

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DALGA ENERJİ SİSTEMLERİNDE ELEKTRİK GÜCÜ ÜZERİNDEKİ
DÜZENSİZ DALGA ETKİLERİNİN AKILLI KOMPANZASYON
YÖNTEMLERİYLE GİDERİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yük. Müh. Erdiñ ŞAHİN

**TEMMUZ 2017
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DALGA ENERJİ SİSTEMLERİNDE ELEKTRİK GÜCÜ ÜZERİNDEKİ DÜZENSİZ
DALGA ETKİLERİNİN AKILLI KOMPANZASYON YÖNTEMLERİYLE GİDERİLMESİ**

Elektrik Yüksek Mühendisi Erdiñ ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 / 05 / 2017

Tezin Savunma Tarihi : 11 / 07 / 2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Erdoğan ŞAHİN Tarafından Hazırlanan

DALGA ENERJİ SİSTEMLERİNDE ELEKTRİK GÜCÜ ÜZERİNDEKİ DÜZENSİZ
DALGA ETKİLERİNİN AKILLI KOMPANZASYON YÖNTEMLERİYLE
GİDERİLMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 20 /06/2017 gün ve 1707 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri






Başkan : Prof. Dr. Belgin TÜRKAY

Üye : Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ

Üye : Prof. Dr. Murat EKİNCİ

Üye : Doç. Dr. Nuran YÖRÜKEREN

Üye : Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı Doktora Programı'nda hazırlanan bu tez, dalga enerji sistemlerinde elektrik gücü tarafındaki düzensiz dalga etkilerinin akıllı kompanzasyon yöntemleriyle ve güç elektroniği ara yüzleri ile giderilmesi üzerine yapılan çalışmaları içermektedir.

Bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Temel Araştırma Projesi (BAP01) kapsamında FBA-2014-5168 kod numarası ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmama başladığım andan itibaren bilimsel desteği ve yönlendirmeleriyle beni yetiştiren, gelecek yıllarda da birlikte çalışmaktan mutluluk duyacağım değerli danışman hocam Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez izleme jürisinde yer alan hocalarım Prof. Dr. Murat EKİNCİ'ye ve Doç Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ'a bu teze değerli fikirleriyle katkıda buldukları için teşekkür ederim. Ayrıca, doktora çalışmasında dalga enerji sistemlerini çalışan bölümümüz hocalarından Yrd. Doç Dr. Emre ÖZKOP'a paylaşımcı yakınlığından dolayı teşekkür ederim.

Çalıştığım kurum olan KTÜ Sürmene Abdullah Kanca MYO'da Öğr. Gör. Dr. Ömür AKYAZI, Öğr. Gör. Erhan SESLİ, Öğr. Gör. Murat KÜÇÜKALİ ve diğer tüm öğretim üyesi/görevlisi arkadaşlarıma kıymetli sohbetleri ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, başta Dr. Mustafa Şinasi AYAS ve Araş. Gör. Yahya DANAYİYEN olmak üzere POWENCON laboratuvarı çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli anneme ve babama, bu süreçte hep yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Perihan Cansu ŞAHİN'e ve doğumunu sabırsızlıkla beklediğim kızım Zeynep Sare ŞAHİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Erdinç ŞAHİN

Trabzon 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Dalga Enerji Sistemlerinde Elektrik Gücü Üzerindeki Düzensiz Dalga Etkilerinin Akıllı Kompanzasyon Yöntemleriyle Giderilmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, 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. 11/07/2017

