kapasiteler bağladılar ve yüksek frekanslı sinyallerin iletilmesi için dijital izolatörler kullandılar. Bunu yaparak sistemin güvenilirliğini, kapladığı alanı ve maliyetini azaltmayı amaçlamışlardır [25].

Bindi ve arkadaşları tek fazlı iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü üzerine çift faz kaydırma uygulamışlardır. Yapılan çalışmada tek faz kayması olan dönüştürücünün kontrolünü PI ve model referans kontrolü (MRK) ile kontrol etmiştir. MRK için dönüştürücünün davranışına göre farklı sinir ağları kullanmış ve daha iyi dinamik sonuçlar elde ettiklerini göstermişlerdir [26]. Tiwari ve arkadaşları İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün ortalama bir modelini kullanarak kesir dereceli denetleyici ile PID parametrelerini algoritma kullanarak belirlemiştir. Kesir dereceli PID kullanımı ile klasik PID kullanımı arasında daha fazla kontrol edilebilirlik olduğunu göstermişlerdir [27].

Zhou ve arkadaşları iki yönlü doğru akım dönüştürücüyü ilk olarak çift faz kaydırma ve genişletilmiş faz kayması (GFK) altında kurmuşlardır. Dönüştürücünün yaklaşık bir uzay denklemini elde etmişlerdir. Elde edilen durum uzay denklemi ile çıkış voltajı değişimi model öngörülmesi kontrol ile yapmışlardır [28]. Barlik ve arkadaşları çalışmış oldukları iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücüde yeni bir devre modeli sunmuşlardır. Yeniliği diyotlar, anahtarlar üzerindeki voltajların dikkate alınmasıyla oluşturmuşlardır. Devrenin kaçak endüktans modeline katkı sağlamışlardır. Yaptıkları düzenlemelerden sonra devrenin matematiksel modelini çıkarmışlar ve simülasyonunu yapmışlardır [29]. Yapılan bu modelleme ile model öngörülmesi kontrolünün sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır.

Ghosh ve Singh yaptıkları bir çalışmada iki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücünün RMS trafo akımının en aza indirilmesi için çalışmışlardır. Dönüştürücünün harmonik durum uzay modeli ve ateş böceği algoritması optimizasyon tekniği ile sistemde çalışmışlardır. Sistemin faz kaymasını ise PI denetleyicisi kullanarak kontrol etmişlerdir [30]. Bai ve arkadaşları iki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücünün dinamik bir modelini oluşturmuşlardır. Bir model referans olarak sistemin faz kaymasıyla ileri ve geri besleme kontrollerini PI denetleyicisinin parametrelerinin seçilme zorluğunun azaltılabileceği bir hibrit kontrol önermişlerdir [31].

Talbi ve arkadaşları çalışmış oldukları lityum iyon bataryasına dayalı depolama sistemi için iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü ile çalışmışlardır. Dönüştürücünün kontrolü için bir PI-Bulanık Denetleyici (PIBD) önermişlerdir. Çalışmada belirlenmiş değerler için kontrolcü değerlendirilmesini yapmışlar ve simülasyon çalışmalarını göstermişlerdir [32].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücülerin elektrikli araçlar, elektrikli uçaklar, günümüzde kullanılan uçakların içerisindeki güç dönüşümlerinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantısında, yenilenebilir enerji kaynaklarının akülere enerji depolaması için dönüşümlerde, şarj istasyonlarında, pil depolama noktaları vb. birçok noktada kullanıldığı görülmektedir. Bu dönüştürücünün yüksek frekanslarda çalışabilmesi, çift yönlü aktarım yapabilmesi, kendinden izoleli olması, yüksek ve düşük güçlerde çalışabilmesi gibi özelliklerinden dolayı ilgi çekmektedir. İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Dönüştürücünün izolasyonunu sağlayan transformatör aynı zamanda dönüşümün yapıldığı sisteme olumsuz etkiler oluşturabilmektedir.

Transformatör üzerinde olan dönüşme oranı, kaçak endüktans değeri, çalıştığı frekans değeri gibi sisteme etkisinin çok olduğu noktalar vardır. Bu etkilerin sisteme göre uyarlanması önemlidir.

İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücünün çalışma sisteminde bulunan MOSFET'lerin anahtarlama görevi yapmasından dolayı anahtarlama kontrolü ve kullanılan anahtarlama yöntemi dönüştürücü verimi ve anahtarlar üzerindeki akım stresi açısından önemli rol oynamaktadır. tek faz, çift faz, üç faz ve genişletilmiş faz kaydırma vb. yöntemler kullanılmaktadır. Anahtarlama yöntemleri ile iki köprü arasında olacak faz kaymasının kontrolü de önemli rol oynamaktadır. Faz kayması sistemin birincil ve ikincil köprüsündeki anahtarlama işaretleri arasındaki kaymadır. Bu kayma ile sistemde güç akışı sağlanmaktadır. Faz kaymasının kontrolü için literatürde model öngörülmesi kontrol, PID, kesir dereceli PID vb. birçok yöntem vardır ve geliştirilmektedir. Sistemin anahtarlama ve kontrol yöntemini belirleyerek istenilen etkide çalışmasını sağlamaktadırlar. Bununla birlikte sistem üzerinde anahtarlama elemanları üzerinde olan kaybı ve stresi azaltmak için yumuşak anahtarlama yapılmaya çalışılmaktadır.

### **1.3. Çift Yönlü Doğru Akım Dönüştürücüler**

Çift yönlü çalışan doğru akım dönüştürücüler günümüzde önemli bir araştırma ve kullanım alanıdır. Tek yönlü olan dönüştürücülere göre en önemli avantajı her iki yöne de güç akışı sağlayabilmesidir. Temel olarak bakılırsa gerilimi her iki yöne de alçaltan veya düşüren devre olarak çalışabilmektedir. Bu avantajı dolayısıyla elektrikli araçlar, kesintisiz güç kaynakları, yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu gibi birçok önemli alanda çalışabilmektedir. İki yönlü dönüştürücülerin seçilmesi sadece çift yönlü olarak çalışmasından dolayı değil aynı zamanda boyutunun küçük olması ve sistemlerin verimliliğini iyileştirmesinden kaynaklı seçilmektedirler [33]. Elektrikli araçlarda iki yönlü doğru akım dönüştürücülerin kullanımı sadece şarj etme durumunda değil aracın pilinden araç içerisine aktarma sırasında da kullanılmaktadır. Bu kullanım ile aracın rampa çıkarken daha fazla güce ihtiyaç duymasından dolayı pildeki enerji dönüştürücü üzerinden araç elektrik motorlarına gider ve tam aksine rampa inerken tekerlerden elde edilen rejeneratif frenleme ile dönüştürücü üzerinden araç pilleri şarj edilir [34].

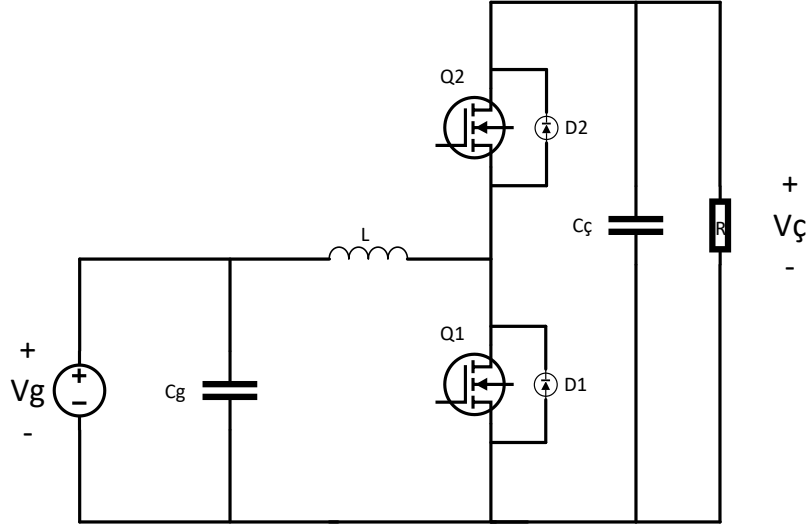
İki yönlü çalışan doğru akım dönüştürücüler girişleri ve çıkışları arasında galvanik izolasyon barındırma durumlarına göre ikiye ayrılmaktadırlar. Galvanik izolasyon aslında basitçe devrenin iki yönlü aktarım yaptığı kısımdaki devrenin kendi kontrolüdür. Belli şartların sağlanması durumunda aktarımın sağlandığı durum gibi düşünülebilir. Eğer galvanik izolasyon barındırıyorsa “izoleli iki yönlü doğru akım dönüştürücü” eğer barındırmıyorsa “izolesiz iki yönlü doğru akım dönüştürücü” olarak ayrılır. İzoleli olan dönüştürücülerde giriş ve çıkış arasında galvanik izolasyonu sağlayan transformatör vb. eleman barındırır. İzolesiz olan dönüştürücüler giriş ve çıkış arasında bir izole sağlamayan daha basit yapılardır.

### **1.3.1. İzolesiz Çift Yönlü Doğru Akım Dönüştürücüler**

İzolesiz iki yönlü doğru akım dönüştürücüler galvanik izolasyonu olmayan dönüştürücülerdir. Genel olarak devrede bulunan anahtarlama elemanına paralel diyot ve diyotu kontrol eden bir anahtarlama elemanı ile tek yönlü dönüştürücülerden ayrılmaktadırlar. İzolesiz iki yönlü doğru akım dönüştürücüler tiplerine göre sekiz gruba ayrılmışlardır. Bu dönüştürücülerin temel anlatımı ve matematiksel ifadeleri verilmiştir. Denklemlerde kullanılan  $n$ ,  $D$ ,  $V_g$ ,  $V_c$  parametreleri sırasıyla transformatör dönüştürme oranı, anahtarların doluluk boşluk oranı, giriş gerilimi ve çıkış gerilimini ifade etmektedir.

#### **1.3.1.1. Temel Çift Yönlü Azaltan (Buck) ve Yükselten (Boost) Dönüştürücü**

İki yönlü azaltan ve yükselten dönüştürücüler ayrı ayrı orijinal halleri referans alınarak ortaya çıkarılmışlardır. Bu dönüştürücü giriş geliminin değişken olduğu ve çıkış geriliminin ise girişe göre yüksek ya da düşük olacağı uygulamalarda sık sık kullanılmaktadırlar [35–37]. Temel çift yönlü azaltan ve yükselten dönüştürücü Şekil 1.1’de verilmektedir.



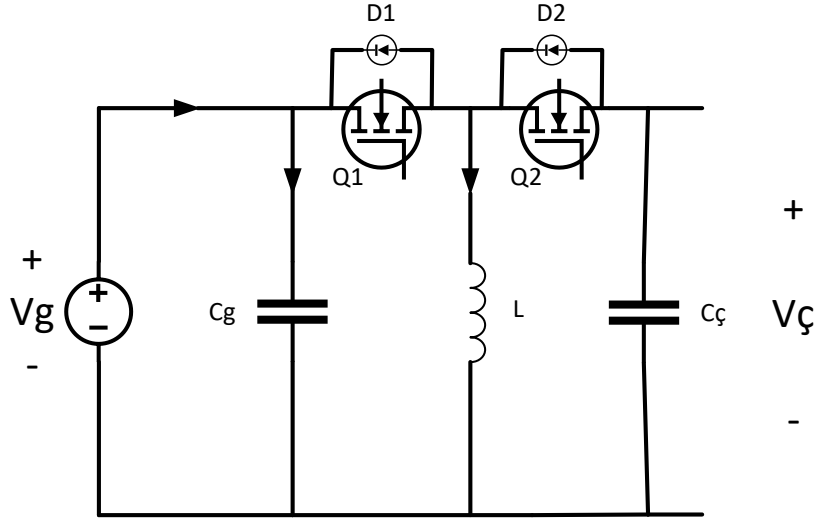
Şekil 1.1. Temel çift yönlü azaltan ve yükselten dönüştürücü

Şekil 1.1’de gösterilen dönüştürücü girişten çıkışa yükselten çıkıştan girişe ise alçaltan dönüştürücü olarak işlev yapmaktadır. Dönüştürücünün giriş ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi veren bağıntı Denklem 1’de gösterilmiştir.

$$\frac{V_{\text{ç}}}{V_g} = \frac{1}{1 - D} \quad (1)$$

### 1.3.1.2. İzolesiz Çift Yönlü Azaltan (Buck)-Yükselten (Boost) Dönüştürücü

Temel çift yönlü alçaltan ve yükselten dönüştürücü ile aynı mantıkta yapılan bir dönüştürücüdür. Farkı ise tek anahtara paralel olacak şekilde kapasite bağlanmamış olmasıdır [38]. Şekil 1.2’de çift yönlü alçaltan-yükselten dönüştürücü devresi gösterilmiştir.



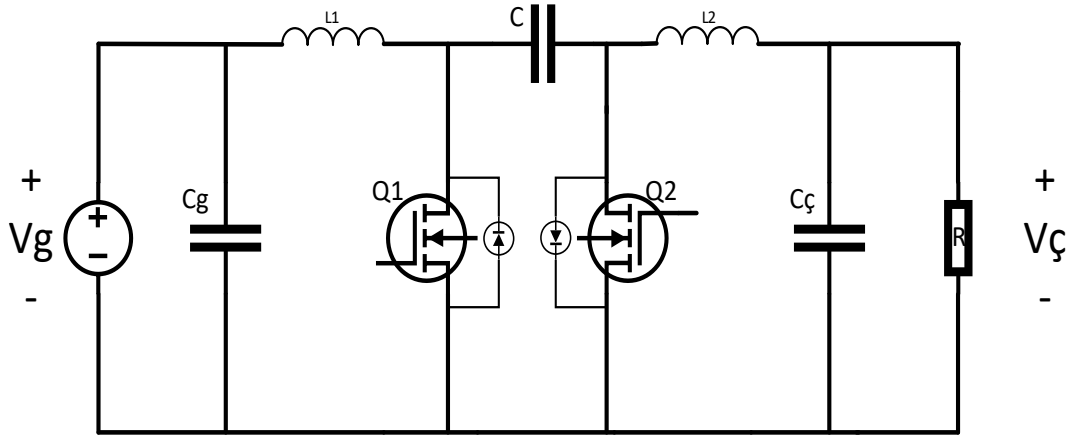
Şekil 1.2. İzolesiz çift yönlü azaltan-yükselten dönüştürücü

Şekil 1.2’de verilmiş olan devrenin giriş ve çıkış gerilimi arasındaki matematiksel ifadesi Denklem 2’de verilmektedir.

$$\frac{V_{\text{ç}}}{V_g} = \frac{-D}{1-D} \quad (2)$$

### 1.3.1.3. İzolesiz Çift yönlü Cuk Dönüştürücü

İzolesiz çift yönlü Cuk dönüştürücünün iki yönlü olmasını sağlamak için tek yönlü Cuk dönüştürücüdeki yarı iletken anahtar ve diyot yerine iki yönlü güç anahtarı yerleştirilmiştir [39–41]. Şekil 1.3’te elde edilen dönüştürücü verilmektedir.



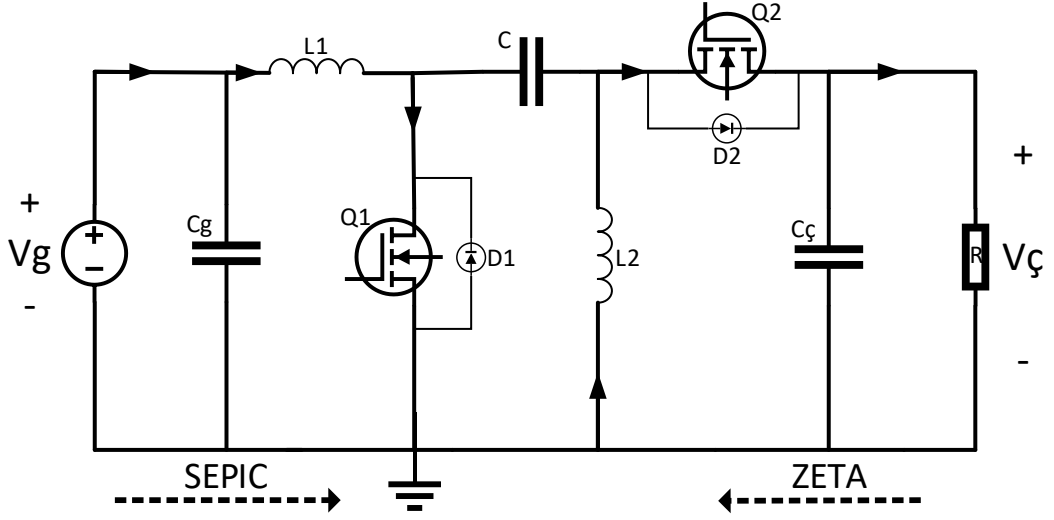
Şekil 1.3. İzolesiz çift yönlü cuk dönüştürücü

Şekil 1.3'te verilen dönüştürücünün giriş ve çıkışı arasındaki matematiksel ifade Denklem 3'te verilmektedir.

$$\frac{V_g}{V_c} = \frac{-D}{1-D} \quad (3)$$

#### 1.3.1.4. İzolesiz Çift Yönlü SEPIC-Zeta Dönüştürücü

İzolesiz Sepic-Zeta dönüştürücü temelde Cuk dönüştürücünün farklı şekilde tasarlanmasıdır. Hibrit pil depolama sistemlerinde kullanılmaktadır [42]. Girişten çıkışa Sepic, çıkıştan girişe ise Zeta olarak çalışmaktadır [43]. Şekil 1.4'te SEPIC-Zeta dönüştürücü devresi gösterilmektedir.



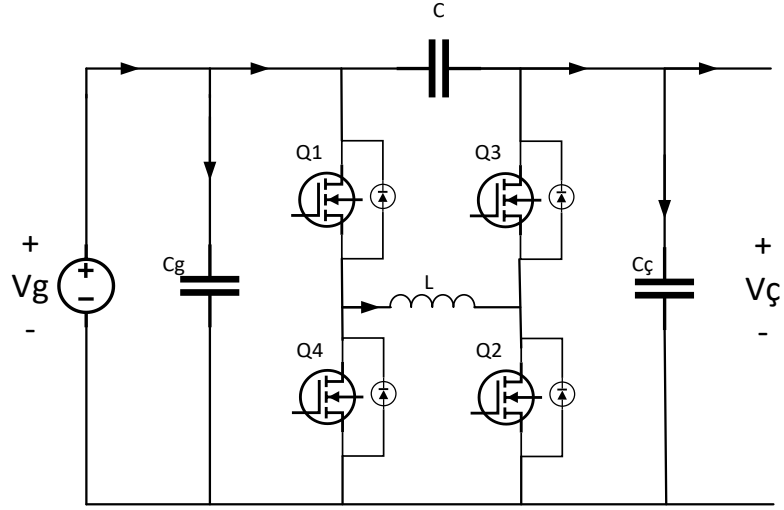
Şekil 1.4. İzolesiz çift yönlü SEPIC-Zeta dönüştürücü

Şekil 1.4'te verilen dönüştürücünün matematiksel olarak ifadesi Denklem 4'te verilmektedir.

$$\frac{V_g}{V_{\zeta}} = \frac{D}{1-D} \quad (4)$$

### 1.3.1.5. İzolesiz Çift Yönlü Kaskad Dönüştürücü

İzolesiz çift yönlü kaskad dönüştürücü iki tane buck ve boost dönüştürücünün birbirine kaskad bağlanmasıyla elde edilir. Elektrikli araçların hem sürüş hem de rejeneratif frenleme sisteminin ilk ortaya çıktığı zamanlarda kullanılmıştır [44]. Şekil 1.5'te kaskad dönüştürücü devresi gösterilmiştir.



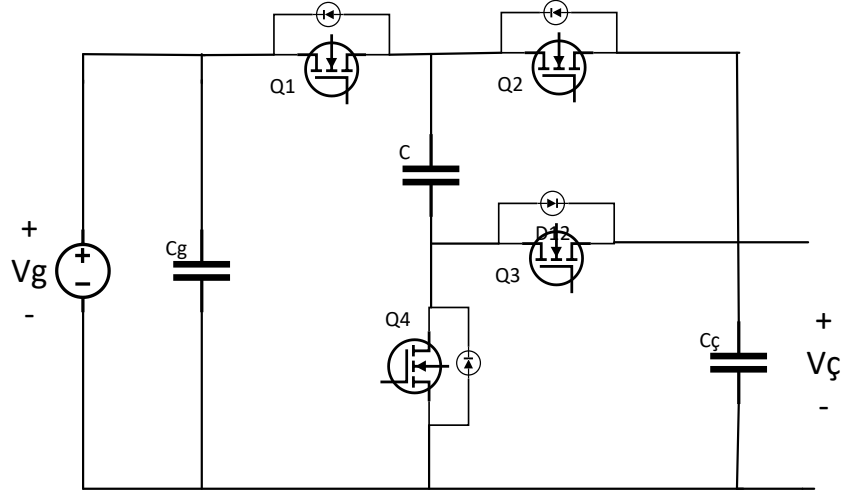
Şekil 1.5. İzolesiz çift yönlü kaskad dönüştürücü

Şekil 1.5'te verilen çift yönlü kaskad dönüştürücünün giriş ve çıkış geriliminin matematiksel olarak ifadesi Denklem 5'te gösterilmektedir.

$$\frac{V_g}{V_{\zeta}} = \frac{1}{1 - D} \quad (5)$$

### 1.3.1.6. Çift Yönlü Anahtarlama Kapasitörlü Dönüştürücü

Çift yönlü anahtarlama kapasitörlü dönüştürücü öncelikle devrenin dönüştürme oranını arttırmak amaçlı yapılmıştır. Kapasitelerin devrede olması gerilim dalgalanmasının da önüne geçmektedir [45]. Şekil 1.6'da dönüştürücünün devresi gösterilmektedir.



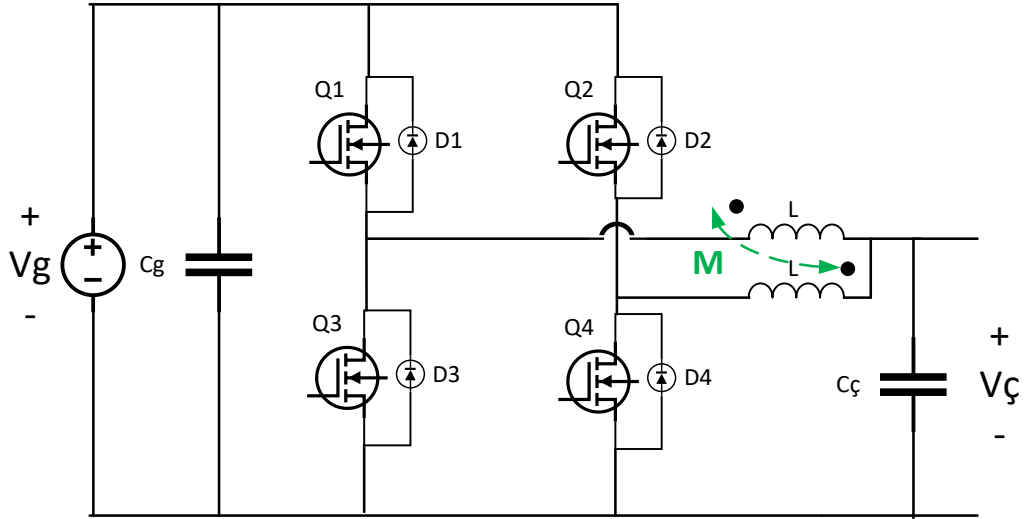
Şekil 1.6. Çift yönlü anahtarlama kapasitörlü dönüştürücü

Şekil 1.6’da verilen dönüştürücü devresinin matematiksel olarak ifadesi Denklem 6’da verilmektedir.

$$\frac{V_C}{V_g} = 2 \quad (6)$$

### 1.3.1.7. Çift Yönlü İnterleaved Dönüştürücü

Dönüştürücü anahtarların boşalma terminalleri arasına bağlanan endüktans, kapasite ile oluşturulur. Çift yönlü interleaved dönüştürücü temelde devrenin akım dalgalanmalarını azaltır ve filtreye ihtiyaç duymaktadır [46, 47]. Şekil 1.7’de dönüştürücü devresi gösterilmektedir.



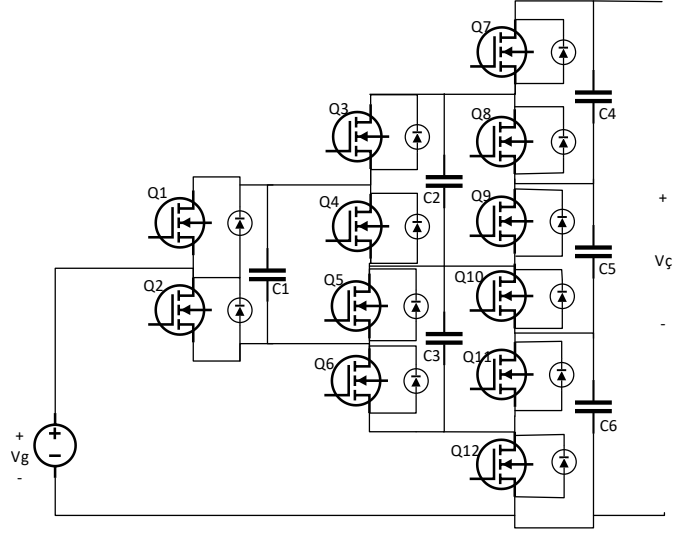
Şekil 1.7. Çift yönlü interleaved dönüştürücü

Şekil 1.7’de verilen dönüştürücü devrenin matematiksel ifadesi Denklem 7’de verilmektedir.

$$\frac{V_{\text{Ç}}}{V_g} = \frac{1}{1-D} \quad (7)$$

### 1.3.1.8. Çift Yönlü Çok Seviyeli Dönüştürücü

Çift yönlü çok seviyeli dönüştürücünün seçilmesindeki amaç gerilim kazancını yükseltebilmektir. Genellikle yüksek gerilim iletim sistemlerinde ve otomotiv sistemlerinde kullanılmaktadır [48, 49]. Şekil 1.8’de dönüştürücünün devresi gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Çift yönlü çok seviyeli dönüştürücü

Şekil 1.8’de verilen devrenin giriş ve çıkış gerilimi arasındaki matematiksel ifade Denklem 8’de verilmektedir.

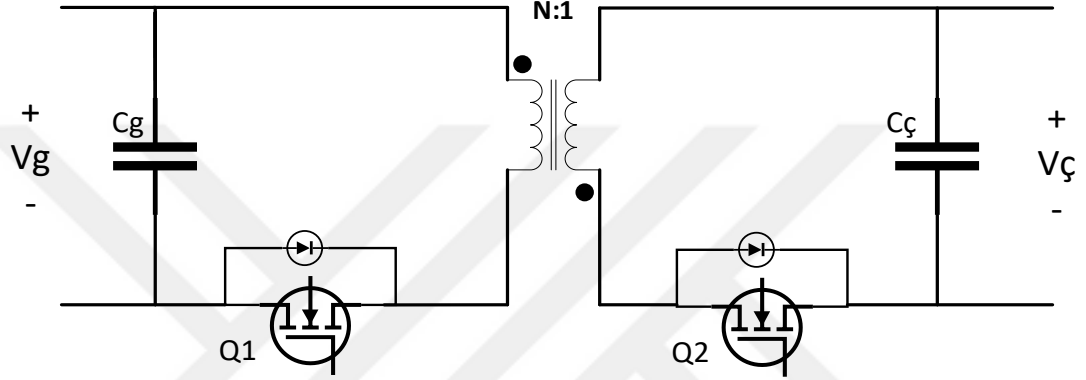
$$\frac{V_C}{V_g} = n = 3 \quad (8)$$

### 1.3.2. İzoleli Çift Yönlü Doğru Akım Dönüştürücüler

İzoleli çift yönlü doğru akım dönüştürücüler yüksek gerilim aralığı olan ve gürültülerden etkilenen sistemlerde daha çok tercih edilmektedir. İzole olan dönüştürücüler elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemlerinin şebekeye entegre edilmesinde, güç akışlarının güvenlik önleminin daha fazla olması gerektiği noktalarda kullanılmaktadır. Galvanik izoleli olan dönüştürücüler kendi içerisinde sekiz çeşide ayrılmaktadır.

### 1.3.2.1. İzoleli Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü

Çift yönlü flyback dönüştürücü iki yönlü buck-boost dönüştürücü devresinden elde edilir. Dönüştürücünün transformatör içermesiyle galvanik izolasyonu sağlanır [50, 51]. Şekil 1.9’da çift yönlü flyback dönüştürücünün devresi gösterilmektedir.



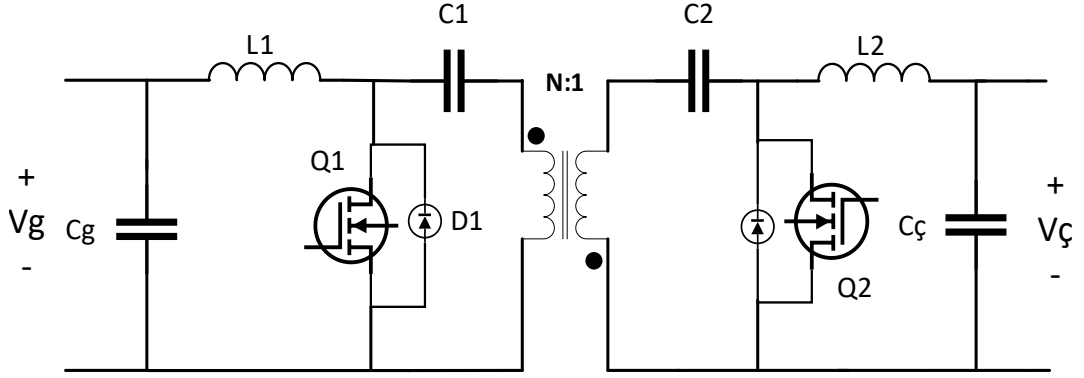
Şekil 1.9. İzoleli çift yönlü flyback dönüştürücü

Şekil 1.9’da verilen dönüştürücünün giriş ve çıkış arasındaki matematiksel ifade Denklem 9’da verilmektedir.

$$\frac{V_{\text{ç}}}{V_g} = \frac{nD}{1-D} \quad (9)$$

### 1.3.2.2. İzoleli Çift Yönlü Cuk Dönüştürücü

Dönüştürücüye izolasyon sağlayabilmesi için transformatör eklenmesi ile elde edilmektedir. Şekil 1.10’da izoleli iki yönlü cuk dönüştürücü gösterilmektedir.



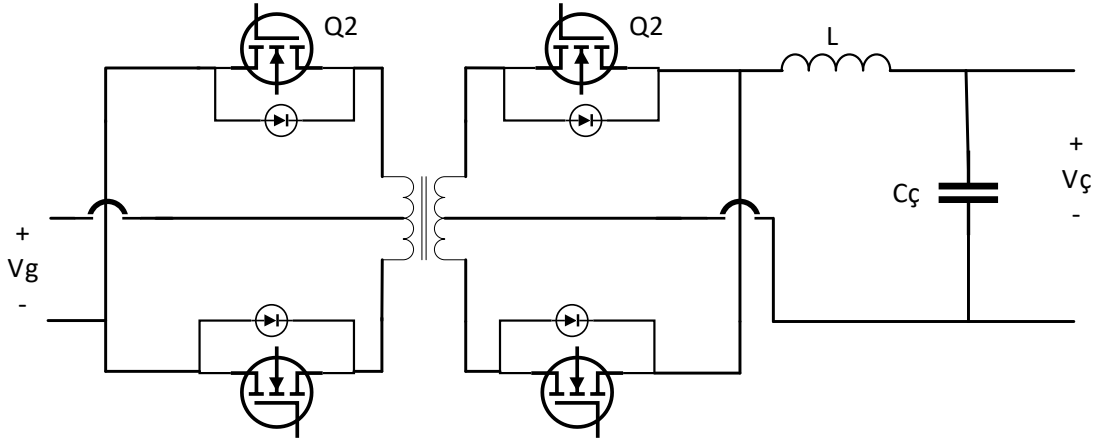
Şekil 1.10. İzoleli çift yönlü cuk dönüştürücü

Şekil 1.10'da gösterilen dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi arasındaki matematiksel ifade Denklem 10'da verilmektedir.

$$\frac{V_{\text{ç}}}{V_{\text{g}}} = \frac{nD}{1-D} \quad (10)$$

### 1.3.2.3. İzoleli Çift Yönlü Push-Pull Dönüştürücü

İzoleli çift yönlü Push-Pull dönüştürücü dört adet anahtarlama elemanı ve transformatör ile izolasyon sağlanarak oluşturulmuştur. Empedans giriş voltajının artırılmasını sağlamakta kapasite ise voltaj dalgalanmasını önlemektedir [52]. Şekil 1.11'de dönüştürücünün devresi gösterilmektedir.



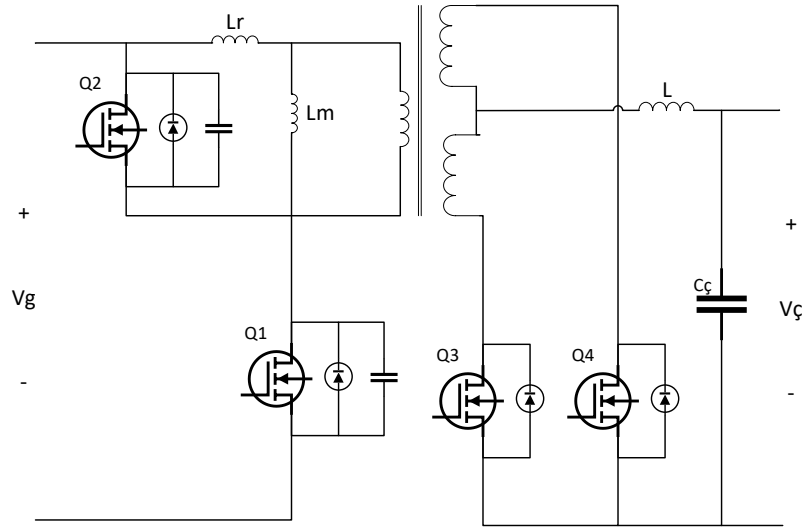
Şekil 1.11. İzoleli çift yönlü push-pull dönüştürücü

Şekil 1.11’de verilen devrenin giriş ve çıkışı arasındaki matematiksel ifade Denklem 11’de verilmektedir.

$$\frac{V_c}{V_g} = nD \quad (11)$$

#### 1.3.2.4. İzoleli Çift Yönlü İleri Yön Dönüştürücü

İleri yön dönüştürücüde bulunan diyot ve anahtarlama elemanlarının yerine güç anahtarları kullanılarak elde edilmektedir. Yarı köprü ve tam köprü dönüştürücülerin kullanılmadığı durumlarda tercih edilmektedirler. Şekil 1.12’de dönüştürücünün devresi verilmektedir [5].



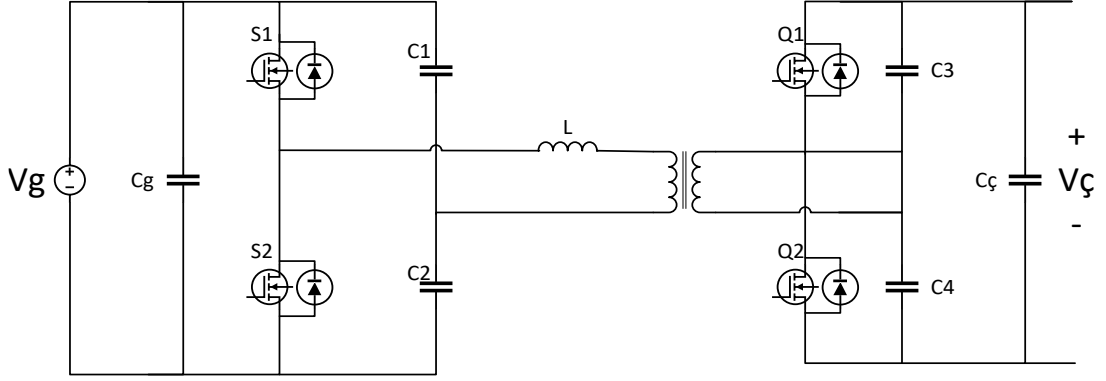
Şekil 1.12. İzoleli çift yönlü ileri yön dönüştürücü [5].

Şekil 1.12’de verilen dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimi arasındaki matematiksel ifade Denklem 12’de verilmektedir.

$$\frac{V_c}{V_g} = nD \quad (12)$$

### 1.3.2.5. Çift Yönlü İki Yarım Köprü Dönüştürücü

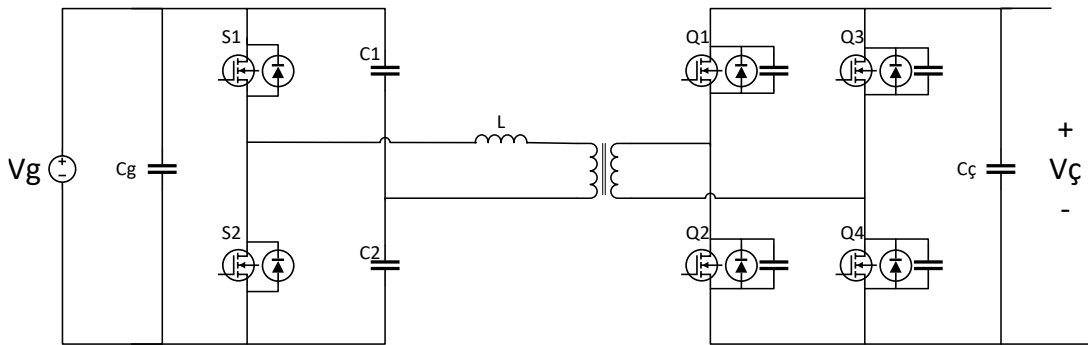
Çift yönlü iki yarım köprü dönüştürücü transformatörün birincil ve ikincil taraflarında bulunan iki ayrı yarım köprüden oluşmaktadır. Dört adet güç anahtarı elemanı bulunmaktadır. Şekil 1.13’te dönüştürücü devresi gösterilmektedir [5].



Şekil 1.13. Çift yönlü iki yarım köprü dönüştürücü

### 1.3.2.6. Çift Yönlü Bir Tam Köprü Bir Yarım Köprü Dönüştürücü

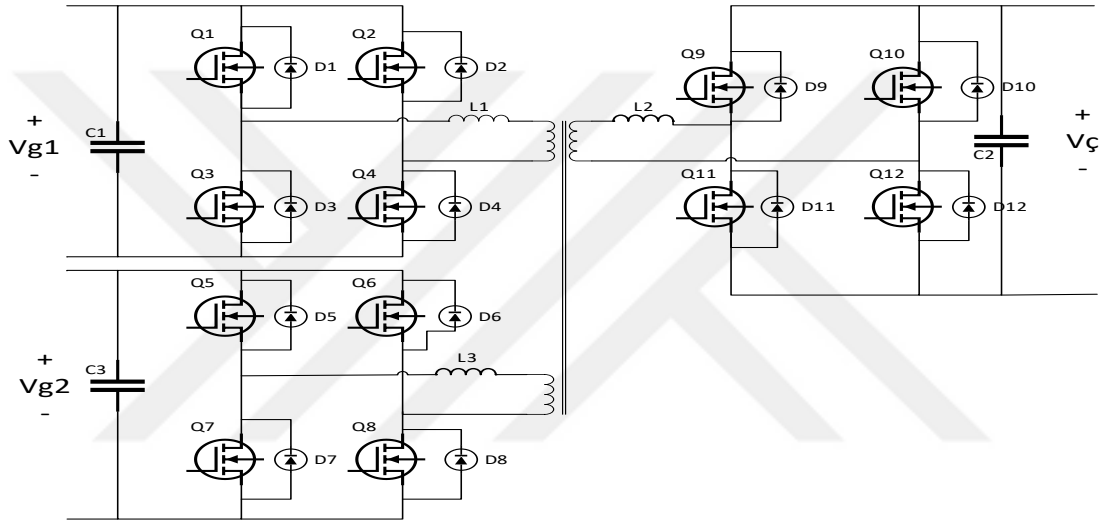
İki yarım köprü dönüştürücünden farkı transformatörün bir tarafında yarım köprü değil tam köprü bulunmasıdır. Dönüştürücüde altı adet güç anahtarı bulunmaktadır. Dönüştürücünün kontrolünü daha detaylandırmaktadır. Şekil 1.14'te dönüştürücünün devresi gösterilmektedir [5].



Şekil 1.14. Çift yönlü bir tam bir yarım köprü dönüştürücü

### 1.3.2.7. Çift Yönlü Çok Girişli İki Tam Köprü Dönüştürücü

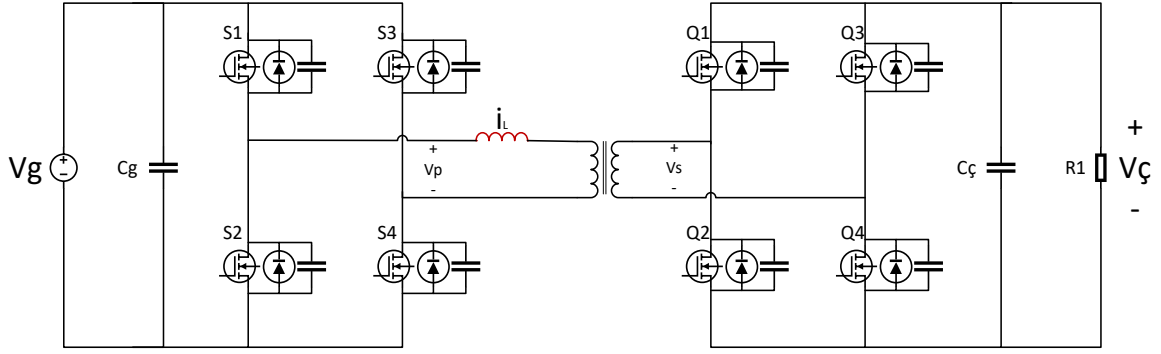
Dönüştürücünün çok girişli olması transformatörün çok sargılı olmasından kaynaklanmaktadır. Genellikle hibrit araç sistemlerinde ve yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılmaktadır. Dönüştürücüde 12 adet güç anahtarı bulunmaktadır [53]. Şekil 1.15’de dönüştürücü devresi gösterilmektedir.



Şekil 1.15. Çift yönlü çok girişli iki tam köprü dönüştürücü

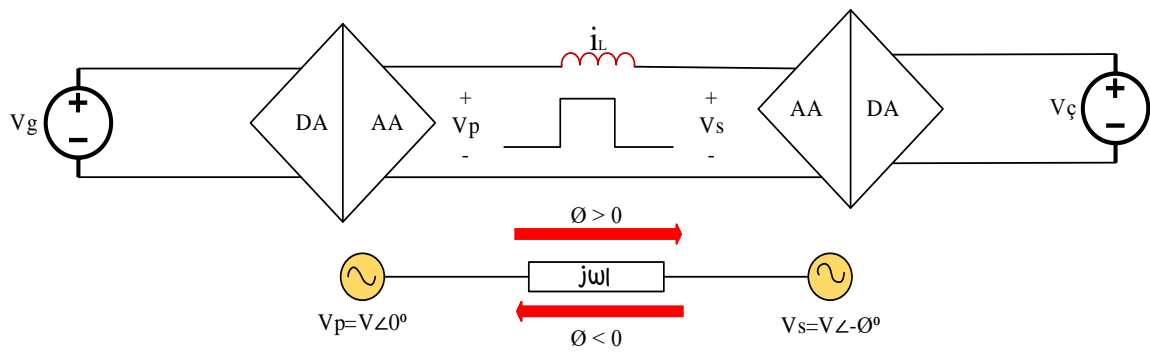
### 1.3.2.8. İki Yönlü Çift Aktif Köprü Dönüştürücü

Dönüştürücüde galvanik izolasyonu sağlayan transformatörün birincil ve ikincil bölgesine bağlı tam köprülerden oluşmaktadır. Dönüştürücüde sekiz adet güç anahtarı bulunmaktadır. Anahtar sayısının artmasıyla birlikte dönüştürücünün kontrolü daha da detaylı hale gelmektedir. Dönüştürücünün çalışması bu anahtarlamalar ile belirlenmektedir. Birincil ve ikincil köprü arasında oluşturulan bir faz kaymasıyla birlikte dönüştürücünün enerji transferi belirlenmektedir [8]. Şekil 1.16’da dönüştürücünün devresi gösterilmektedir.



Şekil 1.16. İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücü

Şekil 1.16’da verilen iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün elemanlarının seçimi önemli bir etkiye sahiptir. Dönüştürücü tek yönlü çalışan sistemlere göre kapladığı yer, malzeme sayısı ve verimlilikte avantajlıdır. Şekil 1.17’de verilen iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün giriş ile çıkış arasında çalışma mantığı göstermektedir. Dönüştürücüye gelen DA gerilim birincil taraftaki köprüde bulunan anahtarlar ile AA kare dalga gerilimine dönüştürür ve transformatör girişine uygulanır. Transformatör çıkışından sonra ikincil köprüde bulunan anahtarlar ile AA gerilimindeki kare dalga tekrar DA gerilime dönüştürülür [54, 55].