Erdinç ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|---|------------------------|
| ÖNSÖZ | III |
| TEZ ETİK BEYANNAMESİ..... | IV |
| İÇİNDEKİLER..... | V |
| ÖZET | VIII |
| SUMMARY | IX |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | X |
| TABLolar DİZİNİ..... | XV |
| SEMBOLLER DİZİNİ | XVI |
| 1. GENEL BİLGİLER | 1 |
| 1.1. Giriş..... | 1 |
| 1.2. Dalga Enerjisi..... | 2 |
| 1.2.1. Dünyada ve Ülkemizde Dalga Enerji Potansiyeli..... | 4 |
| 1.2.2. Dalga Enerji Dönüştürücüsü Teknolojileri | 6 |
| 1.2.3. Dalga Enerji Sistemlerinde Kullanılan Güç Elektronik Devreleri ve Denetim Sistemleri | 8 |
| 1.3. Tezin Kapsamı ve Organizasyon Şeması..... | 15 |
| 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR | 17 |
| 2.1. Giriş..... | 17 |
| 2.2. Dalga Enerji Dönüştürücü Sistemi..... | 19 |
| 2.2.1. Dalga Modeli..... | 19 |
| 2.2.1.1. Düzenli Deniz Dalgası | 19 |
| 2.2.1.2. Düzensiz Deniz Dalgası | 21 |
| 2.2.2. Dalga Enerji Spektrumları | 23 |
| 2.2.2.1. Düzensiz Deniz Dalgası | 23 |
| 2.2.2.2. Sayısal Model Tabanlı Dalga Enerji Spektrumları | 25 |
| 2.2.3. Generatör Modeli | 26 |
| 2.2.3.1. SMDG'nin İdeal Modeli | 26 |
| 2.2.3.2. SMDG'nin Dinamik Modeli | 28 |
| 2.2.4. Dalga Enerji Dönüştürücüsü Emülatörü | 29 |
| 2.2.4.1. SMSG'nin Gerilim-Akım İlişkisinin İncelenmesi | 32 |
| 2.2.4.2. Dalga Enerji Dönüştürücüsünün Modelleme Başarımı | 32 |
| 2.3. Güç Elektronik Devreleri..... | 40 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2.3.1. | 3-faz Diyot Doğrultucu | 40 |
| 2.3.2. | DA-DA Güç Çeviricileri | 40 |
| 2.3.2.1. | DA-DA Senkron Azaltan Çevirici | 42 |
| 2.3.2.1.1. | Sürekli İletim Modunda SAZÇ Analizi | 43 |
| 2.3.2.1.2. | SAZÇ Tasarımı | 47 |
| 2.3.2.1.3. | SAZÇ Devresinin Modelleme Başarımı | 49 |
| 2.3.2.2. | DA-DA Senkron Artıran Çevirici | 51 |
| 2.3.2.2.1. | Sürekli İletim Modunda SARÇ Analizi | 52 |
| 2.3.2.2.2. | SARÇ Tasarımı | 55 |
| 2.3.2.2.3. | SARÇ Devresinin Modelleme Başarımı | 57 |
| 2.3.2.3. | Seri Bağlı Senkron Azaltan-Artıran Çevirici Yapısı..... | 59 |
| 2.3.3. | Sürücü ve Optik Yalıtım Devresi..... | 61 |
| 2.3.4. | Akım-gerilim bilgisi ölçüm kartı | 62 |
| 2.4. | Ultra Kondansatör | 63 |
| 2.4.1. | UK Karakteristik Özellikleri | 63 |
| 2.4.2. | UK Modelleri | 65 |
| 2.4.2.1. | RC Paralel Kol Modeli..... | 65 |
| 2.4.2.2. | RC İletim Kol Modeli | 66 |
| 2.4.2.3. | RC Seri-Paralel Kol Modeli | 67 |
| 2.4.2.4. | Klasik RC Model | 67 |
| 2.4.3. | UK Modelleme Başarımı | 69 |
| 2.4.4. | UK Koruma ve Şarj Devresi | 72 |
| 2.5. | Fotovoltaik Enerji Destek Birimi | 73 |
| 2.6. | Kontrol Ünitesi..... | 73 |
| 2.7. | Yükler..... | 74 |
| 2.8. | Denetleyici Yöntemleri ve Optimizasyon Algoritmaları | 75 |
| 2.8.1. | Giriş..... | 75 |
| 2.8.2. | Denetleyici Yöntemleri | 75 |
| 2.8.2.1. | PID Denetleyici..... | 75 |
| 2.8.2.2. | Kesir Dereceli PID Denetleyici..... | 77 |
| 2.8.2.3. | Bulanık Mantık Denetleyici | 79 |
| 2.8.3. | Optimizasyon Algoritmaları | 84 |
| 2.8.3.1. | Giriş..... | 84 |
| 2.8.3.2. | Çiçek Tozlaşma Algoritması..... | 84 |

| | | |
|----------|---------------------------------------|-----|
| 2.8.3.3. | Parçacık Sürü Optimizasyonu | 86 |
| 2.8.3.4. | Optimizasyon Süreci ve Sonuçları..... | 88 |
| 3. | BULGULAR..... | 93 |
| 4. | SONUÇLAR | 118 |
| 5. | ÖNERİLER VE TARTIŞMA | 120 |
| 6. | KAYNAKLAR | 121 |
| 7. | EKLER..... | 135 |
| ÖZGEÇMİŞ | | |

Doktora Tezi

ÖZET

DALGA ENERJİ SİSTEMLERİNDE ELEKTRİK GÜCÜ ÜZERİNDEKİ DÜZENSİZ
DALGA ETKİLERİNİN AKILLI KOMPANZASYON YÖNTEMLERİYLE
GİDERİLMESİ

Erdoğan ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2017, 134 Sayfa, 5 Sayfa Ek

Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi popüler yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha fazla enerji yoğunluğuna ve gün içerisinde daha fazla kullanılabilirlik durumuna sahip olmasına rağmen dalga enerjisinin kullanımı, dalgaların doğal yapısı gereği üretilen enerjinin düzensiz karakteristik göstermesi, dalga enerji dönüştürücülerinin karmaşık ve maliyetli yapısı nedenleriyle yeteri kadar yaygın değildir. Özellikle doğrudan sürürlü dalga enerji sistemlerinde üretilen düzensiz gücün şebekeye veya yüke aktarılmadan önce güç elektroniği ara yüzleri, enerji depolama üniteleri veya karma enerji sistemleri ile birlikte kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada doğrudan sürürlü dalga enerji dönüştürücülerinde karşılama güç salınımlarını ve dengesizliklerini gidermek için seri bağlı senkron DA/DA artıran-azaltan çevirici güç elektroniği ara yüzü ile fotovoltaik paneller kullanılarak şarj edilen ultra-kondansatör ünitesinden oluşan karma bir enerji sistemi sunulmaktadır. Modelleme başarımlarının da incelendiği güç elektroniği devrelerinin denetiminde bulanık mantık, kesir dereceli PID ve klasik PID denetleyiciler kullanılmış ve bu denetleyicilerin performans analizi yapılmıştır. Denetleyicilerin optimizasyonunda sezgisel arama algoritmalarından çiçek tozlaşması algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu kullanılmıştır. Benzetim ve deneysel ortamda tasarlanan sistemlerin etkinliği hem düzenli dalga hem de düzensiz dalga durumunda farklı yük durumları için test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düzensiz dalga enerjisi, seri bağlı senkron artıran-azaltan DA/DA çevirici, güneş enerjisi, ultra-kondansatör, bulanık mantık denetleyici, kesir dereceli PID denetleyici, klasik PID denetleyici, çiçek tozlaşması algoritması, parçacık sürü optimizasyonu.