Şekil 1.17. İki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücünün çalışma mantığı

Şekil 1.17’de verilen temel devrenin basit matematiksel ifadesi Denklem 13’te verilmiştir. Denklemde bulunan endüktansın akım ifadesinin gösterimi Denklem 14’te verilmiştir.

$$V_L(t) = V_g(t) - nV_c(t) \quad (13)$$

$$i_L(t) = i_L(t_0) - \frac{1}{L} \int_{t_0}^{t_0+T_s} V_L(t) dt \quad (14)$$

Denklem 14’te verilen akım ifadesinin zamanla değişen güç bir kare dalga süresince oluşmaktadır. Oluşturulan güç değerinin ifadesi Denklem 15’te verilmektedir. İki yönlü çift aktif köprülü DA-DA dönüştürücünün kayıpsız olan modelin güç ifadesi Denklem 16’da olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$P = \frac{1}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+T_s} P(t) dt = \frac{2}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+\frac{T_s}{2}} V_g(t) \cdot i_L(t) dt \quad (15)$$

$$P = \frac{2V_g}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+\frac{T_s}{2}} i_L(t) dt \quad (16)$$

Endüktans akımını yarım anahtarlama döngüsü boyunca  $P$  güç ifadesi oluşumuna yol açar. Denklem 16’da görüldüğü üzere zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Endüktans akımı için belirtilen zaman aralığında pozitif bir faz kayma açısı varsayılarak oluşan ifade Denklem 17’de verilmektedir [55].

$$i_L(t) = \begin{cases} i_L(t_0) + \frac{V_g + n \cdot V_c}{L} \cdot t & t_0 \leq t \leq t_\emptyset, \\ i_L(t_\emptyset) + \frac{V_g - n \cdot V_c}{L} \cdot (t - t_\emptyset) & t_\emptyset \leq t \leq t_0 + \frac{T_s}{2} \end{cases} \quad (17)$$

Endüktans akımı transformatör üzerine uygulanan gerilimin alternatif olmasından dolayı bir alternatif akımdır. Alternatif akıma sahip endüktans akımının anahtarlama döngüsü boyunca ortalama değeri sıfırdır. Bu nedenle akım pozitif ve negatif olarak simetri gösterir. Başlangıç anında oluşan endüktans akım ifadesi Denklem 18’de verilmektedir. Buradan pozitif faz kayma modülasyonu için akım değeri Denklem 19’da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. Negatif faz kayma olması durumunda da benzer bir ifade oluşacaktır [55].

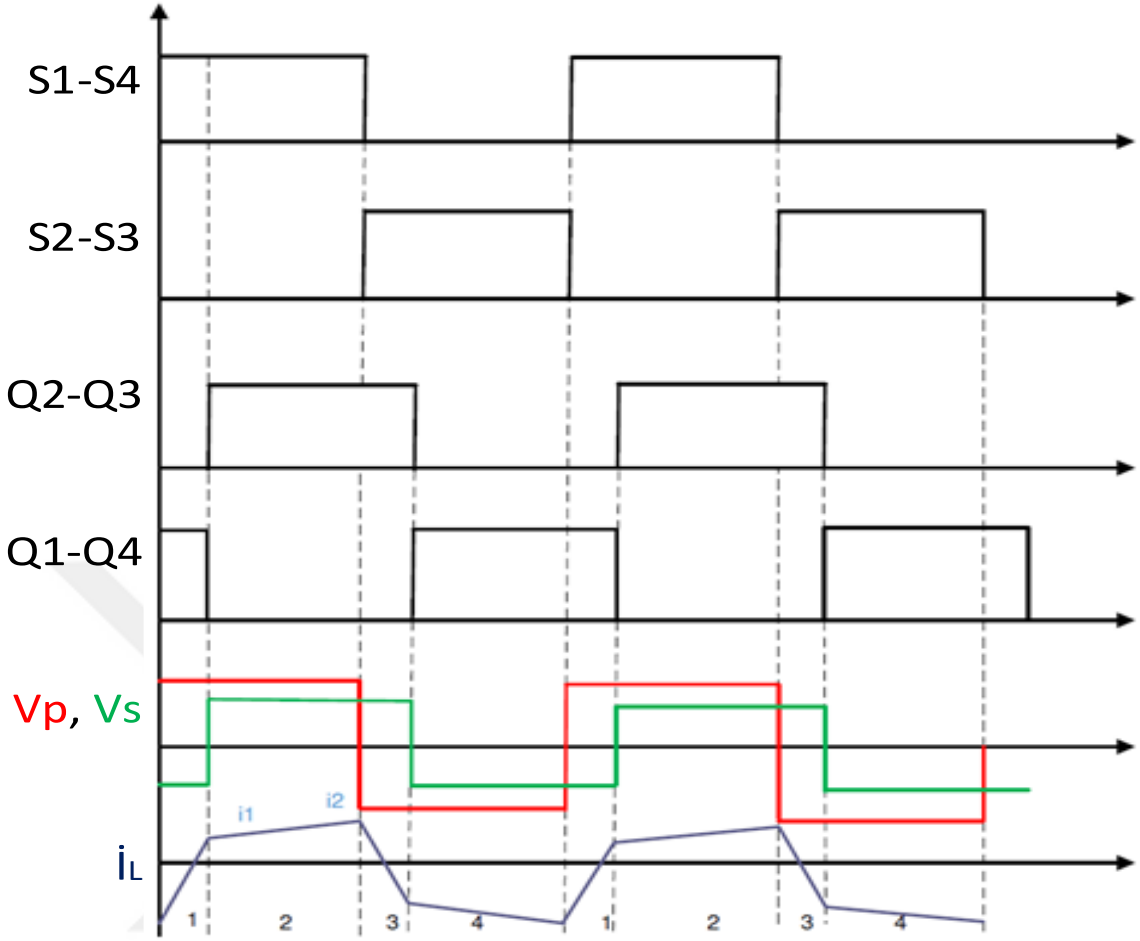
$$i_L(t_0) = \frac{\pi \cdot (nV_\zeta - V_g) - 2\phi nV_\zeta}{\omega L} \quad (18)$$

$$i_L(t_\phi) = \frac{\pi \cdot (nV_\zeta - V_g) + 2\phi V_g}{\omega L} \quad (19)$$

Şekil 1.17’de görülen devrenin çalışma prensibi üzerinden dönüştürücünün oluşturacağı gücün matematiksel ifadesi denklemlerden elde edilerek temel bir ifade oluşturulmuştur. Oluşturulan basit matematiksel ifade Denklem 20’de verilmiştir. Denklemden bulunan  $P$ ,  $V_g$ ,  $V_\zeta$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  ve  $L$  parametreleri sırasıyla çıkış gücü, giriş gerilimi, çıkış gerilimi, açısal hızı, faz kaymasını ve kaçak endüktansı belirtir.

$$P = \frac{V_g V_\zeta \sin \phi}{\omega L} \quad (20)$$

Dönüştürücü iki köprüde bulunan anahtarların anahtarlama işaretleri arasında oluşturulan faz farkı ile çalışmaktadır. Faz farkı birincil ve ikincil köprü arasında anahtarlama işaretlerinin davranışı ile oluşmaktadır. Şekil 1.18’de tek faz kayması yöntemiyle gösterilen durumda devrenin anahtarlarının giriş ve çıkış üzerinde oluşturduğu faz kayması ve faz kaymasıyla transformatörün kaçak endüktansı üzerinde oluşan akımın grafiği de görülmektedir. Devrenin kaçak endüktans akımı üzerinde oluşturduğu bölgeler üzerinden matematiksel ifade çıkarılmaktadır.



Şekil 1.18. Anahtarlamalar, birincil ve ikincil gerilimler ve kaçak endüktans akımı [55].

Denklem 20’de ve Şekil 1.18’de görüldüğü üzere devrenin çalışmasında birçok devre elemanı etkiye sahiptir. Dönüştürücüde istenilen gerilim aralığı, transformatör kaçak endüktans değeri ve anahtarlamaların frekansı göz önüne alındığında Denklem 20 sistem parametrelerine göre düzenlenerek Denklem 21 oluşturulmuştur. Denklemde daha önceden bilinmeyen  $n$  ve  $F_s$  parametreleri sırasıyla transformatör dönüştürme oranını ve anahtarlama frekansını belirtir.

$$P = \frac{nV_g V_\zeta \phi (\pi - \phi)}{2\pi^2 F_s L} \quad (21)$$

Denklemlerde verilen faz kayma açısı ile devrenin birincil ve ikincil köprüsü arasında elde edilen güç akışı oranı değiştirilebilmektedir. İki köprü arasında elde edilen faz kayma açısı iki köprüde bulunan anahtarların farklı çalışma yöntemleri ile belirlenebilmektedir. Denklem 22’de faz kayma açısının matematiksel ifadesi verilmektedir [55].

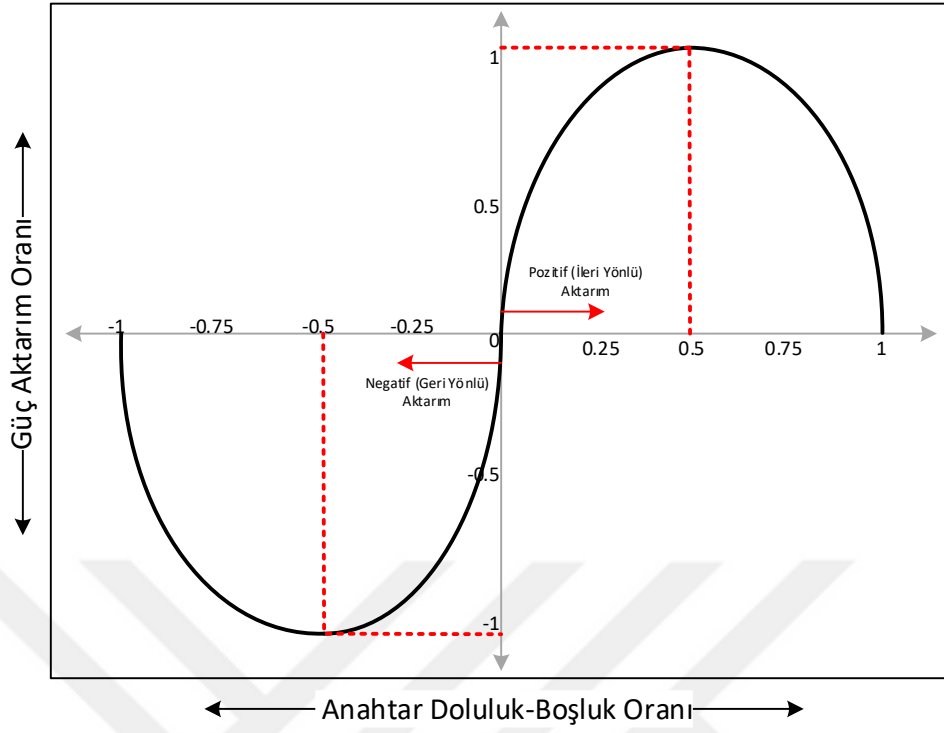
$$\phi = \frac{\pi}{2} * \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{8 * F_S * L * P_{\text{çıkış}}}{n * V_g * V_{\text{ç}}}} \right) \quad (22)$$

Denklem 22’de verilen faz kayma açısının olmadığı durumlarda iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücüde reaktif güç varlığı oluşmaktadır. Reaktif gücün dönüştürücü üzerinde olduğunu gösteren ifadeler faz kayma açısı sıfır iken Denklem 23’te ve Denklem 24’te gösterilmektedir. Denklemlerde gösterildiği üzere dönüştürücünün faz kayma açısı sıfırken yani giriş ve çıkış gerilimleri arasında eşitsizlik olduğu durumlarda reaktif bir etkinin varlığı görülebilmektedir [56]. Denklemlerde bulunan  $I_{max}$  ve  $I_0$  parametreleri sırasıyla en yüksek akımı ve çıkış akımını belirtir.

$$I_{max} = \frac{n}{4F_S L} [-(1 - 2D)nV_G + V_{\text{ç}}] \quad (23)$$

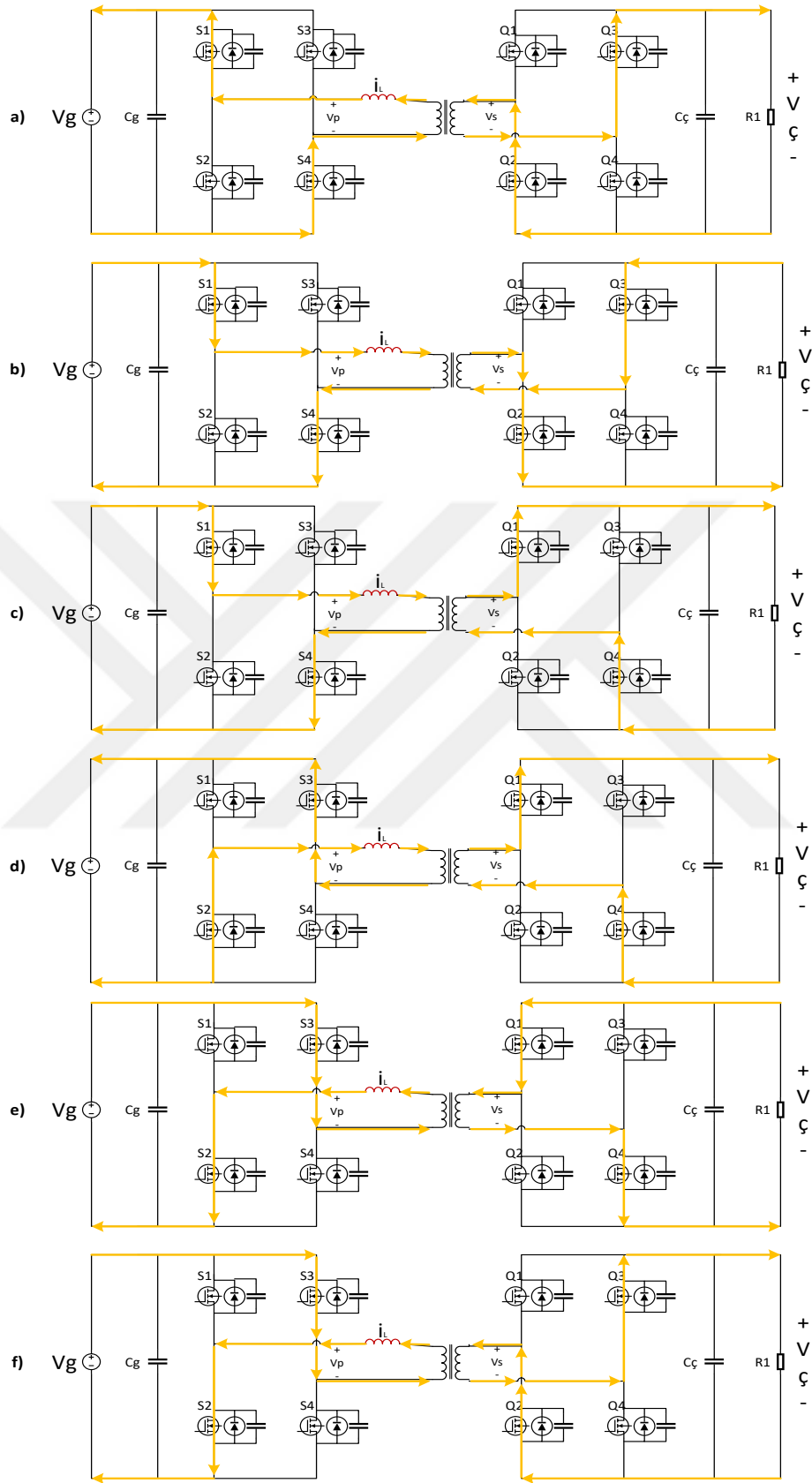
$$I_0 = \frac{n}{4F_S L} [-(1 - 2D)V_{\text{ç}} - nV_G] \quad (24)$$

Dönüştürücü devresinin matematiksel ifadeleri literatür çalışmalarından elde edilmiştir. Elde edilen denklemlerin verimli bir şekilde çalışabilmesi için anahtarlar %50 doluluk oranında çalışması gerektiği çalışmalarda incelenmiştir. Şekil 1.19’da dönüştürücüde bulunan anahtarların doluluk oranına göre güç akışı iletimi grafikte gösterilmiştir [54]. Dönüştürücünün çalıştığı anlarda kaçak endüktans üzerinde negatif veya pozitif bir akım oluşmaktadır. Pozitif olması istenilen yönde çalıştığını ve negatif olması istenilen yönün tersine çalıştığını göstermektedir.



Şekil 1.19. Güç aktarımı ve anahtar doluluk boşluk oranı arasındaki ilişki

Transformatör kaçak endüktans akımı üzerinde oluşan dört farklı bölgenin hangi devre elemanları üzerinden oluştuğu Şekil 1.20’de gösterilmiştir.



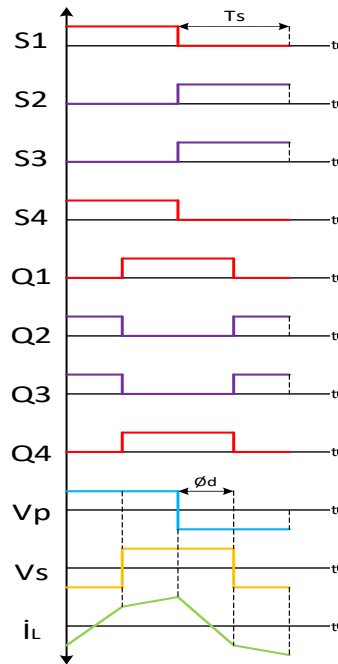
Şekil 1.20. Tüm çalışma aralıkları a-b) 1.aralık, c) 2.aralık, d-e) 3.aralık, f) 4.aralık

## 1.4. İki Yönlü Doğru Akım Dönüştürücülerin Anahtarlama Yöntemleri

İki yönlü doğru akım dönüştürücülerin verimli bir şekilde çalışması için üzerlerinde bulunan güç anahtarlarının kontrol edilmesi gerekmektedir. Anahtarlama yöntemleri üzerine olan çalışmalarda sıkça kullanılan yöntemlerden bazıları TFK, ÇFK, üç faz kaydırma (ÜFK) ve genişletilmiş faz kaydırma (GFK)' dir [57–59].

### 1.4.1. Tek Faz Kaydırma Yöntemi

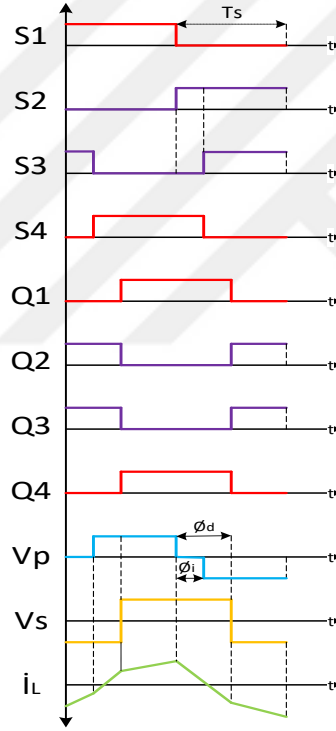
İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü için kullanılan ilk anahtarlama yöntemidir. Dönüştürücü temel çalışma prensibi referans alınarak geliştirilmiştir. Dönüştürücüde bulunan köprülere kolay uygulanabilir olmasından dolayı faz farkı oluşturulmaktadır [60]. TFK anahtarlama yöntemi Şekil 1.21'de görülmekte olan sekiz adet anahtarlama elemanının %50 doluluk oranında kare dalga üretmesiyle elde edilir. İki köprü arasında oluşan faz farkının kontrol edilmesiyle çalışmaktadır. Faz farkının negatif veya pozitif olması dönüştürücünün yönünü belirtmektedir.



Şekil 1.21. Tek faz kaydırma yönteminin gösterimi

### 1.4.2. Genişletilmiş Faz Kaydırma Yöntemi

Dönüştürücünün ilk anahtarlama yöntemi olan TFK anahtarlamanın geliştirilmiş hali olarak önerilmiştir. Bu anahtarlama yöntemi değişen yüklerde bozulan yumuşak anahtarlama etkilerini düzeltmede tek faz anahtarlama yöntemine göre daha etkilidir [61, 62]. Şekil 1.22’de görülen birincil köprüde bulunan anahtarlar arasında oluşturulan ikinci bir faz farkıyla birlikte giriş gerilimi üç kademeli bir hale dönüşür. Birincil ve ikincil köprü arasında olan faz farkı açısı korunarak tek faz kaydırma yönteminde olduğu gibi enerji akışı sağlanmaktadır [63].



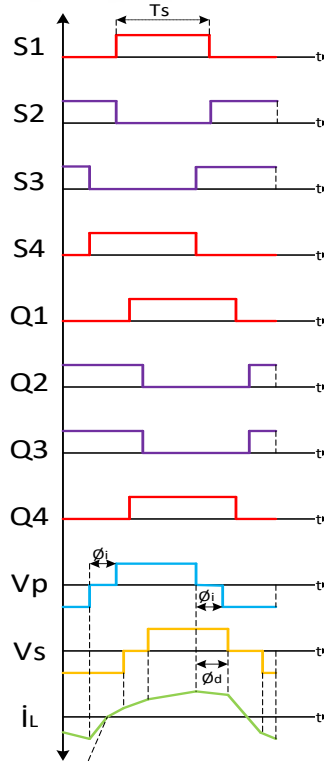
Şekil 1.22. Genişletilmiş faz kayması yönteminin gösterimi

GFK ile birincil köprüde bulunan anahtarlama elemanları arasında oluşturulan faz farkı yumuşak anahtarlama yöntemini geliştirir ve anahtarlar üzerindeki stresi azaltır. Tek faz kaydırma yöntemiyle kıyaslandığında anahtarlar için oluşturulan daha geniş bölgeyle yumuşak anahtarlama alanında artış olur. Bu durum dönüştürücünün veriminin artmasını sağlamaktadır [64].

### 1.4.3. Çift Faz Kaydırma Yöntemi

Dönüştürücü için geliştirilen bu yöntem ilk olarak iki yönlü çift aktif köprülü dönüştürücüde kullanılmıştır. Geliştirilen tek faz ve genişletilmiş faz kayması yöntemlerine göre devrenin daha fazla akım stresini azaltmak ve yumuşak anahtarlama yapılabilmesini sağlamayı amaçlamaktadır [65]. İkili faz kaydırma yöntemi ile devrede oluşan reaktif güç azaltılmaktadır. Tek faz kaydırma yöntemi dönüştürücüde kullanılan ilk yöntem olduğu için dezavantajları çoktur. Ancak daha sonra geliştirilen ikili faz kaydırma yöntemi bu dezavantajları azaltmak veya ortadan kaldırmak içindir.

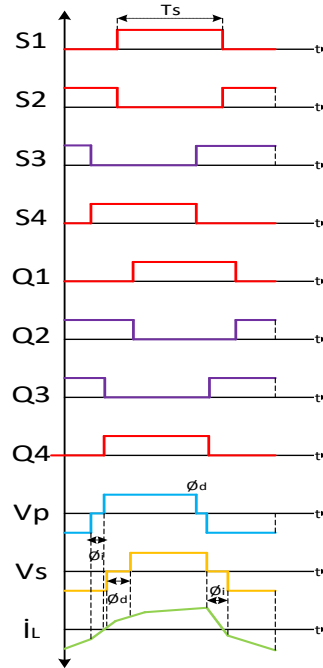
Çift faz aydırma yöntemi genişletilmiş faz kaydırma yönteminde olduğu gibi farklı faz kaymaları oluşturmaktadır. Genişletilmiş faz kaydırma yönteminde birincil köprüdeki anahtarlara uygulanan iç faz farkı ikili faz kaydırma yönteminde her iki köprü için uygulanmaktadır. Uygulanan bu yöntem ile iki köprünün içerisinde de üç kademeli bir gerilim oluşmaktadır. Şekil 1.23'te her iki köprü tarafında oluşan üç kademeli görüntü gösterilmektedir.



Şekil 1.23. Çift faz kaydırma yönteminin gösterimi

#### 1.4.4. Üç Faz Kaydırma Yöntemi

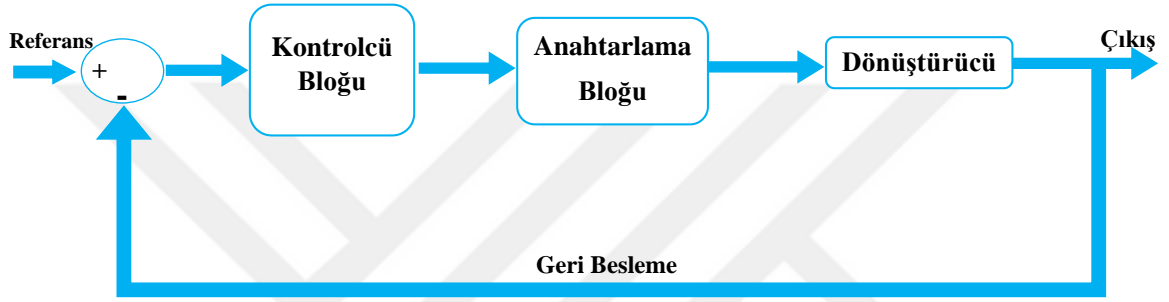
Üç faz kaydırma yöntemi geliştirilmesi ikili faz köprüden sonra olmuştur. İkili faz kaydırma yöntemine ek olarak yapılan bir değişiklik ile ortaya çıkmıştır. İkili faz kaydırma yönteminde olan köprüler arası ve köprüler içerisindeki faz kaymasına ek olarak iki köprü içerisinde bulunan anahtarların iç faz farklarının farklı olabilmesiyle ikili faz kayması yönteminden ayrılır. Bu yöntem ile akım değerlerinde düşme sağlanabilmektedir. Akım değerlerinde gerçekleştirilebilen bu düşme sayesinde uygulamada kullanılan devre elemanlarından direnç, bobin ve transformatörde bulunan sargı elemanları üzerinden kaybedilen güç azaltılmış olur. Dönüştürücüde kullanılan devre elemanlarından geçen akım azalacağı için daha küçük akımlara göre seçilmesi sağlanarak fiyat açısından da avantaj sağlamaktadır [66]. Üç faz kaydırma yöntemi akımları azaltması haricinde dönüştürücüde yük olmadığı dahi kullanılabilir. Tüm anahtarlama yöntemlerine göre en geniş yumuşak anahtarlama aralığında çalışan yöntemdir. Tüm anahtarlama yöntemleri birbirlerinden sonra üretilerek ortaya konulduğu için üç faz kaydırma yöntemi en az dezavantajlı sistemdir. Her anahtarlama yönteminde olan avantajları barındırır. Şekil 1.24'te kaçak endüktans üzerinde olan akımın daha az değişim geçirdiği gösterilmektedir [8].



Şekil 1.24. Üç faz kaydırma yönteminin gösterimi

## 1.5. İki Yönlü Doğru Akım Dönüştürücülerde Kontrol Yöntemleri

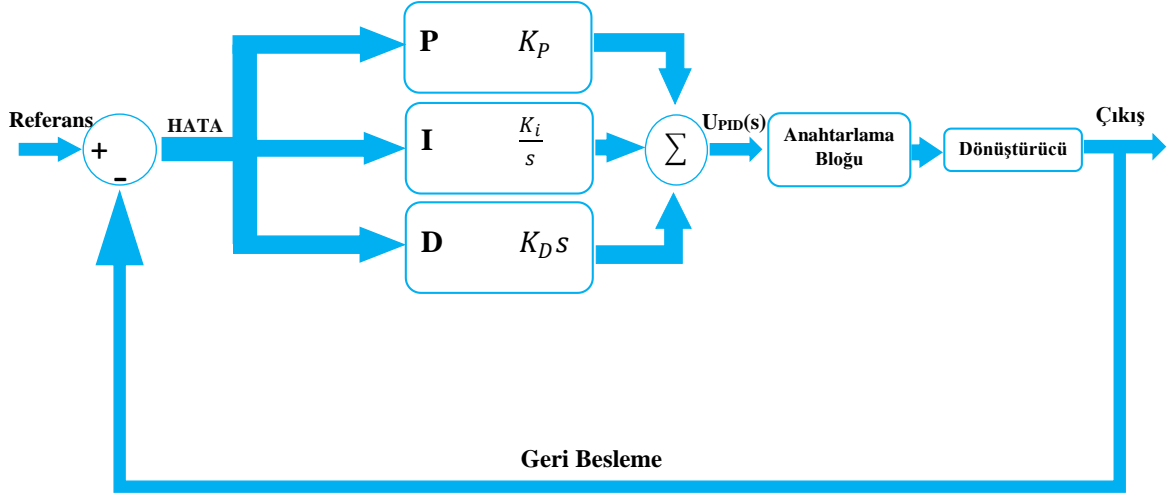
İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü için birçok kontrol yöntemi literatürde uygulanmıştır. Şekil 1.25'te dönüştürücüye uygulanacak olan kontrol sisteminin genel diyagramı verilmiştir. Genel diyagramda dönüştürücünün hangi döngü içerisinde kalarak çalışacağı gösterilmiştir.



Şekil 1.25. Temel kontrol diyagramı

### 1.5.1. Klasik PID Kontrol

İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücüye uygulanan yaygın kontrol yöntemi PID kontrol yöntemidir.  $P$ ; oransal,  $I$ ; integral,  $D$ ; türevi ifade eder.  $P$  parametresi oluşmuş hataya bağlı,  $I$  parametresi geçmiş hataların toplamı,  $D$  gelecekteki hataların bir tahmini mantığıyla çalışmaktadır. Kontrol edilen sistemde istenmeyen  $P$ ,  $I$  veya  $D$  parametresi sıfır olarak kabul edilebilir. Şekil 1.26'da PID kontrolcünün diyagramı gösterilmiştir [67].

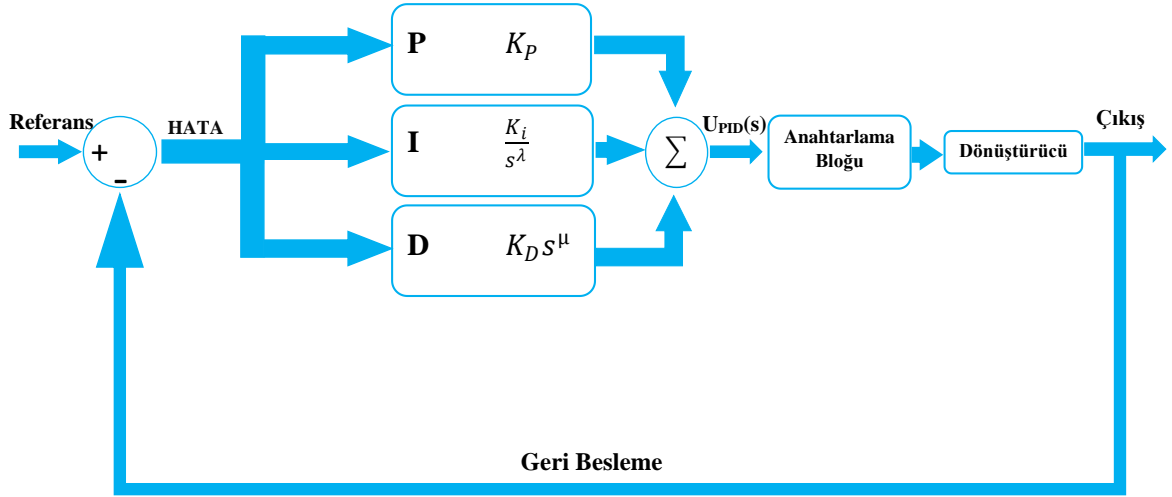


Şekil 1.26. PID kontrol bloğu

### 1.5.2. Kesir Dereceli PID Kontrol

Klasik olarak bilinen PID birinci dereceden türev ve integral işlemi yapmaktadır. Ancak kesir dereceli olan  $P I^\lambda D^\mu$  kontrolcü de  $\lambda$  dereceli integral ve  $\mu$  dereceli türev içerir. Kesir dereceli PID kontrolcününün klasik PID gibi çalışması için çalışması için  $\lambda=1$  ve  $\mu=1$  değerlerini almaktadır. Eğer  $\lambda=1$  ve  $\mu=0$  olarak alınırsa PI kontrolcü olmaktadır. İstenilen klasik PID kontrolcüye kesir dereceli PID kontrol üzerinden ulaşılabilir.

Şekil 1.27’de kesir dereceli PID kontrolcününün diyagramı gösterilmiştir [67, 68]. Kesir dereceli sistemin parametreleri bazı algoritmalar kullanılarak bulunabilir. Sisteme uygun bir algoritma seçerek hatanın en aza indirilmesini sağlayacak parametreler bulunabilir.



Şekil 1.27. Kesir dereceli PID kontrol bloğu

### 1.5.2.1. Mayıs Sineği (Mayfly) Optimizasyon Algoritması

Mayıs sineğinden etkilenecek oluşturulmuş bir algoritmadır. Erkek olan türlerin çiftleşmek için dişileri etkileme hareketlerinin incelenmesiyle oluşturulmuştur. Erkeklerin hareketi, dişilerin hareketi ve çiftleşme olacak şekilde üç ana kısımdan oluşur ve birbirleriyle bağlanır. Erkek ve dişilerin yerçekimi sabitleri Denklem 25 üzerinden aynı şekilde belirlenir. Denklemde bulunan  $g$  yer çekimi, iterasyon ise yineleme sayısıdır [69].

$$g = g_{max} - \frac{g_{max} - g_{min}}{iter_{max}} * iterasyon \quad (25)$$

Belirlenen sabit erkek ve dişi sineğin konum ve hızlarını göz önünde bulundurularak bir matematiksel denklem oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonuna göre en iyi olan konum ve hız tekrar kullanılarak en iyi konum ve hıza yaklaşılmış olur. Kişisel ve global en iyi konum Denklem 26 ve Denklem 27 ile belirlenir. En iyi hız ise Denklem 28'de verilmiştir. Denklemde bulunan  $pbest$ ,  $gbest$ ,  $N$ ,  $f$ ,  $v$ ,  $d$ ,  $r$  ve  $x$  parametreleri sırasıyla kişisel en iyi, global en iyi, erkeklerin toplam sayısını, amaç fonksiyonunu, hızı, evlilik dansı katsayısı, -1 ile 1 arası rastgele bir değeri ve erkeğin konumunu temsil eder.

$$pbest_i = \begin{cases} x_i^{t+1}, & \text{if } (x_i^{t+1}) < f(\text{kişisel}_i) \\ \text{aksi halde aynı tutulur} \end{cases} \quad (26)$$

$$gbest = \min\{f(pbest_1), f(pbest_2), \dots, f(pbest_N)\} \quad (27)$$

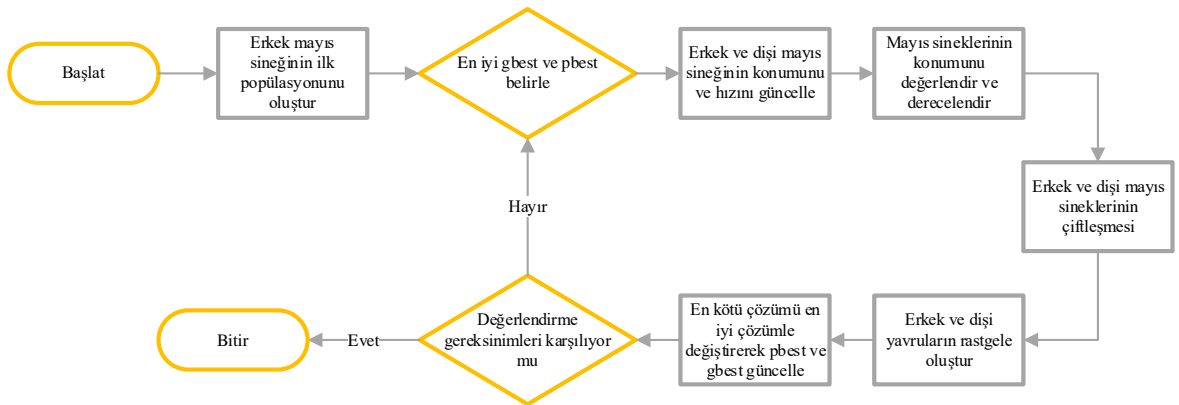
$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + d_t * r \quad (28)$$

En iyi konum ve hıza uygunluk sağlayan dişi ve erkek çiftleşir. Bu çiftleşmeden yola çıkılarak oluşan iki yavrunun denklemleri Denklem 29 ve Denklem 30'da verilmiştir. Böylece matematiksel denklem oluşturularak en iyi parametrelerin bulunabileceği bir algoritma oluşturulmuş olur [69]. Denklemlerde verilen  $Z$  istenilen aralıkta rastgele bir değerdir.

$$yavru1 = L * erkek + (1 - Z) * dişi \quad (29)$$

$$yavru2 = L * dişi + (1 - Z) * erkek \quad (30)$$

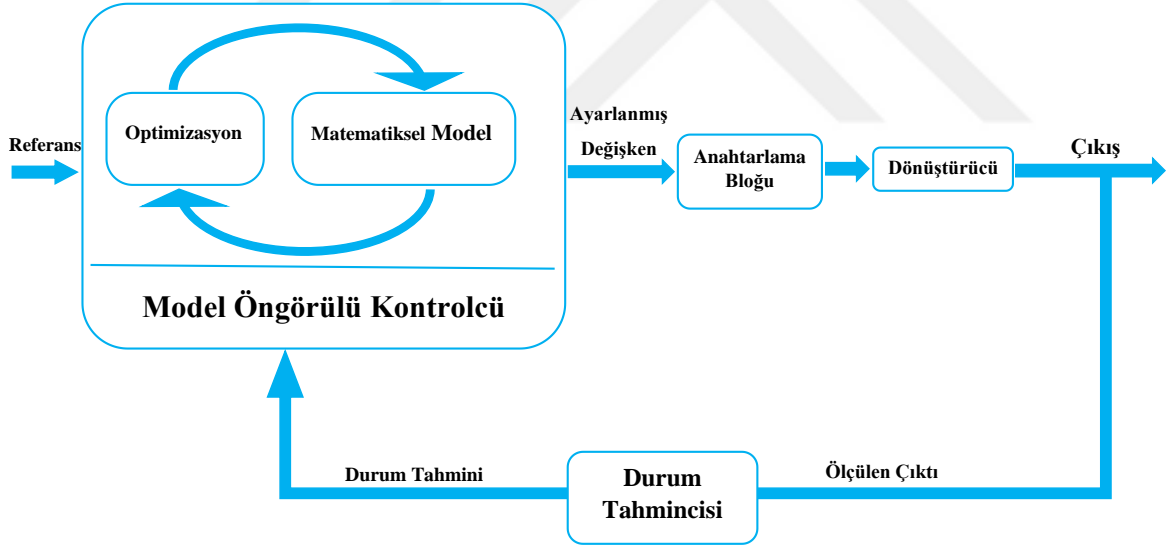
Mayıs sineği optimizasyon algoritmasının hangi adımları izleyerek çalıştığı Şekil 1.28'de akış diyagramında gösterilmiştir.



Şekil 1.28. Mayıs sineği optimizasyon algoritması akış diyagramı

### 1.5.3. Model Öngörülü Kontrol

Model öngörülü kontrol yöntemi çok değişkenli ve sınırlandırmalara sahip olan bir sistemi denetlemede kullanılan kontrol yöntemidir. Model öngörülü kontrolde öngörü modeli, maliyet fonksiyonu ve kontrol kuralı olacak şekilde üç unsur barındırır. Avantajları ise, çok değişkenli sistemlerde kolaylıkla uygulanabilmesi, sınırlandırma olan sistemlerde sınırları kolayca düzenlenebilir olması, karmaşık sistemlerde farklı aşamalar için (yüksek zaman gecikmesi, kararsız sistem gibi) kullanılabilir olmasıdır. Model öngörülü kontrol klasik olarak kullanılan PID denetleyicilere göre çok daha fazla hesap gerektirir, sistemin tam modeli olmadan çalıştırılmaz olması, sistemin kısıtları önemli süre sorunları oluşturabilmesi gibi dezavantajları vardır [70]. Şekil 1.29'da model öngörülü kontrol diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.29. Model öngörülü kontrol diyagramı

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün tasarımı ve kontrolü MATLAB/Simulink ortamında oluşturularak incelenmektedir. İlk olarak devre elemanları incelenerek dönüştürücünün tasarımı yapılmıştır. Tasarımdan sonra dönüştürücüde kullanılacak olan kontrol yöntemlerinin sisteme entegrasyonu yapılmıştır.

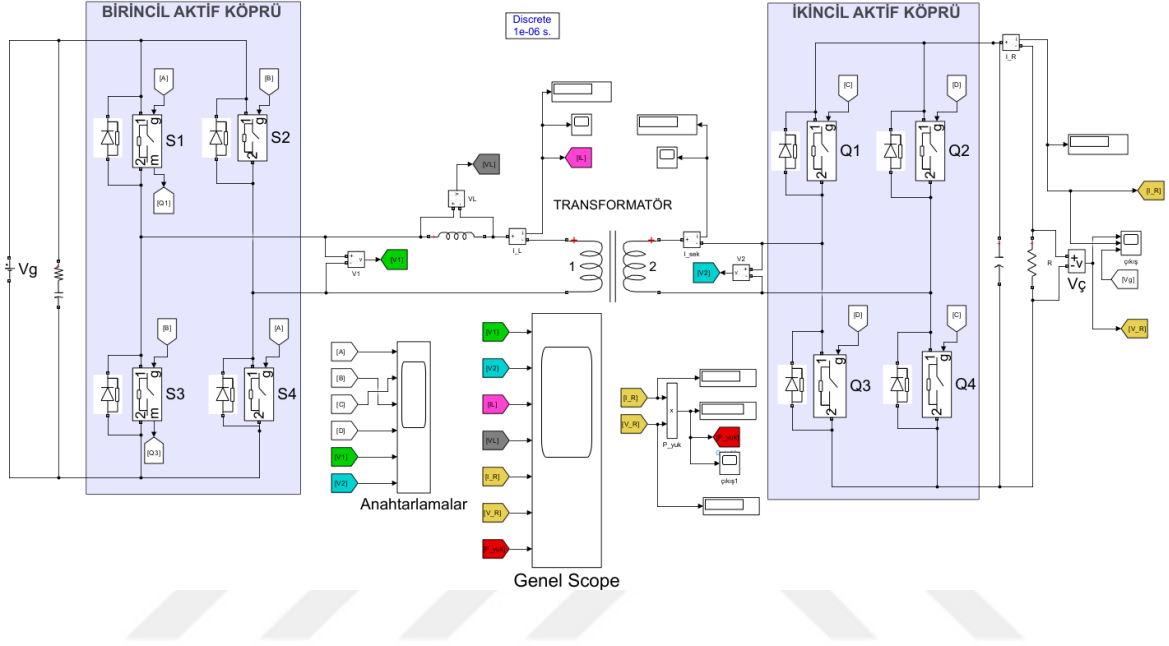
### 2.1. İki Yönlü Çift Aktif Köprülü Doğru Akım Dönüştürücünün Tasarımı ve Devre Elemanlarının İncelenmesi

İki yönlü çift aktif köprüye sahip doğru akım dönüştürücünün tasarımı için devre elemanları incelenmiş ve literatürde bulunmuş olan denklemler üzerinden devre parametrelerinin hesaplanması yapılmıştır. İncelenen dönüştürücünün genel olarak formülü Denklem 20’de verilmiş ve devre elemanlarına göre düzenlenmiş hali Denklem 21’de gösterilmektedir. Denklem 21’e bakıldığında dönüştürücü için kaçak endüktans seçimi, istenilen faz kayması, anahtarlama çalışma frekansı ve transformatör dönüştürme oranı en önemli faktörlerdir. Bu faktörlerin hepsi birbirleriyle ilişkili olduğundan herhangi birinin seçiminde diğeri doğrudan etkiye sahiptir. Dönüştürücü devresinde seçilen parametreler Tablo 2.1’de verilmiştir. Bu parametreler [1]’de bulunan yüksek lisans tezinden alınmıştır.

Tablo 2.1. İki yönlü çift aktif köprülü DA-DA dönüştürücü elektriksel parametreleri [1].

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Faz Kayması                    | $-90^{\circ} < \phi < 90^{\circ}$ |
| Kaçak Endüktans                | 280 $\mu$ H                       |
| Transformatör Dönüştürme Oranı | 1                                 |
| Frekans                        | 5 kHz                             |
| Yük Direnci                    | 20 $\Omega$                       |
| Giriş Gerilimi                 | 100 V                             |
| Çıkış Gerilimi                 | 70 V                              |
| Çıkış Akımı                    | 3.5 A                             |
| Kapasite                       | 10000 $\mu$ F                     |

Sistem parametreleri verilen iki yönlü doğru akım dönüştürücünün tasarımı Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1’de sistemin kontrolsüz olarak temel tasarımı gösterilmiştir.