PhD. Thesis

SUMMARY

INTELLIGENT COMPENSATION OF IRREGULAR WAVE EFFECTS
ENCOUNTERED ON ELECTRICAL POWER IN WAVE ENERGY SYSTEMS

Erdoğan ŞAHİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İsmail Hakkı ALTAŞ
2017, 134 Pages, 5 Pages Appendix

Compared to popular renewable energy resources such as wind and solar, the wave energy has the highest energy density and availability. However the utilization of wave energy systems are not as common as above-mentioned renewable energy sources due to irregular characteristics of the electrical energy produced by natural sea waves, besides high cost and complexity of the wave energy converters. Especially, irregular electrical power generated in direct-drive wave energy systems requires to be used with power electronic interfaces, energy storage units or hybrid energy systems before being connected to the load or utility.

A hybrid power conditioner comprising of a power electronic interface circuit called as cascaded synchronous DC/DC buck-boost converter and a solar charged ultra-capacitor unit is introduced for direct-drive wave energy systems in this thesis. Fuzzy logic, fractional-order PID and classical PID controllers are designed to control power electronic circuits for performance improvements. In order to optimize the controller parameters, flower pollination algorithm and particle swarm optimization are employed. Effectiveness of the designed system in simulation and experiments with optimized controllers are tested considering both regular and irregular sea wave forms under different load conditions.

Key Words: Irregular wave energy, cascaded synchronous DC/DC buck-boost converter, solar energy, ultra-capacitor, fuzzy logic controller, fractional order PID controller, classical PID controller, flower pollination algorithm, particle swarm optimization.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

| | |
|--|----|
| Şekil 1. Tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen dalga enerjisi dönüşüm sistemi..... | 18 |
| Şekil 2. Düzenli dalga karakteristiği..... | 20 |
| Şekil 3. Farklı genlik ve frekanslardaki düzenli dalga karakteristikleri..... | 22 |
| Şekil 4. Düzensiz dalga karakteristiği (a) ve Fourier analizi (b)..... | 23 |
| Şekil 5. Farklı rüzgâr hızlarında Pierson-Moskowitz dalga spektrumu yanıtları..... | 24 |
| Şekil 6. DED benzetim modeli..... | 28 |
| Şekil 7. Laboratuvar ortamında kurulan DEDE şematik gösterimi..... | 30 |
| Şekil 8. Analog yalıtım devresi..... | 31 |
| Şekil 9. DEDE mekanik kısım, (a) enkoder, (b) 3-faz motor, (c) dişli çark, (d) SMSG..... | 31 |
| Şekil 10. DEDE sistemi düzenli ve düzensiz dalga enerjisi test üretim şeması..... | 34 |
| Şekil 11. DED düzenli ve düzensiz dalga enerjisi test üretim modeli..... | 34 |
| Şekil 12. Düzenli (a) ve düzensiz (b) dalga enerjisinin üretiminde kullanılan translator yer değişimi ve hız grafikleri..... | 35 |
| Şekil 13. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli tek faz gerilim..... | 37 |
| Şekil 14. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli tek faz gerilim..... | 37 |
| Şekil 15. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzensiz 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 200 Ω)..... | 38 |
| Şekil 16. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzensiz 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 20 Ω)..... | 38 |
| Şekil 17. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 200 Ω)..... | 39 |
| Şekil 18. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 20 Ω)..... | 39 |
| Şekil 19. 3-faz diyot doğrultucu devre şeması..... | 40 |
| Şekil 20. Doğrusal bir gerilim regülatörünün eşdeğer devresi..... | 41 |
| Şekil 21. Anahtarlamalı gerilim regülatörü devresi..... | 41 |
| Şekil 22. DA-DA AZÇ genel devre şeması..... | 43 |
| Şekil 23. DA-DA SAZÇ genel devre şeması..... | 43 |
| Şekil 24. SAZÇ çalışma prensibi (a) S1 kapalı, S2 açık, (b) S1 açık, S2 kapalı..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Şekil 25. (a) S1 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, (b) S2 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, S1 ve S2 anahtarlarının durumuna göre değişen (c) endüktans gerilimi ve (d) endüktans akımı (SAZÇ devresi) | 44 |
| Şekil 26. Kayıpsız SAZÇ gerilim kazancı ($V_{\dot{c}}/V_g$)-doluluk oranı (D) karakteristiği | 46 |
| Şekil 27. (a) SAZÇ detaylı devre şeması ve (b) deneysel devre görüntüsü | 49 |
| Şekil 28. Benzetim ortamında modellenen SAZÇ devresi | 50 |
| Şekil 29. (a) Benzetim modeli ve deneysel SAZÇ devresinin sistem yanıtları, (b) modelleme hatası | 51 |
| Şekil 30. ARÇ genel devre şeması gösterimi | 51 |
| Şekil 31. SARÇ genel devre şeması gösterimi | 52 |
| Şekil 32. SAZÇ çalışma prensibi, (a)S1 kapalı, S2 açık, (b) S1 açık, S2 kapalı..... | 53 |
| Şekil 33. (a) S1 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, (b) S2 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, S1 ve S2 anahtarlarının durumuna göre değişen (c) endüktans gerilimi ve (d) endüktans akımı (SARÇ devresi) | 53 |
| Şekil 34. SARÇ gerilim kazancı ($V_{\dot{c}}/V_g$)-doluluk oranı (D) karakteristiği | 56 |
| Şekil 35. (a) SARÇ detaylı devre şeması ve (b) deneysel devre görüntüsü | 58 |
| Şekil 36. Benzetim ortamında modellenen SARÇ devresi..... | 58 |
| Şekil 37. (a) Benzetim modeli ve deneysel SARÇ devresinin sistem yanıtları, (b) modelleme hatası | 59 |
| Şekil 38. Tasarlanan SBSAAÇ yapısının devre şeması | 60 |
| Şekil 39. IR2110 sürücü devresi..... | 61 |
| Şekil 40. DGM sinyali için kullanılan optik yalıtım devresi..... | 62 |
| Şekil 41. Klasik kondansatör ve UK'nın depo edilen enerji ve ısı kaybı açısından karşılaştırılması | 63 |
| Şekil 42. Kondansatör, UK ve bataryanın güç ve enerji yoğunluklarının karşılaştırılması [111]..... | 65 |
| Şekil 43. UK paralel RC kol modeli..... | 66 |
| Şekil 44. UK Üç kollu RC iletim hattı modeli | 66 |
| Şekil 45. UK'nın RC seri-paralel kol modeli | 67 |
| Şekil 46. UK'nın RC modeli. | 68 |
| Şekil 47. UK şarj-deşarj testleri için yapılan deneysel kurulumun şematik gösterimi | 70 |
| Şekil 48. Bilgisayar ortamında kurulan UK şarj-deşarj test modeli | 71 |
| Şekil 49. (a) UK şarj-deşarj eğrisi ve (b) modelleme hatası ($R=10.4 \Omega$)..... | 71 |