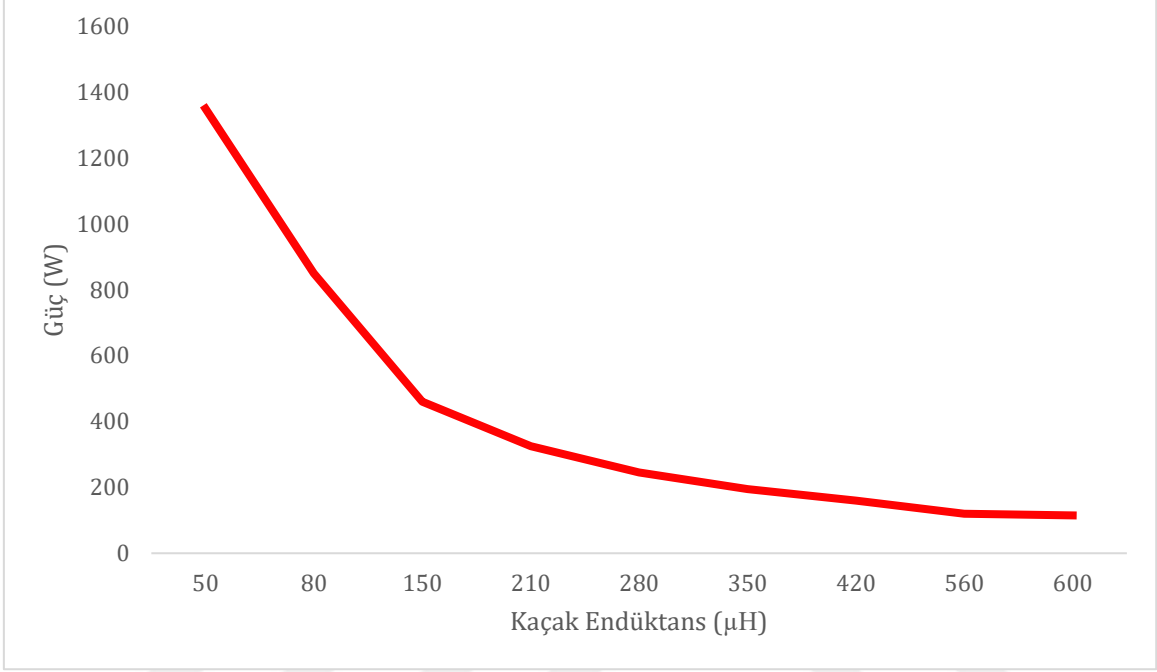
Şekil 2.1. İki yönlü çift aktif köprülü DA-DA dönüştürücü tasarımı

Dönüştürücü tasarımında kullanılan kaçak endüktans, MOSFET, transformatör ve kapasitans değerlerinin seçim kriterleri belirlenmiştir. Aynı şekilde anahtarlama frekansı ve faz kayma açısının güç aktarımı ve dönüştürücü üzerindeki elemanlara etkisi alt başlıklar halinde incelenmiştir.

### 2.1.1. Kaçak Endüktans

İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü devresinde bulunan transformatör kaçak endüktans değerinin küçük seçilmesi devrenin güç aktarımında önemli bir paya sahip olduğu denklemlerde görülmektedir. Denklem 21 ile devrede bulunan kaçak endüktansın

değerinin değiştirilerek çıkışa ne kadar güç aktardığının değişimi hesaplanarak değişim grafiği Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kaçak endüktansın aktarılan güce etkisi

Şekil 2.2’de görülen kaçak endüktansın değişimi dönüştürücü üzerinde sabit bir faz kayma açısında yapılmıştır. Faz kayması sabitken belli aralıklardan sonra güç aktarımında çok fazla artış ve çok fazla düşüş olduğu gözlemlenmektedir.

### 2.1.2. MOSFET Elemanı

Şekil 1.16’da gösterildiği gibi birincil ve ikincil köprüde bulunan anahtarlama elemanları giriş ve çıkış doğru akım gerilimlerini bloke etmelidir. MOSFET’lerin seçiminde anahtarlama hızı, direnci, anahtarların yüksek gerilim görmeden kesebilme özellikleri önem arz etmektedir. Seçim yapılırken öncelikli olarak bu özelliklere bakılır çünkü bu özellikler sistemin daha güvenilir ve az kayıpla çalışabilmesini sağlar. Uygulamalarda doğrudan

dönüştürücünün çalışmasını engelleyen önemli bir faktördür. Simulink ortamında kurulan dönüştürücüde ideal değerler kullanılmıştır. Anahtarlamalar üzerinde oluşan kayıplar düşük olduğu için dikkate alınmayacaktır.

### **2.1.3. Transformatör Elemanı**

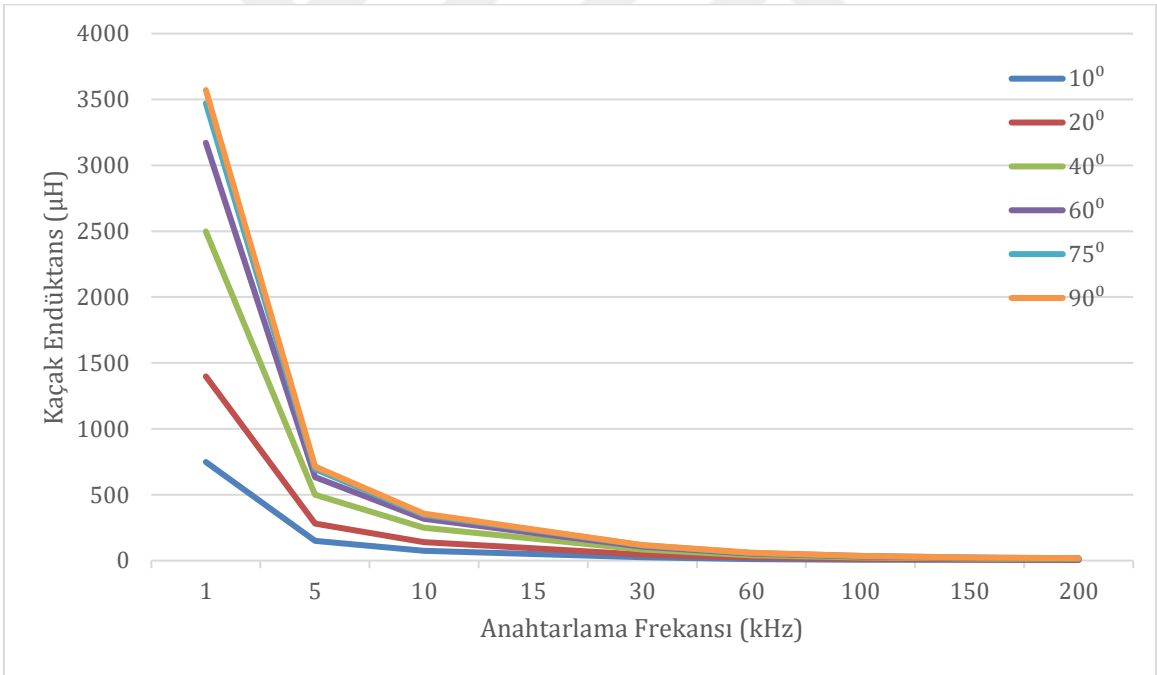
Dönüştürücüde kullanılan transformatör seçiminde endüktans boyutu önemlidir. Sistemin çalışma frekansının artırılması transformatörün boyutlarını küçültür. Ancak bu avantajla birlikte güç modülünün verimliliği de değişkenlik göstermeye başlar. Transformatörde endüktans değerini arttırmak yumuşak anahtarlama aralığını da artırır. Ancak bu artış RMS akımlarının artmasına sebep olur. Bu dengenin korunduğu noktalarda yumuşak anahtarlamının sağlanması için trafoda bulunan mıknatıslanma endüktansı kullanılır. Dönüştürücü üzerinde kullanılan transformatör Simulink'te bulunan lineer transformatör seçilmiştir ve sarım sayısı, gücü, frekans değerleri sisteme göre düzenlenmiştir. Kaçak endüktans değeri ayrı olarak devrede gösterilmiş olup seçiminden daha önce bahsedilmiştir.

### **2.1.4. Kapasitör Elemanı**

İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü tasarımında Şekil 2.1'de görüldüğü üzere giriş ve çıkış kısımlarında iki adet kapasitör kullanılmıştır. Kullanılan kapasitörlerin amacı dönüştürücü giriş ve çıkış gerilim değerlerinin dalgalanmasını azaltmaktır. Dönüştürücü tasarımında kullanılan kapasitör değeri Tablo 2.1'de verildiği gibi seçilmiştir. Gerilim dalgalanmasını %1'in altında tutacak şekilde kapasitör dönüştürücü devresinde çalışmaktadır.

### 2.1.5. Anahtarlama Frekansı

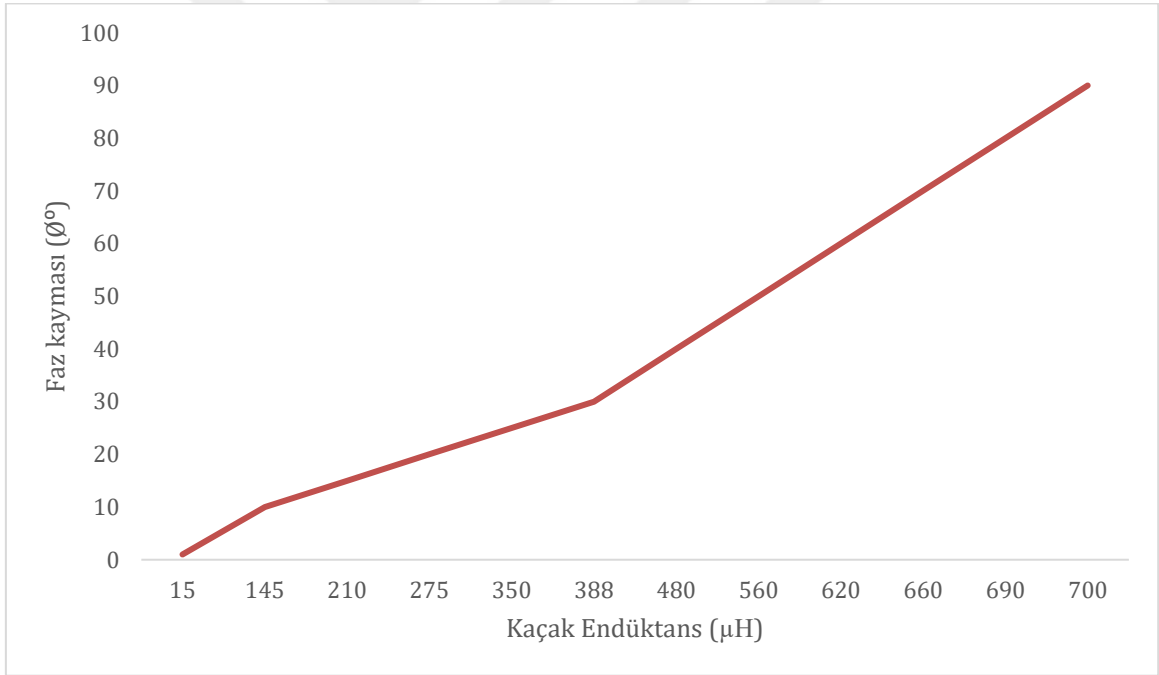
Anahtarlama frekansı denklemlerde görüldüğü üzere dönüştürücünün verimini ve güç yoğunluğunu etkileyen önemli bir tasarım parametresidir. Giriş ve çıkış gerilimi sistemin güç yoğunluğu vb. parametreler dönüştürücünün anahtarlama elemanlarını belirler. Belirlenen anahtarlama elemanlarıyla birlikte sistemde kullanılan transformatöre alternatif akım kare dalgalar gönderilir. Transformatörün boyutunun belirlenmesinde çalışma frekansı önemlidir. Buradan yola çıkılacak olursa anahtarlama ve transformatörün birlikte daha verimli çalışabilmesi için uygun olan frekans belirlenir. Anahtarlama frekansı için çıkış gücünün sabit tutularak kaçak endüktans, farklı faz kayma açıları ve gerekli anahtarlama frekansı ilişkisi Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Kaçak endüktans, faz kayması ve anahtarlama frekansı ilişkisi

### 2.1.6. Faz Kayması

Dönüştürücünün çalışmasında iki köprü arasında oluşturulan faz kayması oldukça önemli bir role sahiptir. Tablo 2.1’de bulunan sistem parametreleri Denklem 22’de giriş gerilimi 100 V, çıkış gerilimi 70 V,  $F_s$  anahtarlama frekansı 5 kHz, n transformatör sarım sayısı oranı 1,  $P_{\text{çıkış}}$  245 W ve L kaçak endüktansı 280  $\mu\text{H}$  olarak denklemde yerine koyulursa dönüştürücünün çalıştığı faz kayma açısı yaklaşık  $20^\circ$  elde edilmektedir. Elde edilen faz kayması birincil ve ikincil köprü arasında oluşmaktadır. Teorik bilgilerin verildiği kısımda Şekil 1.21’de  $Q_d$  olarak gösterilmiştir. Şekil 2.4’te istenilen güç sabit tutulacak şekilde faz kayma açısı ve kaçak endüktansın ilişkisi gösterilmiştir.



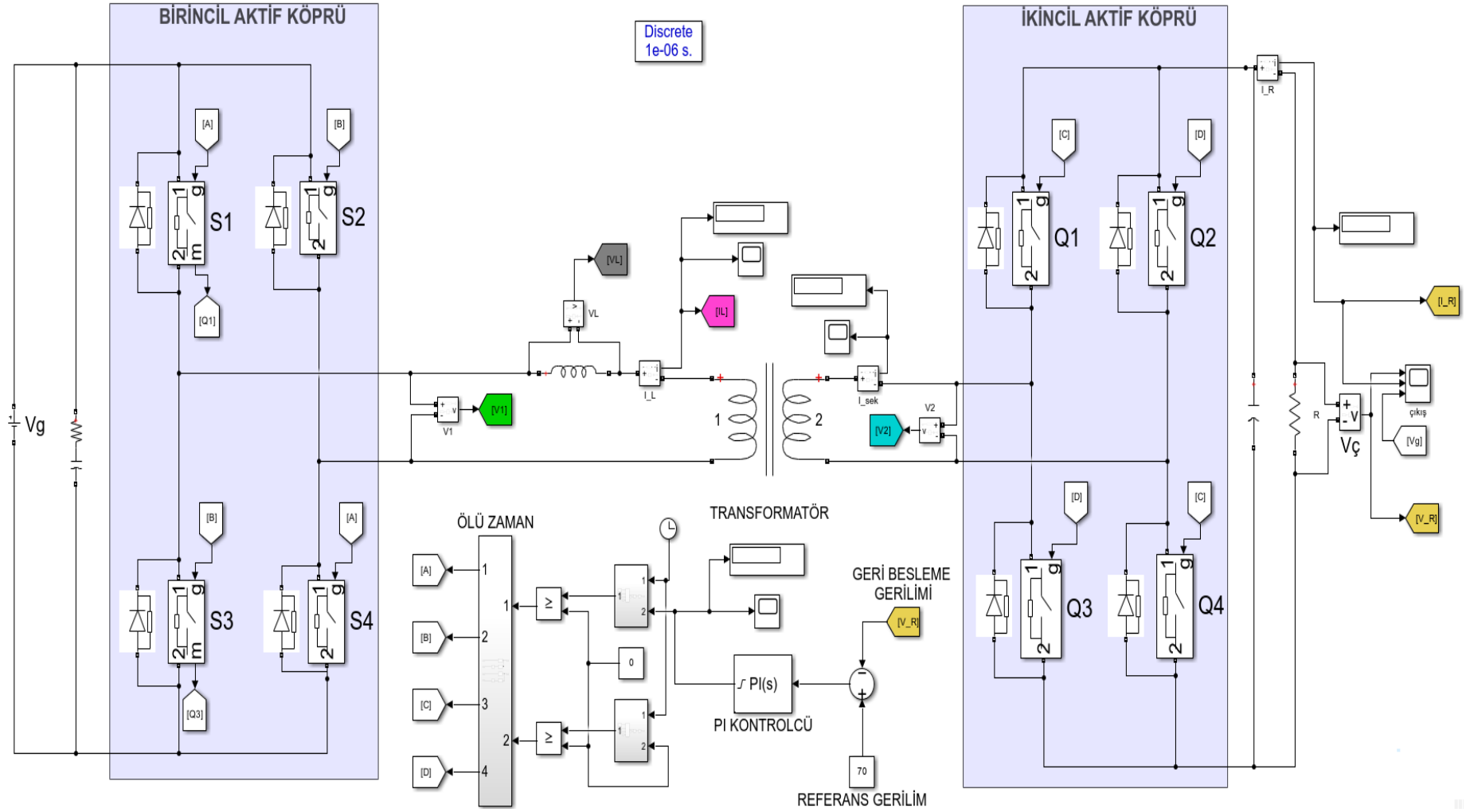
Şekil 2.4. Faz kayma açısının kaçak endüktansla ilişkisi

Şekil 2.4’te gösterilen küçük bir endüktans değeriyle ve küçük faz kaymasıyla maksimum güç aktarımı yaptığı gösterilmektedir. Bu sistemde alternatif olarak birbirleriyle ilişkili olan parametreler birlikte değiştirilerek farklı değerler elde edilebilir. Değişkenliğin

yapılabiliyor olması pratikte kurulacak olan devre elemanlarının standartlar içerisinde seçilebilmesini sağlayacaktır.

## **2.2. İki Yönlü Çift Aktif Köprülü DA Dönüştürücünün Kontrol Yöntemi Tasarımının İncelenmesi**

İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün kontrolü yapılırken Şekil 1.26, Şekil 1.27 ve Şekil 1.28’de görüldüğü gibi referans gerilim değerinden çıkış geriliminin farkı alınır. Alınan fark hatayı belirtir. Bu hata değerini minimuma indirecek şekilde kontrolcü çalışma yapar. Oluşturulan dönüştürücü sisteminde referans olarak çıkış gerilimi girilmiştir. Çıkıştan alınan gerilimin referans değere göre kontrolü yapılarak dönüştürücünün yük altında çalışması incelenmiştir. Dönüştürücü kontrolü klasik PID ve Kesir dereceli PID kontrolleri ayrı ayrı yapılarak incelenmiştir. İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün kontrolcü eklenmiş tam hali Şekil 2.5’te verilmiştir. Yapılan kontroller ile klasik PID, kesir dereceli PID ve model öngörülü kontrol karşılaştırması aynı şartlar altında yapılmıştır.

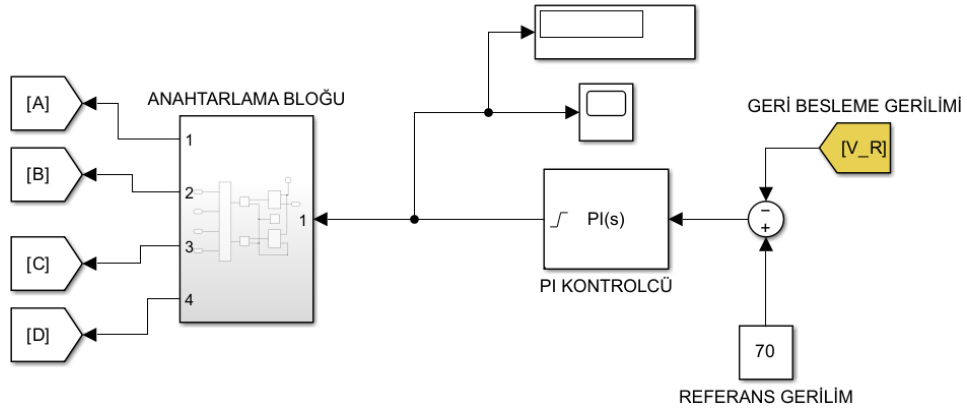


Şekil 2.5. Dönüştürücü ve kontrolcü genel görünümü

### 2.2.1. Klasik PID Denetleyici Tasarımı

Klasik olarak bilinen PID kontrolcü tasarımı yapılırken temel mantık üzerinden yola çıkılmıştır. Şekil 1.26'da gösterilen referans değer 70V olacak şekilde belirlenmiştir. Dönüştürücünün çıkışından alınan gerilim değeri referans değer ile karşılaştırılır ve farkı alınır. Elde edilen bu fark sistemin referansa ne kadar uzak olduğunu gösteren hata değeridir. Hata değerinin pozitif ve negatif olması sistemin aşma durumunda veya yetersiz durumda olduğunu gösterir. Dönüştürücü sürekli sistemin geri beslemesi ile hatayı azaltmaya çalışır. Azalan hata ile sistem daha güvenilir bir hal alır.

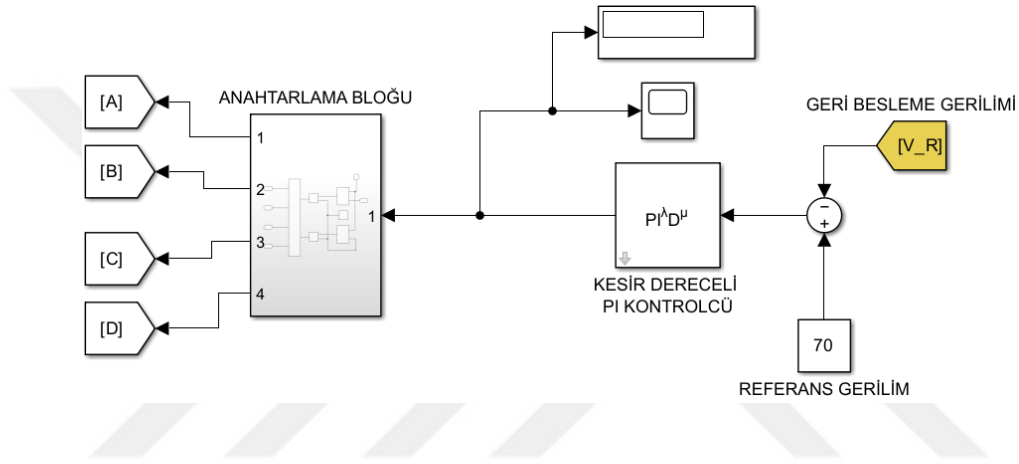
Dönüştürücü üzerinde kontrol faz kaymasına sebep olan anahtarlamalar üzerinde yapılmaktadır. PID kontrolcünün çıkışı bir açı değerini gösterir. Bu açı değeri ise  $-90^\circ$  ile  $+90^\circ$  arasında değişebilmektedir. Bu aralıklar arasında olmasının nedeni bir  $\pi$  periyodunun %50 doluluk-boşluk oranında çalışan anahtarlardır. Denklem 20'de görüldüğü üzere bu anahtarlamaların en iyi güç akışını sağlayacağı açı değeri  $90^\circ$  dir. Dönüştürücünün kontrolü D parametresinden kötü etkilendiği için ve literatürde D parametresi ile ilgili çalışmalara pek sık rastlanmadığı için dönüştürücüye PI kontrolü uygulanmıştır. PI kontrolcünün  $K_p$  ve  $K_i$  parametrelerinin en iyi değerlerinin bulunması için mayıs sineği optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Dönüştürücünün PI kontrolcü tasarımı Şekil 2.6'da verilmektedir. PI kontrolcü bloğu sonrasında faz kayma açısının uygulandığı anahtarlama bloğuna giriş yapmaktadır.



Şekil 2.6. PI kontrolcü tasarımı

### 2.2.2. Kesir Dereceli PID Denetleyici Tasarımı

Kesir dereceli PID kontrolcü dönüştürücü üzerinde kontrol yapılırken D'nin türev etkisinden dolayı  $\mu=0$  alınmıştır ve sistemin kontrolü kesir dereceli PI olarak yapılmıştır. Şekil 2.7'de kesir dereceli PI kontrolcünün dönüştürücüdeki tasarımı gösterilmiştir. Çıkışta elde edilen faz kayma açısı anahtarlama bloğuna giriş yapmaktadır.