| | |
|---|----|
| Şekil 50. (a) UK şarj-deşarj eğrisi ve (b) modelleme hatası ($R=5.2 \Omega$)..... | 72 |
| Şekil 51. UK koruma ve şarj devresi deneysel gösterimi..... | 73 |
| Şekil 52. CDNG ara yüzüne ait bir gösterim..... | 74 |
| Şekil 53. Tez kapsamında kullanılan evirici, DA ve AA yükler..... | 75 |
| Şekil 54. Klasik PID denetleyicinin blok diyagramı gösterimi..... | 76 |
| Şekil 55. KDPID denetleyicinin blok diyagramı gösterimi..... | 78 |
| Şekil 56. BMD temel yapısı..... | 79 |
| Şekil 57. Bulanıklaştırma biriminin çalışma yapısı..... | 80 |
| Şekil 58. Kural işleme ünitesinin çalışma yapısı..... | 82 |
| Şekil 59. Maks-min metoduna göre elde edilen sonuç çıkarımı..... | 83 |
| Şekil 60. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan BMD yapısı..... | 84 |
| Şekil 61. ÇTA akış diyagramı..... | 87 |
| Şekil 62. Denetleyici parametrelerinin optimizasyon sürecine ait blok şeması..... | 89 |
| Şekil 63. PID denetleyici için ÇTA ve PSO ile elde edilen en iyi AF değişimleri (a) SAZÇ, (b) SARÇ)..... | 90 |
| Şekil 64. KDPID denetleyici için ÇTA ve PSO ile elde edilen en iyi AF değişimleri ((a) SAZÇ, (b) SARÇ)..... | 91 |
| Şekil 65. BMD için ÇTA ve PSO ile elde edilen en iyi AF değişimleri ((a) SAZÇ, (b) SARÇ)..... | 92 |
| Şekil 66. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan dalga enerji sistemi modeli..... | 94 |
| Şekil 67. Gerçek zamanlı denetleyici algoritmalarının ve veri giriş-çıkış bloklarının yer aldığı Matlab/Simulink modeli..... | 95 |
| Şekil 68. Dalga enerji sisteminin deneysel kurulumu, (a) güneş panelleri, (b) DED emülatörü, (c) osiloskop, (d) güç kaynağı, (e) 3-faz diyot doğrultucu, (f) gerilim-akım ölçüm kartı, (g) SARÇ devresi, (h) UK şarj ve koruma devresi, (i) SAZÇ devresi, (j) 3-faz motor sürücü, (k) yük masası, (l) UK ünitesi, (m) ölçüm barası, (n) analog yalıtım devresi, (o) dSPACE 1104 bağlantı kutusu, (p) masa üstü bilgisayar..... | 96 |
| Şekil 69. BMD ile UK'lı DED çıkışı (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 98 |
| Şekil 70. KDPID ile UK'lı DED çıkışı (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 98 |
| Şekil 71. PID ile UK'lı DED çıkışı (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 98 |
| Şekil 72. BMD ile UK'lı DA bara değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 98 |
| Şekil 73. KDPID ile UK'lı DA bara değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 98 |
| Şekil 74. PID ile UK'lı DA bara değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 98 |
| Şekil 75. BMD ile UK'lı yük çıkışı değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 99 |
| Şekil 76. KDPID ile UK'lı yük çıkışı değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 77. PID ile UK'lı yük çıkışı değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1) | 99 |
| Şekil 78. BMD ile UK'lı ÇO sinyalleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1) | 99 |
| Şekil 79. KDPID ile UK'lı ÇO sinyalleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1) | 99 |
| Şekil 80. PID ile UK'lı ÇO sinyalleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1) | 99 |
| Şekil 81. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilim karşılaştırılması (D1) | 100 |
| Şekil 82. BMD ile UK'sız DED çıkışı (D2) | 101 |
| Şekil 83. BMD ile elde edilen DA-bara (a, b) , yük (c, d) gerilim-akım sonuçları (D2) | 102 |
| Şekil 84. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D2) | 102 |
| Şekil 85. UK bağlantısız (a) ve UK bağlantılı (b) DA-bara ve yük çıkışı gerilim sinyallerinin osiloskop görüntüleri (D1-D2) (V2-V4: DA-bara, V1-V3: yük çıkışı) | 103 |
| Şekil 86. DED'de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D3) | 104 |
| Şekil 87. DA-bara ve yük çıkışı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D3) | 106 |
| Şekil 88. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D3) | 107 |
| Şekil 89. BMD ile UK'sız DED çıkışı (D4) | 107 |
| Şekil 90. BMD ile elde edilen DA-bara (a, b) , yük (c, d) gerilim-akım sonuçları (D4) | 108 |
| Şekil 91. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D4) | 109 |
| Şekil 92. DED'de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5) | 111 |
| Şekil 93. DA-bara gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5) | 111 |
| Şekil 94. Yük tarafı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5) | 111 |
| Şekil 95. ÇO sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5) | 111 |
| Şekil 96. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D5) | 112 |
| Şekil 97. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D6) | 113 |
| Şekil 98. DED'de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6) | 114 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 99. DA-bara gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6) | 114 |
| Şekil 100. Yük tarafı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6) | 114 |
| Şekil 101. ÇO sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6)..... | 114 |
| Şekil 102. DED’de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) düzensiz dalga hali, (c, d) düzenli dalga hali (D7)..... | 115 |
| Şekil 103. DA-bara gerilim-akım sinyalleri, (a, b) düzensiz dalga hali, (c, d) düzenli dalga hali (D7) | 116 |
| Şekil 104. Yük tarafı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) düzensiz dalga hali, (c, d) düzenli dalga hali (D7) | 116 |

TABLolar DİZİNİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Tablo 1. Ülkemizin 2005 ve 2015 yıllarına ait elektrik enerjisinde kullanılan kaynak dağılımları ve kurulu güç toplamları [2]..... | 2 |
| Tablo 2. Yenilebilir enerji kaynakları için hesaplanan yaklaşık üretim ve iletim masrafları [12] | 4 |
| Tablo 3. Dalga enerjisi açısından zengin bazı bölgelerin sahip olduğu net dalga gücü [13]..... | 5 |
| Tablo 4. (W ₁₋₅) dalgalarına ait genlik ve frekans bilgileri..... | 21 |
| Tablo 5. SMSG'nin elektriksel test sonuçları..... | 33 |
| Tablo 6. SMSG, Motor ve sürücü hızları test sonuçları | 33 |
| Tablo 7. SAZÇ tasarım değerleri..... | 47 |
| Tablo 8. SARÇ tasarım değerleri | 56 |
| Tablo 9. UK, kondansatör ve bataryanın bazı performans özellikleri bakımından karşılaştırılması [110]..... | 64 |
| Tablo 10. Maxwell BMOD0083-P048 UK özellikleri [119] | 69 |
| Tablo 11. 25 kurallı BMD kural tablosu..... | 82 |
| Tablo 12. ÇTA ile ayarlanan PID denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri..... | 90 |
| Tablo 13. ÇTA ile ayarlanan KDPID denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri..... | 91 |
| Tablo 14. ÇTA ile ayarlanan BMD denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri..... | 92 |
| Tablo 15. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D1) | 97 |
| Tablo 16. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D2) | 103 |
| Tablo 17. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D3) | 105 |
| Tablo 18. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D4) | 109 |
| Tablo 19. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D5) | 110 |
| Tablo 20. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D6) | 113 |

SEMBOLLER DİZİNİ

| | |
|--------|--|
| AA | : Alternatif akım |
| AAÇ | : Artıran-azaltan çevirici |
| ADC | : Analog-dijital dönüştürücü |
| ADS | : Archimedes dalga salıncağı |
| AF | : Amaç fonksiyonu |
| AMY | : Alanların merkezi yöntemi |
| ARÇ | : Artıran çevirici |
| ARDG | : Anahtarlamalı relüktanslı doğrusal generatör |
| AZÇ | : Azaltan çevirici |
| BMD | : Bulanık mantık denetleyici |
| C | : Dalga hızı |
| CDNG | : Control desk next generation |
| ÇO | : Çalışma oranı |
| ÇTA | : Çiçek tozlaşması algoritması |
| d | : Su derinliği |
| DA | : Doğru akım |
| DAC | : Dijital-analog dönüştürücü |
| de | : Hata sinyalinin değişimi |
| du | : Kontrol sinyalinin değişimi |
| DEÇ | : Dalga enerji çiftliği |
| DED | : Dalga enerji dönüştürücüsü |
| DEDE | : Dalga enerji dönüştürücüsü emülatörü |
| DES | : Dalga enerji sistemi |
| DG | : Doğrusal generatör |
| DGM | : Darbe genişlik modülasyonu |
| DHRS | : Dalga hız referans sinyali |
| DS | : Doğrudan sürüslü |
| DS-DED | : Doğrudan sürüslü dalga enerji dönüştürücüsü |
| DS-DG | : Doğrudan sürüslü doğrusal generatör |
| e | : Hata sinyali |

| | |
|-----------------|--|
| f | : Dalga frekansı |
| g | : Yer çekimi ivmesi |
| GEAY | : Güç elektroniği ara yüzü |
| GND | : Toprak bağlantısı |
| GTHB | : Generatör tarafı hız bilgisi |
| H | : Dalga yüksekliği |
| H _s | : Belirgin dalga yüksekliği |
| HBD | : Histerisiz bant denetimi |
| IAE | : Hatanın mutlak değerinin integrali |
| ISE | : Hatanın karesinin integrali |
| ITAE | : Zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali |
| k | : Açısal dalga numarası |
| KDPID | : Kesir dereceli oransal-integral-türevsel |
| K _D | : Türev katsayısı |
| K _{de} | : Hatanın değişimine ait bulanık üçgen kümenin ölçek değeri |
| K _{du} | : Kontrol sinyalinin değişimine ait bulanık üçgen kümenin ölçek değeri |
| K _e | : Hataya ait bulanık üçgen kümenin ölçek değeri |
| KHR | : Katı hal rölesi |
| K _I | : İntegral katsayısı |
| K _P | : Oransal katsayı |
| ÖD | : Öngörülü denetim |
| MÖD | : Model öngörülü denetim |
| MTHB | : Motor tarafı hız bilgisi |
| N | : Sarım sayısı |
| P | : Oransal |
| PI | : Oransal-integral |
| PID | : Oransal-integral-türevsel |
| PSO | : Parçacık sürü optimizasyonu |
| r | : Referans sinyali |
| RD | : Reaktif denetim |
| r _c | : Kondansatör direnci |
| r _{DS} | : Mosfet drain-source direnci |