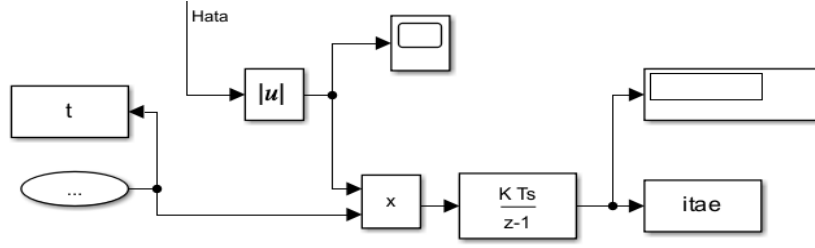
Şekil 2.7. Kesir dereceli PI kontrolcü tasarımı

Şekil 2.7'de verilen kesir dereceli PI kontrolcünün sisteme uyarlanmış halinde kontrol anahtarlamalara yapılmaktadır ve anahtarların köprüler arası faz kayması oluşturması sağlanmaktadır. Kontrolcü içerisinde bulunan  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $\lambda$  parametrelerinin mayıs sineği optimizasyon algoritması ile bulunması sağlanmıştır.

### 2.2.3. Mayıs Sineği Optimizasyon Algoritması Tasarımı

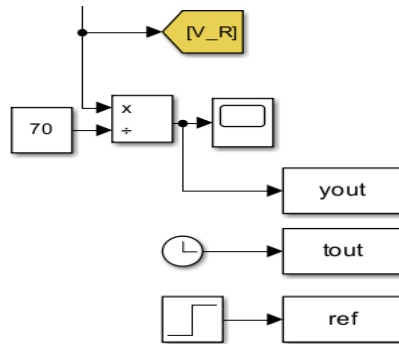
İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün kontrolü için klasik PI ve kesir dereceli PI kontrolcü kullanılmıştır. Kullanılan kontrolcüler sırasıyla 2 ve 3 bilinmeyen parametreden oluşmaktadır. Bu parametrelerin manuel olarak bulunması oldukça zor ve uzun olmaktadır. Mayıs sineği optimizasyon algoritması sisteme entegre edilerek bu parametreleri otomatik olarak denemektedir. Yaptığı denemeler sonucu en iyi bulduğu

parametre değerlerini vermektedir. Bu parametreleri bulma işlemi yaparken hata çıkışından ve dönüştürücü çıkışından değerler alarak çalışmaktadır. Sistemde değerleri aldığı noktaları referans değerle karşılaştırarak minimum hata değerinde referansa oturmaya çalışır. Mayıs sineği optimizasyon algoritmasının dönüştürücü sistemin hata değerine uygulanan hali Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8. Mayıs sineği optimizasyon algoritmasının dönüştürücüye entegrasyonu

Şekil 2.8’de görüldüğü üzere standart bir ITEA(Zaman ile Çarpılmış Hatanın Mutlak Değerinin İntegrali) ölçütü kullanılarak hata değeri bir döngüye sokulmaktadır. Bu ölçüt ile belirli bir zaman aralığında ortalama hatanın zaman integrali ile çarpımını ölçer. Sistemin daha iyi bir zaman yakalaması için oluşturulan amaç fonksiyonuna çıkış gerilimindeki hatanın %1’in altında kalacak şekilde değer alınması için oluşturulan sistem Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Çıkıştan amaç fonksiyonuna değer alınan blok

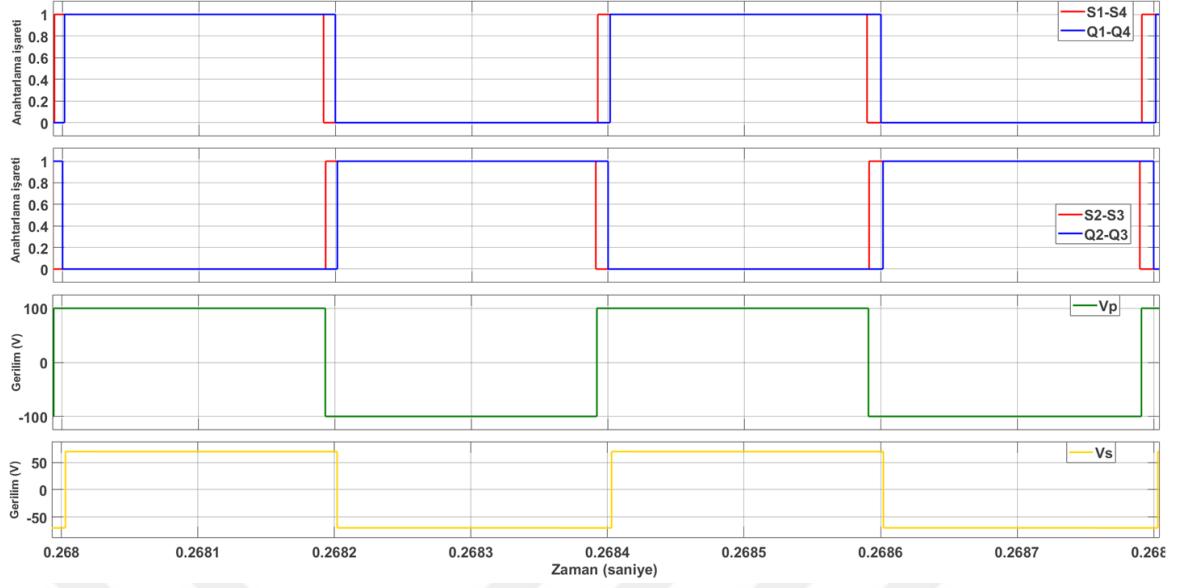
### 3. BULGULAR

Tez çalışmasının bu bölümünde tasarlanan ve denetimi yapılan iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamından elde edilmiş sonuçları sunulacaktır. İlk olarak Tablo 2.1’de bulunan değerlere göre oluşturulan dönüştürücünün tek faz kaydırma yöntemiyle oluşturulan anahtarlama görüntüsü ardından dönüştürücünün farklı koşullar altındaki performansı gösterilecektir.

Çıkış kapasite değeri çıkışta oluşan gerilim dalgalanmasını istenilen aralıkta tutmak amacıyla seçilmiştir. Kaçak endüktans değeri ise iki köprü arasında güç aktarımına izin verebilecek uygun görülen bir değer seçilmiştir. Giriş geriliminde oluşabilecek bir bozukluğu simüle edebilmek için giriş değeri değiştirilebilir seçilmiştir. Tüm çalışma şartlarında dönüştürücünün klasik PI kontrolü ve kesir dereceli PI kontrolü [1]’deki çalışmada kullanılan kontrolcü önerileri ile karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Tek Faz Kaydırma ve Faz Farkı Oluşumu

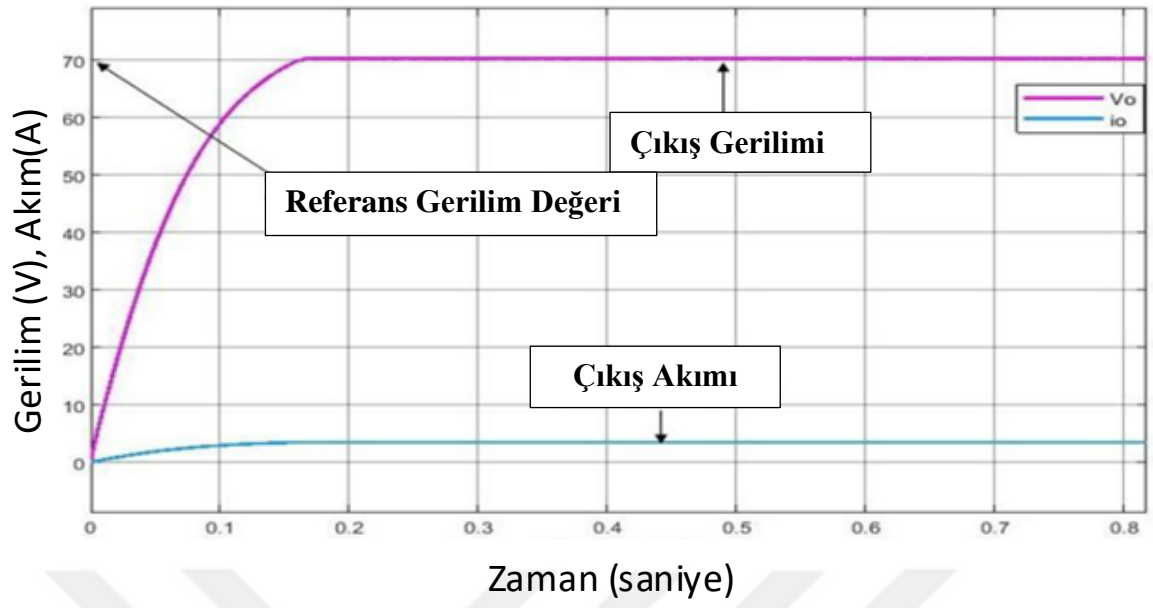
İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü için oluşturulan tek faz kaydırma anahtarlama yöntemiyle birincil köprü ve ikincil köprü arasında bir faz kayması oluşturulmaktadır. Bu faz kayma açısı pozitif olduğu durumda istenilen yöne doğru ve negatif olduğunda ise istenilen yönün tersine doğru çalıştığını gösterir. Transformatörün çıkış geriliminin giriş geriliminden önde olduğu yani faz kayma açısının pozitif olduğu durum ileri çalıştığını göstermektedir. Şekil 3.1’de tek faz kaydırma anahtarlama yöntemi ve faz kaymasının oluşumu gösterilmektedir. Şekilde gösterilen S1-S4 birincil köprü anahtarlarını, Q1-Q4 ikincil köprü anahtarlarını,  $V_P$  transformatör giriş gerilimini ve  $V_S$  transformatörün çıkış gerilimini belirtir.



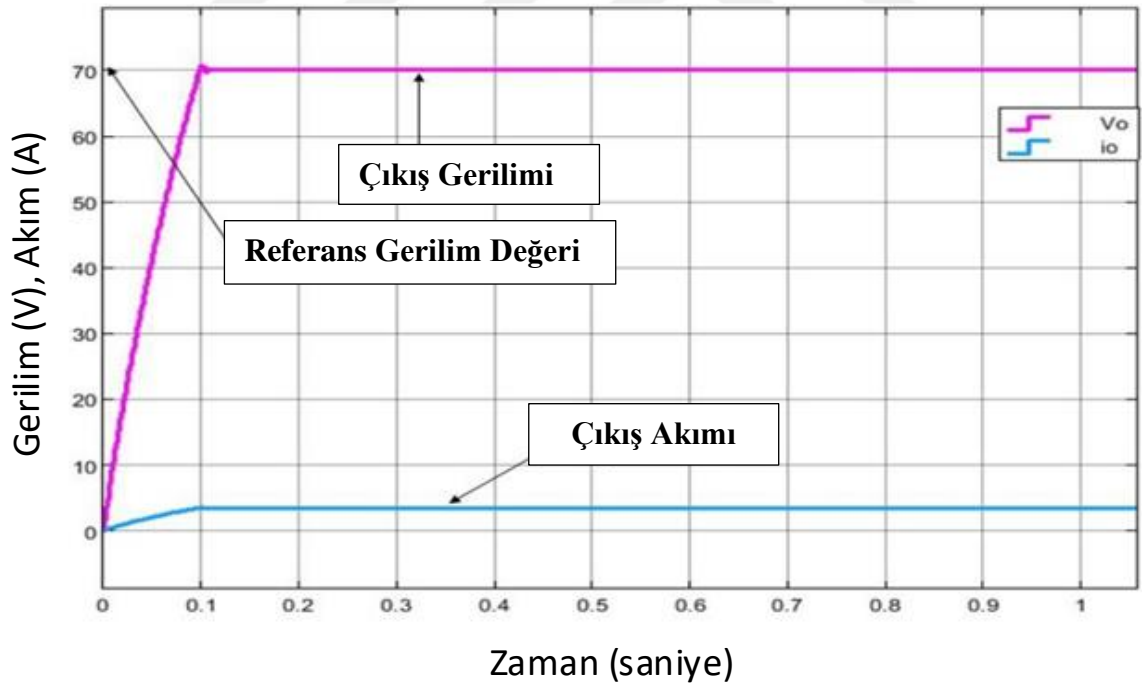
Şekil 3.1. Tek faz kaydırma anahtarlamının transformatör üzerinde oluşturduğu gerilimler

### 3.2. Sabit Yük Analizi

MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan dönüştürücü [1]'de bulunan değerlere göre düzenlenmiştir. [1]'de bulunan PI kontrolü ve model öngörülü kontrol grafikleri Şekil 3.2'de ve Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.2'de PI kontrolü altında sistemin çıkış akımı 3.51A, çıkış gerilimi 70V ve  $t=0.163s$ 'de referans noktasına ulaştığı gösterilmektedir. Şekil 3.3'te ise model öngörülü kontrol anında sistemin çıkış akım ve gerilimleri aynı değerde kalarak  $t=0.099s$ 'de referans noktasına ulaştığı görülmektedir. [1]'den alınan grafiklerde bulunan  $V_0$  çıkış gerilimi ve  $i_0$  çıkış akımını belirtir. Tez çalışmasında yapılan simülasyon grafiklerinde bulunan  $V_{\phi}$  çıkış gerilimi,  $I_{\phi}$  çıkış akımı ve  $V_g$  giriş gerilimini göstermektedir.

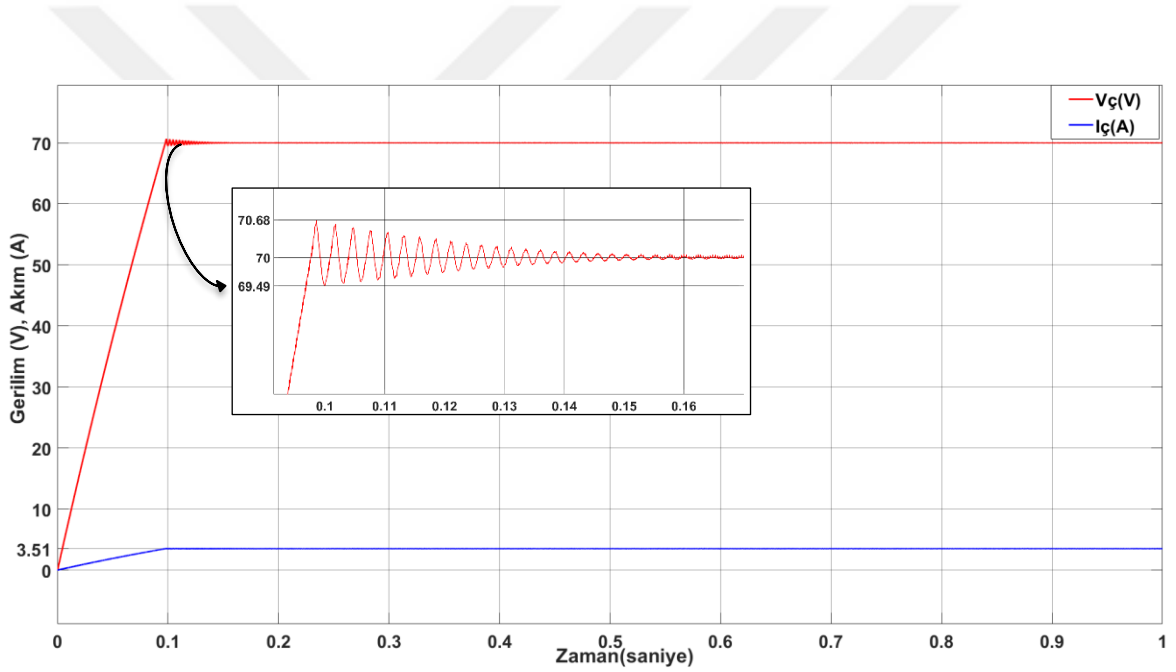


Şekil 3.2. PI kontrolü altında çıkış gerilim ve akımı [1].



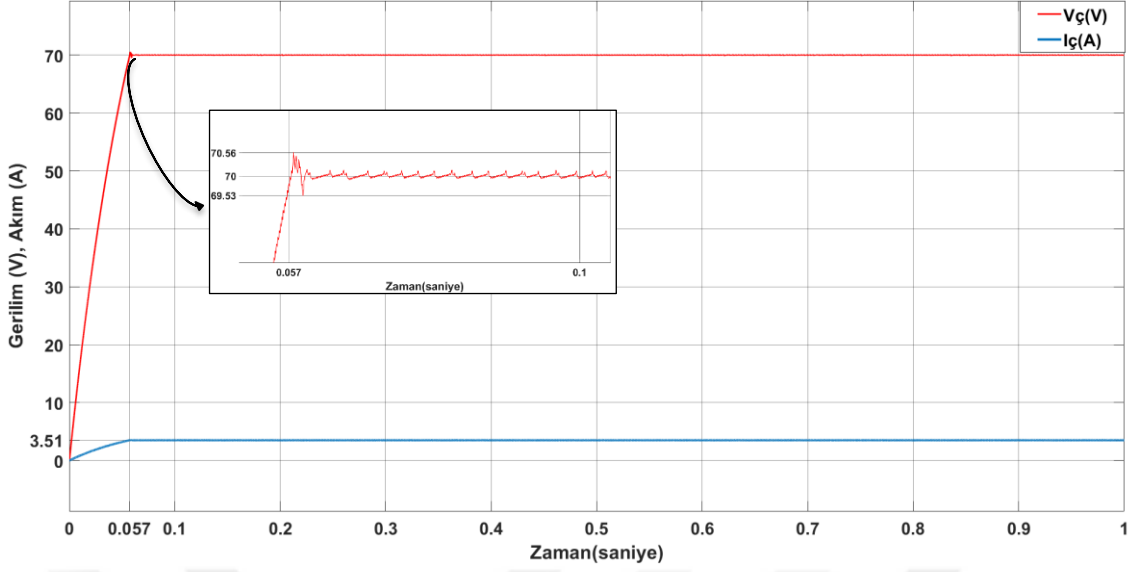
Şekil 3.3. Model öngörülü kontrol altında çıkış gerilim ve akımı [1].

Şekil 3.2’de ve Şekil 3.3’te elde edilen değerlerin korunarak daha iyi bir zamanda referans değere ulaşması için bu tez çalışmasında klasik PI kontrolü ve kesir dereceli PI kontrolü yapılmıştır. Yapılan kontrol yöntemlerinin parametreleri mayıs sineği optimizasyon algoritmasıyla belirlenerek referansa oturma süresinin iyileştirmesini amaçlamaktadır. Şekil 3.4’te optimize edilmiş klasik PI kontrolünün grafiği ve Şekil 3.5’te optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolü verilmiştir. Şekil 3.4’te çıkış akımı 3.51A, çıkış gerilimi 70V olarak korunduğu gösterilmiştir. Referans noktaya ilk ulaştıktan sonra çıkış akım ve geriliminde olan salınımların %1’in altında olduğu görülmektedir. Referans noktaya ulaştıktan sonra salınımların %0.1’in altına düşmekte ve referansa oturma süresi ise  $t=0.0976$  saniye olmaktadır.



Şekil 3.4. Optimize edilmiş PI kontrol altında çıkış gerilim ve akımı

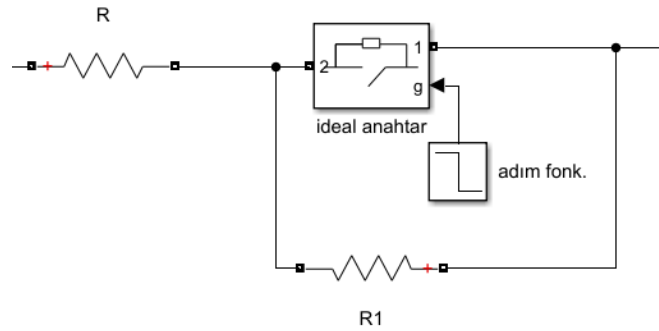
Şekil 3.5’te ise aynı değerler korunarak referans değere ilk ulaşma süresinde salınımların %1’in altında tutulmuş sonrasında salınımların %0.2’nin altında kalması sağlanarak iyileştirilmiş ve referans noktaya ulaşma süresi  $t=0.0573s$  olduğu gösterilmektedir. Sistemin parametreleri optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolcü ile karşılaştırma yapılan diğer tüm kontrolcülere göre daha iyi ve hızlı yanıt verdiği görülmektedir.



Şekil 3.5. Optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolü altında çıkış gerilim ve akımı

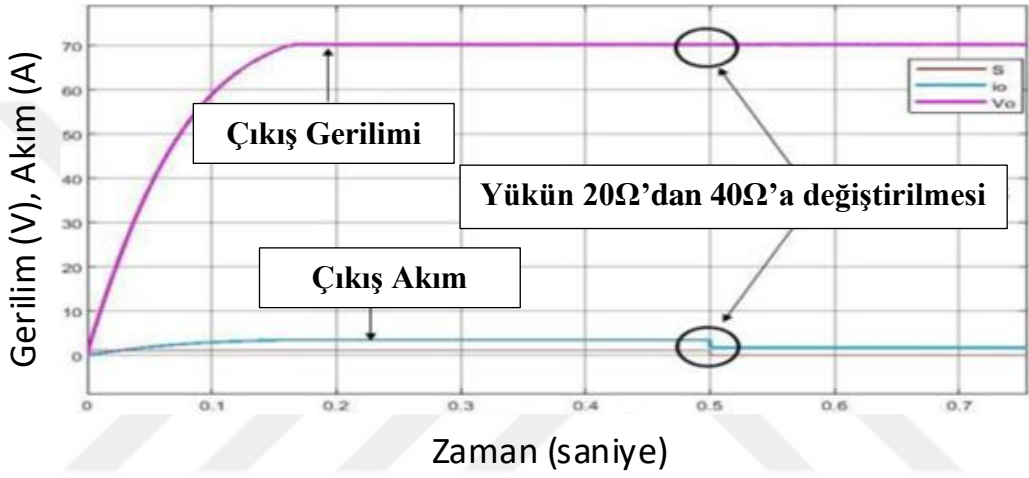
### 3.3. Değişken Yük Analizi

Sabit yük analizinden sonra sistemin değişken yük koşulları altında simülasyonu yapılmıştır. Değişken yük analizi simülasyon süresinin yarısından sonra çıkış direnci iki katına çıkartılarak yapılmıştır. Çıkış direncini simülasyon süresinin yarısından sonra iki katına çıkartacak devre Şekil 3.6'da verilmiştir. Oluşturulan sistem iki adet aynı boyutlu direnç, bir adet ideal anahtar ve birim adım fonksiyonu ile oluşturulmuştur.  $R$  çıkış yükü,  $R1$  çıkış yükü ile aynı değerde bir dirençtir.