| | |
|------------|---|
| r_L | : Endüktans direnci |
| REZD | : Rezonans doğrultucu |
| R_{epd} | : Eşdeğer paralel direnç |
| R_{esd} | : Eşdeğer seri direnç |
| R_s | : Sargı direnci |
| SAGP | : Sıfır aşağı geçiş periyodu |
| SARÇ | : Senkron artıran çevirici |
| SAZÇ | : Senkron azaltan çevirici |
| SBÇSHK | : Seri bağlı çok seviyeli H-köprüsü |
| SBSAAÇ | : Seri bağlı senkron artıran-azaltan çevirici |
| SEM | : Seviyelendirilmiş enerji maliyeti |
| SG | : Salınan gövde |
| SYGP | : Sıfır yukarı geçiş periyodu |
| SMDG | : Sabit mıknatıslı doğrusal generatör |
| SMSG | : Sabit mıknatıslı senkron generatör |
| SSK | : Salınımlı su kolonu |
| u | : Denetim sinyali |
| UK | : ultra-kondansatör |
| UVM | : Uzay vektör modülasyonu |
| ÜAS | : Üstten aşırı sistemler |
| y | : Sistem yanıtı |
| T | : Periyot |
| t | : Zaman |
| ω_m | : Elektriksel açı frekansı |
| θ | : Faz açısı |
| Φ | : Manyetik akı |
| Σ | : Dalga açısal frekansı |
| λ | : Dalga boyu- integral operatörü kesir derecesi |
| ρ | : Su yoğunluğu |
| μ | : Türev operatörü kesir derecesi |

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji, önemi dünden bugüne taşınan ve geleceğe de taşınacak olan bir konudur. Bu nedenle, ülkeler sürekli enerji politikaları geliştirmekte, yarının ihtiyacını bugünden planlamakta ve geleceğe yönelik yatırımlar yapmaktadırlar.

Enerji tüketim seviyesi, toplumların gelişmişlik düzeyinin gösterilmesinde kullanılan önemli parametrelerden bir tanesidir. 7.3 milyar olan dünya nüfusunun 2040 yılında 9.1 milyara ulaşması beklenmektedir. Nüfusta beklenen %25'lik artış ve ekonomik gelişmeler ile birlikte dünya mevcut enerji ihtiyacının (ulaşım, endüstriyel, elektrik üretimi ve konut alanlarında) 2040 yılında, 2015'e göre % 25 oranında artacağı tahmin edilmektedir [1].

Küresel elektrik enerjisi ihtiyacının ise 2015-2040 yılları arasında 21-22 bin TWh'dan, 33-34 bin TWh'lara kadar %60 oranında artması beklenmektedir [1]. Dünya üzerinde elektrik enerjisi üretmek için kullanılan kaynaklar; kömür, petrol, doğal gaz, nükleer, rüzgâr/güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (dalga enerjisi, jeotermal, hidroelektrik, biyokütle vb.). 2015 yılında yapılan araştırmada elektrik enerjisi üretiminde en çok paya ait kaynağın %40 ile kömür olduğu bildirilmiştir [1]. 2040 yılına gelindiğinde ise elektrik enerjisi üretiminde kömür oranının %30'un altına düşmesi beklenmektedir. Bu düşüşün sebebi ise karbondioksit salınımını azaltmak için ülkelerin enerji politikalarında doğal gaz, nükleer ve yenilenebilir enerjilere olan yatırımlarını artıracak olmalarıdır.

Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş ve rüzgâr enerjisi 2040 yılına gelindiğinde %360 büyüme göstermesi ve bu kaynaklar kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin, küresel elektrik enerjisi üretiminde yaklaşık %15'lik bir paya sahibi olması beklenmektedir [1].

Ülkemizde ise elektrik enerjisi üretiminde 2005 ve 2015 yıllarına ait elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların kurulu güç dağılımları Tablo 1'de gösterilmektedir [2]. Tablo 1'de verilen kaynaklardan termik başlığı kömür, sıvı yakıtlar, doğal gaz, çok yakıtlı ve atık-atık ısı enerji kaynaklarını içermektedir.

Ülkemizin kurulu gücü 2005 yılından 2015 yılına kadar geçen süre içerisinde yaklaşık olarak iki kat artmış ve hızla artmaya da devam etmektedir.