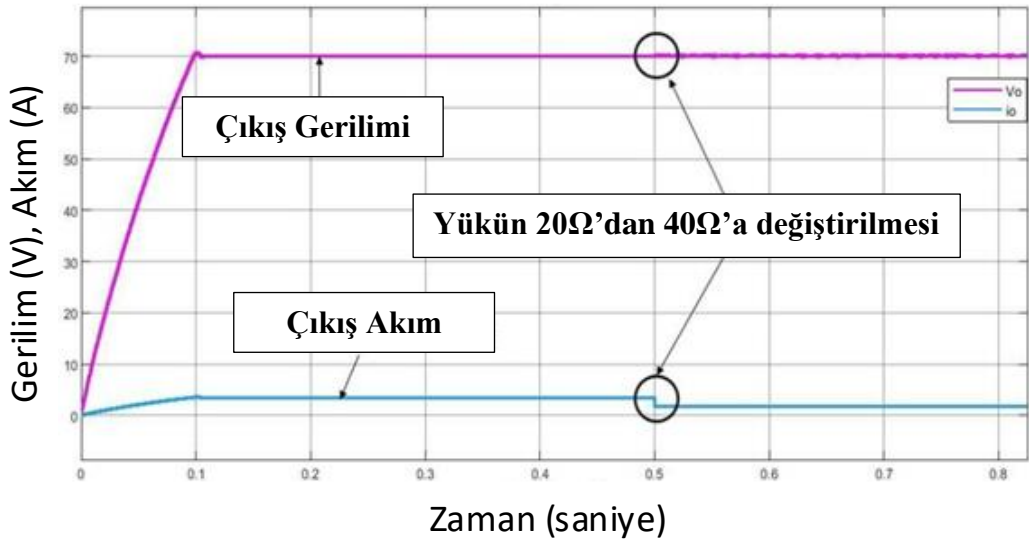


Şekil 3.6. Değişken yük analizi için oluşturulan sistem

Değişken yük analizi için oluşturulan devre iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün çıkış yükü kısmına uygulanır. Simülasyon süresinin yarısına kadar tek yük ile çalışır diğer yarısında ise iki seri yük olacak şekilde çalışma yapar. Değişken yük analizi [1]'de simüle edildiğinde elde edilen PI ve model öngörülü kontrol için sonuçlar sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmiştir. Her iki kontrolde de sistemin iki katı yüke çıkması durumundaki tepkileri gösterilmiştir. Yükün iki katına çıkarılması  $t=0.5s$ 'de olmuştur.

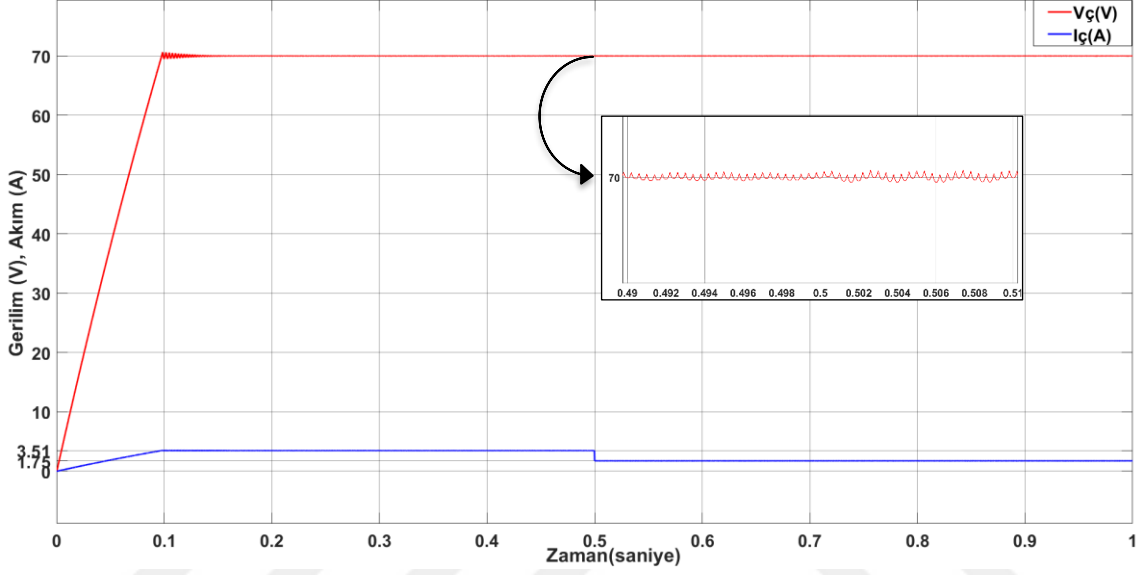


Şekil 3.7. PI kontrol altında değişken yük analizi [1].

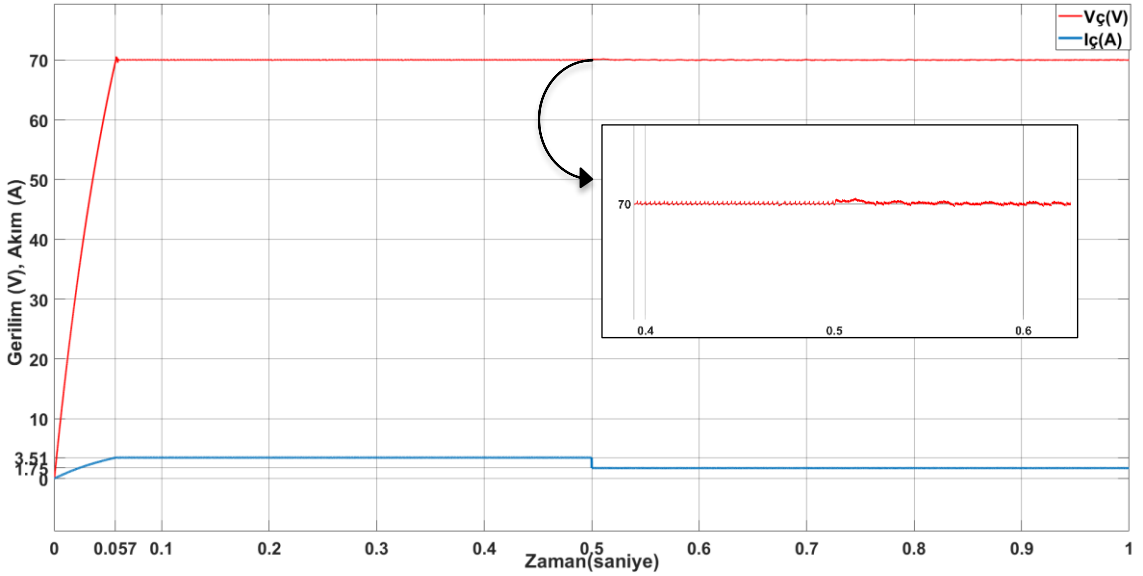


Şekil 3.8. Model öngörülü kontrol altında değişken yük analizi [1].

Değişken yük analizi iki katı yük olacak şekilde parametreleri optimize edilmiş klasik PI kontrolcü ve kesir dereceli PI kontrolcü tarafından da aynı şartlar altında yapılmıştır. Dönüştürücü simülasyon süresi  $t=1s$  ve yükün iki katına çıktığı an ise  $t=0.5s$ 'dir. Sistemde yükün iki katına çıktığı andaki tepkisi optimize edilmiş PI kontrolcü altında Şekil 3.9'da ve kesir dereceli PI kontrolcü altındaki değişimi Şekil 3.10'da verilmiştir.



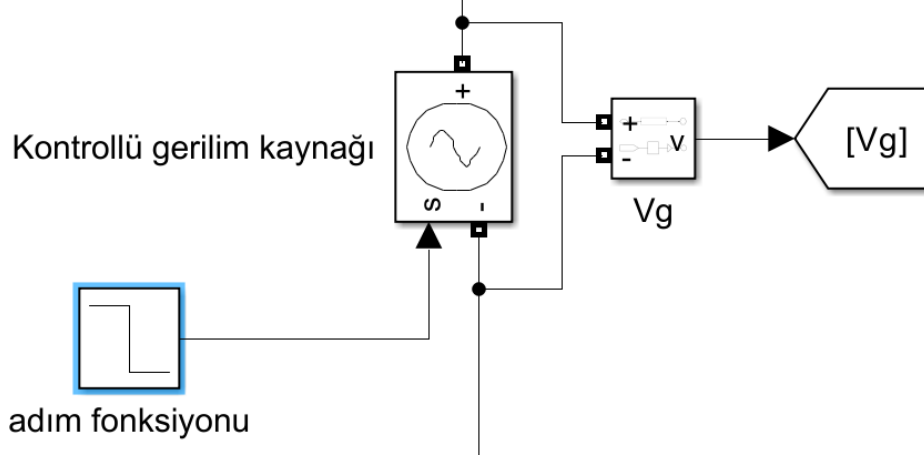
Şekil 3.9. Optimize edilmiş PI kontrolcü altında değişken yük analizi



Şekil 3.10. Optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolcü altında değişken yük analizi

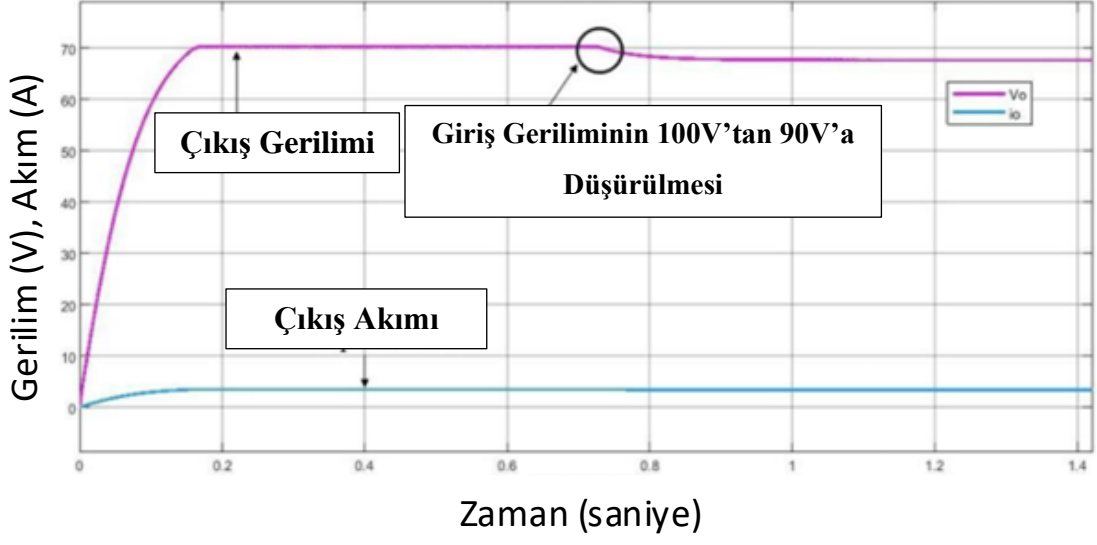
### 3.4. Giriş Geriliminde Bozulma Analizi

Çalışılan sistem üzerinde oluşabilecek bir gerilim değişimi anında sistemin tepkisi giriş gerilimi 10V azaltılarak gerçekleştirilmiştir. Giriş geriliminde oluşacak olan değişimin ayarlanacağı devre için bir adet kontrol edilebilir doğru akım gerilim kaynağı, bir adet adım fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 3.11’de giriş geriliminde değişme oluşturacak sistem gösterilmiştir.

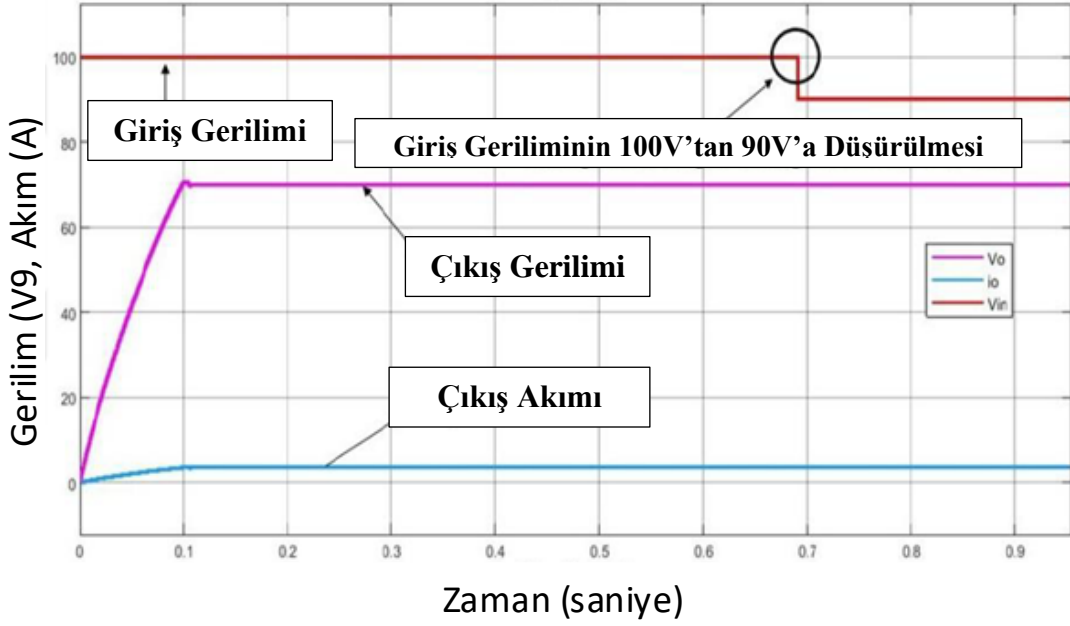


Şekil 3.11. Giriş gerilim değişimi için kullanılan sistem

Dönüştürücü devresinin giriş geriliminde olan bozukluk 100V’dan 90V’a doğru olan gerilim düşmesidir. Bu gerilim düşmesiyle birlikte dönüştürücünün oluşturacağı faz kayması ve güç aktarımı değişmektedir. Dönüştürücünün PI kontrol altında ve model öngörülü kontrol altında gerilim değişimine verdiği tepki sırasıyla Şekil 3.12’de ve 3.13’te verilmiştir.



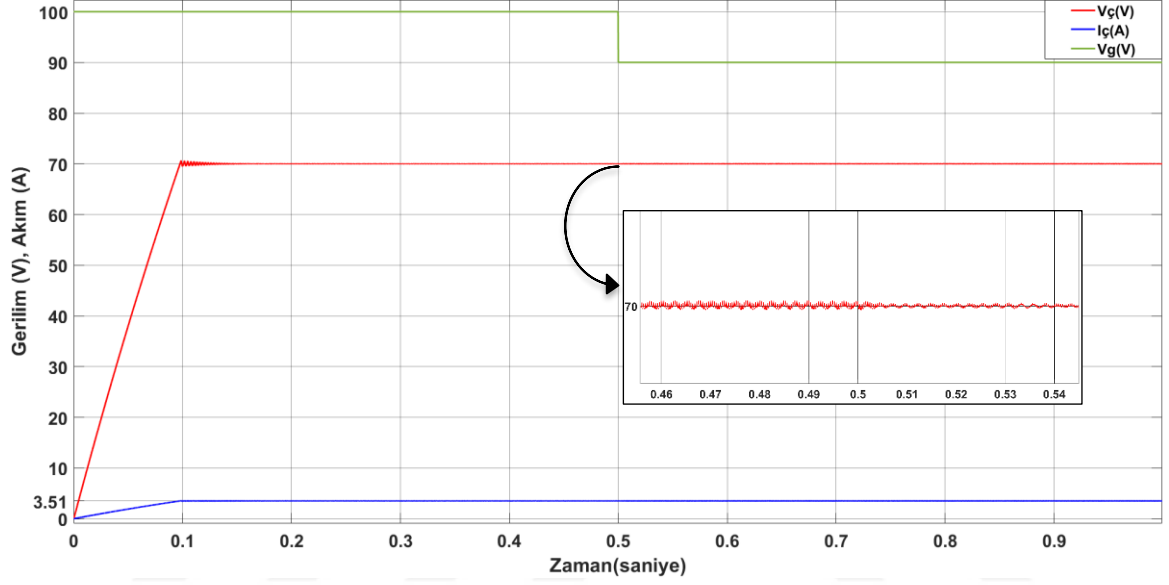
Şekil 3.12. PI kontrol altında gerilim değişme analizi [1].



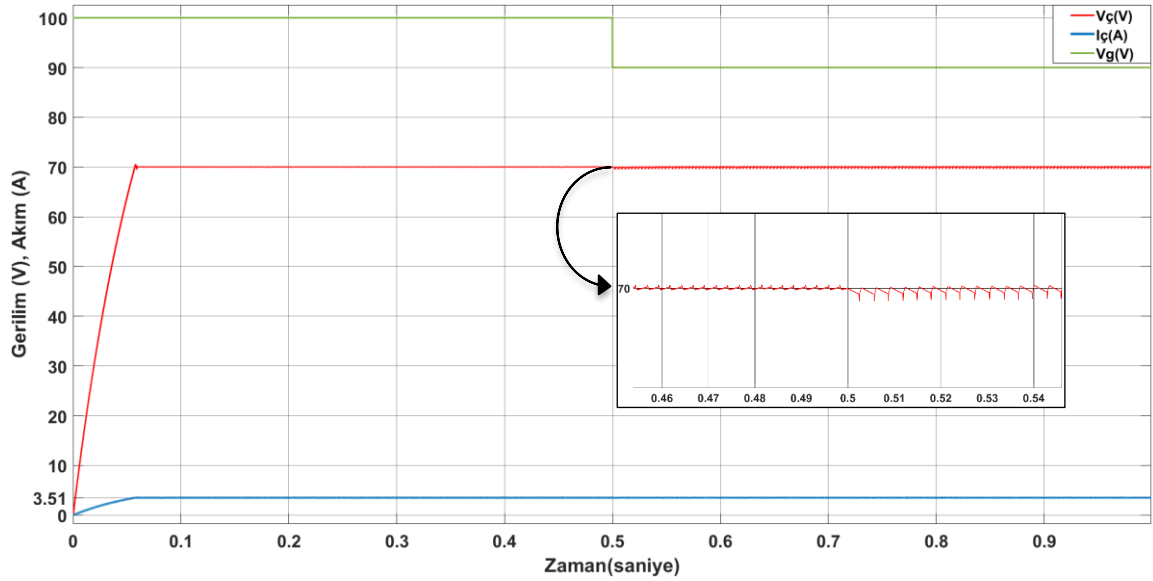
Şekil 3.13. Model öngörülü kontrol altında gerilim değişme analizi [1].

Dönüştürücü için önerilen [1]'de bulunan kontrolcülerin gerilim değişme analizi altındaki tepkileri normal olduğu görülmektedir. Ancak sistem için önerilen parametreleri optimize edilmiş klasik PI kontrolcü ve kesir dereceli PI kontrolcü ile sistem tepki süresi hızlandırılmaya çalışılmıştır. Şekil 3.14'te  $t=0.5s$ 'de giriş geriliminin 90V'a düştüğü anda

optimize edilmiş PI kontrolcüyle sistem tepkisi gösterilmiştir. Şekil 3.15'te hızlı bir referans değere ulaşan parametreleri optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolcünün gerilim değişme analizine verdiği tepki gösterilmiştir. Kontrolcülerin sistemi kararsızlığa getirmeyecek şekilde kontrol sağladığı gösterilmiştir.



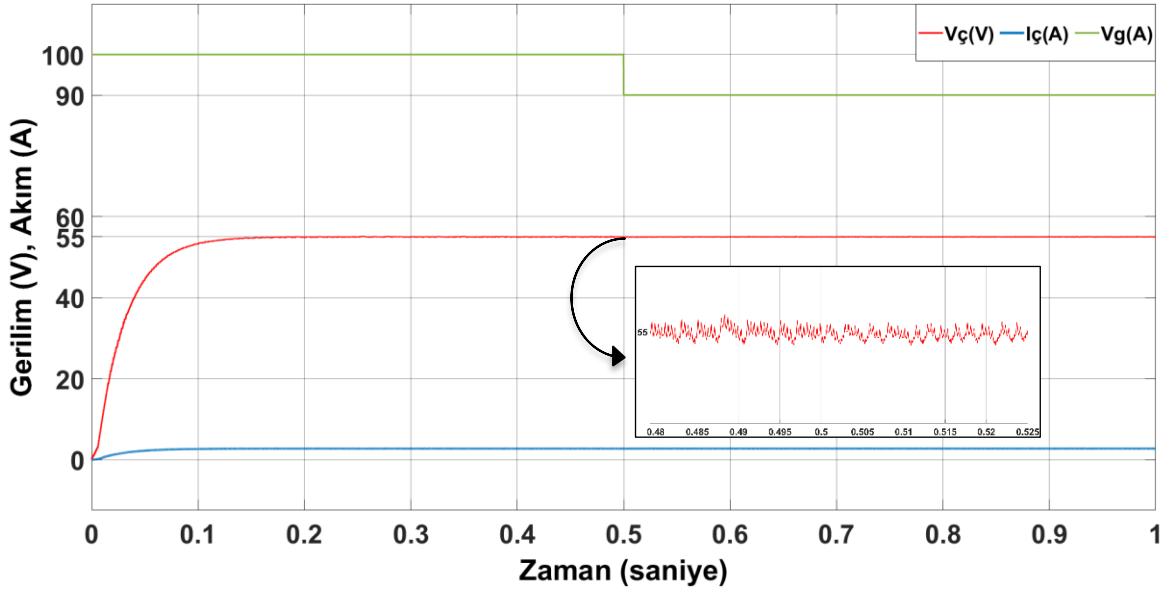
Şekil 3.14. Optimize edilmiş PI kontrolcü altında gerilim değişme analizi



Şekil 3.15. Optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolü altında gerilim değişme analizi

### 3.5. Dönüştürücünün Düşük Güçte Çalıştırılması

Yapılan tez çalışmasındaki dönüştürücü 250 W olarak referans çıkış gerilimi 70 V'ta tutularak kontrol işlemleri ve analizleri önceki bölümlerde yapılmıştır. Tez çalışmasında tasarlanan dönüştürücünün devre parametreleri değiştirilmeden daha düşük güçte çalışması için kontrol çalışması yapılmıştır. Burada amaç aynı devre parametreleri ile daha düşük güçlerde de dönüştürme işlemi yapılabilmesini görmektir. Dönüştürücünün çıkışında gücün 150 W olacak şekilde çalışması sağlanmıştır. Çıkış gücünün 150 W olması için referans gerilim değeri 55 V'a ayarlanmış ve kesir dereceli PI kontrolcü altında çalışması sağlanmıştır. Şekil 3.16'da parametreleri optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolcü altında çalışması gösterilmiştir. Çalışmada giriş gerilimi 0.5 saniyesinde 90 V'a düşürülerek sistemin tepkisi gözlemlenmiştir. Giriş gerilimine verilen bozucu etkiye rağmen kararlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür.



Şekil 3.16. Dönüştürücünün düşük güçte çalıştırılması

#### 4. TARTIŞMA

İki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan ve [1]'den elde edilen sonuçların karşılaştırılması bu bölümde yapılacaktır. Karşılaştırma PI kontrol, model öngörülü kontrol, optimize edilmiş PI kontrol ve optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrol arasında yapılacaktır. Tablo 2.1'de verilen tüm parametreler uygulanan kontrol yöntemleri için eşit alınmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları önceki bölümde verilmiş olup bu bölümde bu grafikler üzerinden tablolar oluşturulacaktır. Oluşturulan tablolar ile dönüştürücünün kontrolcü seçiminin kolaylaştırılması sağlanacaktır.