Tablo 1. Ülkemizin 2005 ve 2015 yıllarına ait elektrik enerjisinde kullanılan kaynak dağılımları ve kurulu güç toplamları [2]

| Yıl | Termik | Hidrolik | Jeotermal | Rüzgâr | Güneş | Toplam (MW) |
|------|----------|----------|-----------|---------|-------|-------------|
| 2005 | 25.902,3 | 12.906,1 | 15,0 | 20,1 | - | 38.843,5 |
| % | 66,68 | 33,23 | 0,04 | 0,05 | - | 100,00 |
| 2015 | 41.903,0 | 25.867,8 | 623,9 | 4.503,2 | 248,8 | 73.146,7 |
| % | 57,29 | 35,36 | 0,85 | 6,16 | 0,34 | 100,00 |

Geçen süre içerisinde tıpkı dünya genelinde olduğu gibi ülkemizde de termik santrallere dayalı elektrik enerjisi üretimi yüzde olarak azalmış, yenilenebilir enerji türlerinden hidrolik, jeotermal, rüzgâr ve güneş enerjilerine olan yatırımlar artmıştır.

1.2. Dalga Enerjisi

Fosil yakıt fiyatlarının sürekli değişken olması ve bu kaynakların çevreye olan olumsuz etkileri nedeniyle yenilenebilir enerjiye olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Öyle görünüyor ki geleceğin enerji ihtiyacının büyük bir bölümü yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacaktır [3, 4].

Güneş enerjisi canlı yaşamı ve varlığı için tartışmasız bir kaynaktır. Son yıllarda güneş ışınlarından elektrik üretimi yapan güneş panellerinin kullanımı teknolojik gelişmeler ile birlikte bir hayli dikkat çekmektedir. Güneşin dünya yüzeyini farklı sıcaklıklarda ısıtması ile diğer bir önemli yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgâr oluşmaktadır. Rüzgârın ise okyanus ve deniz yüzeylerinde esmesiyle dalga oluşumu gerçekleşmektedir. Rüzgâr sayesinde üretilen bu dalgaların enerjisi elektrik üretiminde kullanılabilir. Öyle ki İspanya, Japonya, Portekiz ve Tayland gibi bazı ülkeler dalga enerji potansiyelini görerek gelecek yılların yatırımını şimdiden planlamışlardır [5].

Küresel anlamda teorik olarak hesaplanan dalga enerji potansiyeli yaklaşık 32.000 TWsaat/yıl (3.65 TW)'dır [6]. Dalga enerjisi, rüzgâr ve güneş enerjisi gibi popüler enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında öne çıkan en önemli özelliği en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasıdır. Güneş enerjisinin rüzgâra, rüzgârında dalga enerjisine dönüştüğü çevrimde güneşten dalga enerjisine doğru güç yoğunluğunun arttığı bilinmektedir. [7]'de verilen bir araştırmaya göre 15° kuzey enleminde ölçülen solar güneşlenme 0.17 kW/m²'dir. Bu solar güneşlenmenin ortaya çıkardığı ortalama rüzgâr hızı 10 m/s'dir ve bu rüzgârdan elde

edilebilecek güç yoğunluğu ise 0.58 kW/m^2 'dir. Elde edilen bu rüzgârın ise 8.42 kW/m^2 güç yoğunluğuna sahip dalga oluşturabildiği hesaplanmıştır.

Dalga enerjisi güç yoğunluğunun, rüzgâr enerjisi güç yoğunluğundan yaklaşık 15 kat büyük olması, dalga enerji dönüştürücü (DED) sisteminin fiziksel olarak rüzgâr enerjisi dönüştürücü sisteminden yaklaşık 15 kat daha küçük olması sonucunu doğurabilir. Aynı güç kapasitesine sahip rüzgâr türbini ve dalga enerji dönüştürücüsü [8]'de fiziksel büyüklük açısından da karşılaştırılmıştır. Vestas adında ve 850 kW 'lık güç kapasitesi olan bir rüzgârgülü, 60 m kule yüksekliği ve 52 m pervane çapına sahiptir. Buna karşılık 750 kW güç kapasiteli Pelamis adında DED'in boyu 150 m ve çap genişliği sadece 3.5 m'dir.

Dalga enerjisini öne çıkaran diğer bir konu ise gün içerisindeki kullanılabilirlik durumudur. Belirli bir bölgedeki dalga enerjisi kullanılabilirliği zamanın %90'ına kadarken, güneş ve rüzgâr enerjisi kullanılabilirliği yalnızca zamanın %20-30'u seviyesinde bulunmaktadır [9].

Dalga enerjisi kullanımının rüzgâr ve güneş enerjisi gibi artmamasının nedeni deniz dalgasından enerji çıkarımının yukarıda bahsedilen enerji çeşitleri kadar basit olmamasından kaynaklanmaktadır. Dalgaların genlik ve frekansının doğası gereği düzensiz olması üretilen enerjinin de düzensiz olmasına yol açmaktadır. Üretilen bu enerji direkt olarak yük beslemesinde veya şebeke bağlantısında kullanılamayacağı için ultra-kondansatör, batarya veya diğer enerji kaynaklarının birlikte kullanıldığı bütünleşik bir enerji sistemine veya mekanik sistemler (hidrolik-pnömatik devreler) ile DED yapısının değiştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [10].

Dalgalardan enerji çıkarımında karşılaşılan diğer bir önemli zorluk ise olağanüstü hava koşulları yani fırtınalardır. Kıyı şeridinde veya deniz açıklarında konuşlandırılan dalga enerji dönüşüm sistemi bu tarz doğa olaylarına karşı korunaklı olmalıdır.

Sağladığı avantajlar dalga enerjisini diğer yenilenebilir enerji sistemleri arasında her ne kadar ön plana çıkarsa da, dalga enerji sistemlerine yapılan yatırımlar güneş ve rüzgâr enerjisine yapılan yatırımlara oranla daha azdır. Küresel anlamda yaşanan ekonomik kriz nedeniyle de dalga enerji teknolojilerine yatırım yapmak daha da zor hale gelmektedir [10].