Dönüştürücü karşılaştırılması ilk önce simüle edilen sabit yük analizi üzerinden yapılacaktır. Tablo 4.1'de tüm kontrolcülerin oturma zamanı, en yüksek değere ulaştığı saniye ve maksimum aşma oranıyla bir tablo oluşturulmuştur. Tabloda sabit yük koşullarında çalışmada optimize kesir dereceli PI denetleyicinin en hızlı tepkiyi verdiği görülmektedir.

Tablo 4.1. Sabit yükte kontrolcü önerilerinin karşılaştırılması

| Kontrolcüler                           | Oturma Süresi | Tepe Süresi   | Salınım oranı(%) |
|--|---------------|---------------|------------------|
| PI denetleyici                         | 0.163         | 0.186         | 0.962            |
| Model öngörülü kontrol denetleyici     | 0.099         | 0.102         | 2.941            |
| Optimize PI denetleyici                | 0.0976        | 0.0986        | 0.95             |
| Optimize kesir dereceli PI denetleyici | <b>0.0573</b> | <b>0.0577</b> | <b>0.82</b>      |

Tablo 4.1'de iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü için önerilen en iyi kontrolcü optimize kesir dereceli PI denetleyicidir. Denetleyicinin bir miktar aşması vardır ancak tabloda görüldüğü üzere çok küçük değerlerdedir. Bu denetleyici için Şekil 3.5'te aşmanın sürekli olmadığı giderek daha küçüldüğü görülmektedir. Simüle edilen dönüştürücü sistem için en uygun denetleyicidir.

Tasarlanan dönüştürücü için önerilen kontrol yöntemleri önceki bölümde ikinci olarak değişken yük analizine sokulmuştur. Bu analizde ani yük değişimleri sırasında çıkışa aktarılan güç ifadesinin değişimi incelenmiştir. Bütün kontrolcü önerilerinde çıkışa aktarılan güç değişmemiştir. Gerilim kontrol edilerek oluşturulan sistem sayesinde çıkışında oluşan akım yük değişmesi durumunda değişmekte ve çıkışa aktarılan güç dengesi bozulmamaktadır. Tablo 4.2’de kontrolcülerin değişken yük analizi sırasında oluşturduğu değerler verilmektedir. Sabit yük analizinde en iyi sonucu veren optimize kesir dereceli PI denetleyici yine en iyi sonucu vermiştir.

Tablo 4.2. Değişken yükte kontrolcülerin karşılaştırılması

| Kontrolcüler                           | Oturma Süresi | Tepe Süresi   | Salınım oranı(%) |
|--|---------------|---------------|------------------|
| PI denetleyici                         | 0.163         | 0.535         | 0.982            |
| Model öngörülü kontrol denetleyici     | 0.099         | 0.102         | 0.962            |
| Optimize PI denetleyici                | 0.0976        | 0.0986        | 0.95             |
| Optimize kesir dereceli PI denetleyici | <b>0.0573</b> | <b>0.0577</b> | <b>0.82</b>      |

Tablo 4.3’te önceki bölümde analizi yapılan gerilim değişme analizinin sonuçları verilmiştir. Analiz giriş geriliminde oluşabilecek ani gerilim düşmesinden kaynaklı oluşabilecek sorunları incelemeyi amaçlamaktadır. Bu analiz süresince PI kontrol yapılan sistem haricinde tüm kontrolcüler sistemin sürekliliğini sağlayabilmişlerdir. Oluşan ani değişim sonrası faz kayma açısı değiştirilerek güç aktarımı kararlılığını korumaya çalışmışlardır. Bu analiz yönteminde de en iyi sonucu optimize edilmiş kesir dereceli PI denetleyici vermiştir. Bu denetleyici  $t=0.5s$ ’de verilen gerilim değişme etkisinden sonra küçük bir salınım artışına girmiştir. Ancak ilk oturma süresinde yaşadığı salınım oranından fazla olmamıştır.

Tablo 4.3. Gerilim değişme analizi kontrolcü karşılaştırılması

| Kontrolcüler                           | Oturma Süresi | Tepe Süresi   | Salınım oranı(%) |
|--|---------------|---------------|------------------|
| PI denetleyici                         | 0.163         | -             | 7.14             |
| Model öngörülü kontrol denetleyici     | 0.099         | 0.102         | 2.94             |
| Optimize PI denetleyici                | 0.0976        | 0.0989        | 0.95             |
| Optimize kesir dereceli PI denetleyici | <b>0.0573</b> | <b>0.0577</b> | <b>0.82</b>      |

Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te görüldüğü üzere en iyi sonuçlar optimize edilmiş kesir dereceli PI denetleyicide oluşmuştur. Bu denetleyici sisteme verilen tüm ani bozucu etkilere rağmen referans değere en hızlı ulaşan ve referans değerden sapmayan sürdürülebilir bir güç akışı sağlamıştır.

## 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında çıkış gücü 245 W olan iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Yapılan dönüştürücü için kontrol yöntemleri incelenerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan kontrol yöntemi klasik PI kontrol ve kesir dereceli PI kontrolüdür. Bu PI kontrolcülerin katsayıları mayıs sineği algoritmasıyla belirlenmiştir.

Literatürde bulunan bir çalışmada 245 W güce sahip iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücüye klasik PI ve model öngörülü kontrol uygulaması yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada bulunan sistem parametreleri ile dönüştürücü kurularak dönüştürücü için yeni kontrol yöntemi önerilmiştir. Mayıs sineği algoritmasıyla optimize edilmiş klasik PI denetleyici ve kesir dereceli PI denetleyici sisteme uyarlanmıştır. Uyarlanan denetleyiciler ile literatürde yapılmış olan sabit yük analizi, değişken yük analizi ve giriş gerilimine uygulanan bozucu etkinin analizi üzerinden denetleyicilerin çalışması incelenerek iyileştirme amaçlanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda önerilen katsayıları optimize edilmiş klasik PI denetleyicinin literatürde olan model öngörülü kontrole çok yakın olduğu görülmüştür. Ancak dönüştürücüye daha iyi sonuç verebilecek bir kontrolcü olarak katsayıları optimize edilmiş kesir dereceli PI kontrolü uygulanmıştır. Uygulanan kontrolcü ile referans değere oturma süresinde ve aşma miktarında büyük bir iyileşme sağlanmıştır.

## 6. ÖNERİLER

Tasarımı ve denetimi yapılan mayıs sineği optimizasyonu tabanlı iki yönlü çift aktif köprülü doğru akım dönüştürücünün uygulamalı çalışması anahtarlama yöntemleri de geliştirilerek ilerleyen süreçte yapılabilir.

Dönüştürücünün kontrolcü parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan mayıs sineği optimizasyon algoritması haricinde başka bir optimizasyon algoritması denenerek aynı kontrolcüler için daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Bunun haricinde simülasyon süresince kabul edilmeyen kayıplar dikkate alınarak sistemin uygulamaya daha yakın bir halinin benzetimi yapılabilir. Dönüştürücünün analizi hep ileri yönlü olarak gösterilmiş ve batarya üzerinden değil yük üzerinden işlemler yapılmıştır. Bu durumu giriş ve çıkışa batarya koyarak dönüştürücünün iki batarya arasında kalmasını sağlayarak tüm çalışma durumları incelenebilir.

Literatürde olan farklı kontrolcü önerileri için de aynı şartlar oluşturularak en iyi denetleyici seçimi yapılabilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Louzolo, G. A. B, Comparative Study of PI and Model Predictive Control of The Dual Active Bridge DC-DC Converter, Electrical And Computer Engineering Thesis Program, Antalya Bilim University, Institute of Postgraduate Education, 2022.
2. Öztürk, M., Kahveci, H. ve Kırıkçı F.M., İki Yönlü Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücünün Tasarımı ve Kontrolü, ELECO, 2022.
3. Zeng, J., Du, X. ve Yang, Z., A Multiport Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Renewable Energy System Integration, IEEE Trans Power Electron 36 11 (2021) 12281.
4. Ekinoğlu, F., Modeling And Analysis of A Three Phase Dual Active Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter, Department of Electrical And Electronics Engineering Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, 2017.
5. Özer, O. İki yönlü izoleli iki köprü DC-DC dönüştürücünün tasarımı ve analizi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 2021.
6. Zhao, B., Song, Q., Liu, W. ve Sun, Y., Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System, IEEE Trans Power Electron 29 8 (2014) 4091.
7. Kızılcı, A., GAN Güç Tranzistörüne Dayalı, Yüksek Güç Yoğunluklu Çift Aktif Köprü DA/DA Çevirgeç Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
8. Yıldız, N., Makine Öğrenimi Tabanlı PID Optimizasyonu İle Çift Aktif Köprülü Doğru Akım Güç Çeviricilerinin Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
9. Li, X. ve Li, Y.F., An Optimized Phase-Shift Modulation for Fast Transient Response in a Dual-Active-Bridge Converter, IEEE Trans Power Electron 29 6 (2014) 2661.

10. Wei, S., Zhao, Z., Li, K., Yuan, L. ve Wen, W., Deadbeat Current Controller for Bidirectional Dual-Active-Bridge Converter Using an Enhanced SPS Modulation Method, IEEE Trans Power Electron 36 2 (2021) 1274.
11. Yılmaz, M. ve Krein, P.T., Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-in Electric and Hybrid Vehicles, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28 (2013) pp. 2151–2169.
12. Mi, C., Bai, H., Wang, C. ve Gargies, S., Operation, Design and Control of Dual H-Bridge-Based Isolated Bidirectional DC–DC Converter, IET Power Electronics 1 4 (2008) 507.
13. Kumar, B.M., Kumar, A., Bhat, A.H. ve Agarwal, P., Comparative Study of Dual Active Bridge Isolated DC to DC Converter with Single Phase Shift and Dual Phase Shift Control Techniques, 2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), (2017) 453–458.
14. Naayagi, R. T., & Forsyth, A. J. Bidirectional DC-DC converter for aircraft electric energy storage systems, In 5th IET International Conference on Power Electronics, (2010, April), Machines and Drives (PEMD 2010) (pp. 1-6). IET.
15. Mooers, C.N., Preventing Software Piracy, Computer (Long Beach Calif) 10 3 (1977) 29.
16. Safayatullah, M., Rezaii, R., Alaql, F. ve Batarseh, I., A Three-Port DC-DC-DC Converter Based on Dual Active Bridge Series Resonant Topology for Electric Vehicle DC Fast Charging Applications, 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2022, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (2022).
17. Kumar, B.M., Kumar, A., Bhat, A.H., Agarwal, P. ve Comparative Study of Dual Active Bridge Isolated DC to DC Converter with Single Phase Shift and Dual Phase Shift Control Techniques, 2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), (2017) 453–458.
18. Ma, Y., Wen, H., Zhou, X. ve Yin, J., Modeling and Control Strategy Simulation of Dual Active Bridge DC-DC Converter, 2021 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), (2021) 431–435.

19. Chi, S., Liu, P., Li, X., Xu, M. ve Li, S., A Novel Dual Phase Shift Modulation for Dual-Active- Bridge Converter, 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), (2019) 1556–1561.
20. Ranjan, A., Abhishek, A., Verma, B. K., Ram, S. K., Devassy, S., ve Dhakar, A. K. Analysis of Dual Active Bridge Converter in Dual-Phase-Shift mode using Pulse-Width Modulation Technique. In 2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), (2020, December), (pp. 1-7). IEEE.
21. Singh, R.K. ve Pal, Y., Operation and Control of Dual Active Bridge Bi-Directional DC-DC Converter Using Dual Phase Shift Control Technique, 2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES), (2022) 1–5.
22. Kumar, A., Bhat, A.H. ve Agarwal, P., Comparative Analysis of Dual Active Bridge Isolated DC to DC Converter with Double Phase Shift and Triple Phase Shift Control Techniques, 2017 Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), (2017) 257–262.
23. Aghajani, A.A., Faraji, F., Moti Birjandi, A.A. ve Ghias, A.M.Y.M., An Optimized Hybrid Model-Based Unified-Phase-Shift Control Strategy for Single-Phase Dual Active Bridge DC-DC Converter, 2022 13th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), (2022) 230–234.
24. Navarro, G., Rojas, F., Pereda, J., Díaz, M. ve Gatica, G., Design and Implementation of Dual Active Bridge Converter with Single Phase Shift Modulation for Electric Vehicle Charging System, 2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), (2021) 1–7.
25. Choi, S., Hong, J.-S. ve Ha, J.-I., Phase Control Using Network Node Voltage Feedback for Capacitor-Coupled Dual Active Bridge DC-DC Converters, 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), (2021) 3033–3038.
26. Bindi, M., Garcia, C. I., Corti, F., Piccirilli, M. C., Luchetta, A., Grasso, F. ve Manetti, S. Comparison between pi and neural network controller for dual active bridge converter. In 2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, (2021, July), Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG) (pp. 1-6). IEEE.

27. Tiwari, S., Hanif, O. ve Sarangi, S., Modeling and Control of Dual Active Bridge by Fractional Order Controllers, 2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA), (2019) 1–6.
28. Zhou, B., Yang, X., Nong, R., Li, Z., Zheng, T. Q. ve Koblre, P. Multi-objective optimization control for input-series output-parallel dual-active-bridge DC-DC converter in EER application. In 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), (2020, November), (pp. 2408-2413). IEEE.
29. Barlik, R., Grzejszczak, P. ve Koszel, M., Mathematical and Simulation Modeling of Dual Active Bridge, Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 70 5 (2022).
30. Ghosh, S. ve Singh, B., Optimized Modulation Scheme for Dual Active Bridge Converter Using Accurate Harmonic Model, 2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON), (2021) 1–6.
31. Bai, H., Mi, C., Wang, C. ve Gargies, S., The Dynamic Model and Hybrid Phase-Shift Control of a Dual-Active-Bridge Converter, 2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, (2008) 2840–2845.
32. Talbi, S., Mabwe, A.M. ve El Hajjaji, A., PI-Fuzzy Control of a Bidirectional Dual Active Bridge Converter, 2017 American Control Conference (ACC), (2017) 1271–1277.
33. Gorji, S.A., Sahebi, H.G., Ektesabi, M. ve Rad, A.B., Topologies and Control Schemes of Bidirectional DC–DC Power Converters: An Overview, IEEE Access 7 (2019) 117997.
34. Tytelmaier, K., Husev, O., Veligorskyi, O. ve Yershov, R., A Review of Non-Isolated Bidirectional Dc-Dc Converters for Energy Storage Systems, 2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), (2016) 22–28.
35. Chakraborty, A., Khaligh, A. ve Emadi, A., Combination of Buck and Boost Modes to Minimize Transients in the Output of a Positive Buck-Boost Converter, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, (2006) 2372–2377.

36. Matsuo, H., Lin, W., Kurokawa, F., Shigemizu, T. ve Watanabe, N., Characteristics of the Multiple-Input DC-DC Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics 51 3 (2004) 625.
37. Aden, I. A., Kahveci, H. ve Şahin, M. E., Design and Implementation of Single-Input Multiple-Output DC-DC Buck Converter for Electric Vehicles, *Journal of Circuits Systems And Computers* , 2021, vol.30, no.13.
38. Caricchi, F., Crescimbin, F., Noia, G. ve Pirolo, D., Experimental Study of a Bidirectional DC-DC Converter for the DC Link Voltage Control and the Regenerative Braking in PM Motor Drives Devoted to Electrical Vehicles, *Proceedings of 1994 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - ASPEC'94*, (1994) 381–386 vol.1.
39. Tuvar, B.B. ve Ayalani, M.H., Analysis of a Modified Interleaved Non-Isolated Cuk Converter with Wide Range of Load Variation and Reduced Ripple Content, 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), (2019) 406–411.
40. Rahman, M.M., Uddin, M.N. ve Islam, M.K., Performance Enhancement of a Bi-Directional DC-DC Converter Using a Cuk Converter for Electric Vehicle Applications, 2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), (2015) 875–880.
41. Middlebrook, R.D., Cuk, S. ve Behn, W., A New Battery Charger/Discharger Converter, 1978 IEEE Power Electronics Specialists Conference, (1978) 251–255.
42. Sahin, M. E. ve Okumus, H. İ., (2017). The Design Steps of a Hybrid Energy System. *Acta Physica Polonica A* ,2017, vol.132, no.3, 1160-1164.
43. Xu, B., Yan, Z., Zhou, W., Zhang, L., Yang, H., Liu, Y. ve Liu, L. A bidirectional integrated equalizer based on the sepic–zeta converter for hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (2022), 37(10), 12659-12668.
44. Caricchi, F., Crescimbin, F., Capponi, F.G. ve Solero, L., Study of Bi-Directional Buck-Boost Converter Topologies for Application in Electrical Vehicle Motor Drives, *APEC '98 Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Vol. 1, (1998) 287–293 vol.1.

45. Chung, H.S., Ioinovici, A. ve Cheung, W.-L., Generalized Structure of Bi-Directional Switched-Capacitor DC/DC Converters, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications 50 6 (2003) 743.
46. Spiazzi, G., Analysis and Design of the Soft-Switched Clamped-Resonant Interleaved Boost Converter, CPSS Transactions on Power Electronics and Applications 4 4 (2019) 276.
47. Zhang, J., Lai, J.-S. ve Yu, W., Bidirectional DC-DC Converter Modeling and Unified Controller with Digital Implementation, 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, (2008) 1747–1753.
48. Erat, A. ve Vural, A. M. Yüksek Gerilim Doğru Akım Güç Şebekelerinin Ara Bağlantıları İçin DA/DA Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler, ELECO, Kasım 2022
49. Peng, F.Z., Zhang, F. ve Qian, Z., A Magnetic-Less DC-DC Converter for Dual Voltage Automotive Systems, Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344), Vol. 2, (2002) 1303–1310 vol.2.
50. Kazimierczuk, M.K., Vuong, D.Q., Nguyen, B.T. ve Weimer, J.A., Topologies of Bidirectional PWM Dc-Dc Power Converters, Proceedings of the IEEE 1993 National Aerospace and Electronics Conference-NAECON 1993, (1993) 435–441 vol.1.
51. Taneri, M.C., Genc, N. ve Mamizadeh, A., Analyzing and Comparing of Variable and Constant Switching Frequency Flyback DC-DC Converter, 2019 4th International Conference on Power Electronics and Their Applications (ICPEA), (2019) 1–5.
52. Gorji, S.A., Ektesabi, M. ve Zheng, J., Isolated Switched-Boost Push-Pull DC-DC Converter for Step-up Applications, Electron Lett 53 3 (2017) 177.
53. Tao, H., Kotsopoulos, A., Duarte, J.L. ve Hendrix, M.A.M., Design of a Soft-Switched Three-Port Converter with DSP Control for Power Flow Management in Hybrid Fuel Cell Systems, 2005 European Conference on Power Electronics and Applications, (2005) 10 pp.-P.10.

54. George, K., Design and Control of a Bidirectional Dual Active Bridge DC-DC Converter to Interface Solar, Battery Storage, and Grid-Tied Inverters, (2015).
55. Ramakrishnan, H., Bi-Directional, Dual Active Bridge Reference Design for Level 3 Electric Vehicle Charging Stations, Syst. Eng. Texas Instruments, India (2019).
56. Bai, H. ve Mi, C., Eliminate Reactive Power and Increase System Efficiency of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC–DC Converters Using Novel Dual-Phase-Shift Control, IEEE Trans Power Electron 23 6 (2008) 2905.
57. Pandey, D.C., Behera, P.K. ve Pattnaik, M., Steady-State Analysis of Dual Active Bridge Converter with Single Phase Shift and Dual Phase Shift Modulation, 2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), (2023) 1–6.
58. Mishra, M. ve Sarkar, I., EV Battery Charging Using DAB DC-DC Converter with EPS and DPS Modulations, 2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), (2023) 1–6.
59. Zhao, B., Song, Q., Liu, W. ve Sun, Y., Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC–DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System, IEEE Trans Power Electron 29 8 (2014) 4091.
60. De Doncker, R.W.A.A., Divan, D.M. ve Kheraluwala, M.H., A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density DC/DC Converter for High-Power Applications, IEEE Trans Ind Appl 27 1 (1991) 63.
61. Zhao, B., Yu, Q. ve Sun, W., Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bidirectional DC–DC Converter for Power Distribution in Microgrid, IEEE Trans Power Electron 27 11 (2012) 4667.
62. Demetriades, G.D. ve Nee, H.-P., Characterization of the Dual-Active Bridge Topology for High-Power Applications Employing a Duty-Cycle Modulation, 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, (2008) 2791–2798.

63. Naayagi, R.T., Forsyth, A.J. ve Shuttleworth, R., Performance Analysis of Extended Phase-Shift Control of DAB DC-DC Converter for Aerospace Energy Storage System, 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, (2015) 514–517.
64. Kumar, A., Bhat, A.H. ve Agarwal, P., Comparative Analysis of Dual Active Bridge Isolated DC to DC Converter with Single Phase Shift and Extended Phase Shift Control Techniques, 2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA), (2017) 397–402.
65. Zhang, Z. ve Ruan, X., A Novel Double Phase-Shift Control Scheme for Full-Bridge Three-Level Converter, Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005., Vol. 2, IEEE (2005) 1240–1245.
66. Krismer, F. ve Kolar, J.W., Closed Form Solution for Minimum Conduction Loss Modulation of DAB Converters, IEEE Trans Power Electron 27 1 (2011) 174.
67. Zamani, A.-A. ve Etedali, S., Optimal Fractional-Order PID Control Design for Time-Delayed Multi-Input Multi-Output Seismic-Excited Structural System, Journal of Vibration and Control 29 3–4 (2023) 802.
68. Göktürk, E., Kesirli PID Tasarım Yöntemi ve Klasik PID ile Karşılaştırmalar, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
69. Zervoudakis, K. ve Tsafarakis, S., A Mayfly Optimization Algorithm, Comput Ind Eng 145 (2020) 106559.
70. Bawdaka, A., Model Öngörülü Kontrol ile Denetleyici Tasarım, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.

## ÖZGEÇMİŞ

Liseyi Trabzon Yomra Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2014'te Lisans öğrenimine Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğine başladı ve 2019 yılında mezun oldu. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitiminde güç elektroniği dönüştürücüleri alanında çalışmalar yapmaya devam etmektedir.

### Yayınlar

1. ÖZTÜRK, M., KAHVECİ, H. ve KIRIKCI, F. M. İki Yönlü Çift Aktif Köprülü DA-DA Dönüştürücünün Tasarımı ve Kontrolü, ELECO 2022.
2. Kırıkçı, F. M., Öztürk, M., ve Kahveci, H., AA Ev Yüklerini Besleyen Fotovoltaik/Batarya Sisteminin Matlab/Simulink Modeli ve Simülasyonu, ICAENS, 2022