Enerji kaynaklarına yapılacak olan yatırımların karşılaştırılmasında üretim ve iletim maliyetlerinin karşılaştırılması büyük önem arz etmektedir. Bu karşılaştırmada ise genellikle seviyelendirilmiş enerji maliyeti (SEM) (levelized cost of energy) dikkate alınmaktadır. SEM, proje yatırımının karlı olması için üretilen elektriğin satılması gereken enerji fiyatı olarak tanımlanmaktadır. 2013 yılı Dünya enerji konseyi raporuna göre SEM değeri dalga

enerjisi için ortalama 49.6 cents/kWsaat'tir [11]. Bu değerin diğer yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Yapılacak olan yatırımlar ve teknolojik gelişmeler ile dalga enerjisi SEM değerinin 2030 yılına kadar 16-17 cents/kWsaat oranlarına kadar düşürülmesi hedeflenmektedir [11]. Ayrıca dalga enerjisinin diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretim ve iletim masrafları (\$/kWh) açısından karşılaştırılması Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 2'ye göre gelecek yıllarda dalga enerjisi sistemlerinde meydana gelecek olan teknolojik gelişmeler ile ortaya çıkacak maliyet hesabı diğer yenilenebilir enerji sistemleriyle yarışabilir hale gelecektir.

Tablo 2. Yenilenebilir enerji kaynakları için hesaplanan yaklaşık üretim ve iletim masrafları [12]

| Enerji teknolojisi | 2005-2010 | 2020> |
|---------------------------|------------------|-----------------|
| Rüzgar (Kara) | \$0.04-0.07 | ≤ \$0.04 |
| Rüzgar (Açık deniz) | \$0.10-0.17 | \$0.08-0.13 |
| Dalga | ≥ \$0.11 | \$0.04 |
| Jeotermal | \$0.04-0.07 | \$0.04-0.07 |
| Hidroelektrik | \$0.04 | \$0.04 |
| fotovoltaik | > \$0.2 | \$0.1 |
| Gelgit | > \$0.11 | \$0.05-0.07 |

1.2.1. Dünyada ve Ülkemizde Dalga Enerji Potansiyeli

Dünya üzerinde dalga enerjisi açısından en zengin alanlar hem Kuzey hem de Güney yarım kürenin 40°-60° enlemleri arasında kalan alandır. Fakat en yüksek yıllık ortalama potansiyele sahip alan Güney yarım kürede yer alan 40°-60° enlemleri arasındır [10]. Dalga enerjisi açısından zengin bazı bölgelerin sahip olduğu net dalga gücü (5 kW/m'den küçük alanlar ve buzullar hariç) Tablo 3'te verilmektedir [13].

Bazı ülkelere ait dalga güçleri; İrlanda 21GW, Portekiz 10GW, Danimarka 3.4 GW, İsveç 1GW, İngiltere 120 GW ve Akdeniz tarafında Fransa, İtalya, İspanya ve Yunanistan'ın toplam dalga gücü 30 GW olarak hesaplanmaktadır [14].

Tablo 3. Dalga enerjisi açısından zengin bazı bölgelerin sahip olduğu net dalga gücü [13]

| Bölge | P_{net} (GW) |
|------------------------------------|----------------|
| Avustralya ve Yeni Zellanda | 574 |
| Güney Amerika'nın batısı | 324 |
| Avrupa'nın kuzeyi ve batısı | 286 |
| Asya'nın güney doğusu ve Malenezya | 283 |
| Kuzey Amerika'nın batısı | 207 |
| Güney Amerika'nın doğusu | 202 |

Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizin kıyı uzunluğu yaklaşık 8210 km'dir. Ancak Türkiye'nin dalga potansiyeli, her kıyı bölgesinde küçük dalga enerji sistemleri kurmak için uygun değildir. Türkiye'nin toplam sahil uzunluğunun yaklaşık beşte biri 18.5 TWsaat/yıl (yaklaşık 2.11GW) dalga enerjisi teknik potansiyeline sahiptir [15]. [16]'da verilen bilgilere göre ise ülkemizin dalga enerjisi potansiyeli 4-17 kW/m (m: dalga tepe uzunluğu) dalga gücü aralığında kullanılabilir kaynak olarak yaklaşık 10 TWsaat/yıl olarak belirtilmiştir. İstanbul Boğazının kuzeyi, Batı Karadeniz bölgesi ve Ege Denizi'nin güneybatı kıyıları (Marmaris, Finike arası) dalga enerjisi için en iyi mevkiler olarak önerilmektedir [16].

Karadeniz Bölgesinin dalga enerji potansiyelinin araştırılmasına yönelik bir kaç bilimsel çalışma gerçekleştirilmiştir [17-20]. [18]'de Karadeniz'in 15 yıllık sayısal verileri temel alınarak dalga enerjisi potansiyeli araştırılmıştır. Buna göre, Karadeniz'in güneybatı kıyıları, bir dalga çiftliği kurulması için en iyi yer olarak önerilmektedir. Karadeniz'in batı bölgelerinin (özellikle güneybatıda yıllık ortalama dalga enerjisi kaynağı 3 kW/m'ye kadar çıkmaktadır) doğu bölgelerden daha enerjik dalgalara sahip olduğu saptanmıştır [18]. [19]'da yapılan çalışmada ise Karadeniz'e ait 13 yıllık rüzgâr verileri 3. Jenerasyon spektral dalga modeli ile analiz edilmiş ve dalga enerji potansiyelinin batıdan doğuya doğru azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmaya göre, Karadeniz'in Güney Batı bölümünde en büyük ortalama dalga gücü yaklaşık 7 kW/m ve doğu kesiminde ortalama dalga gücü yaklaşık 3 kW/m'dir. [20]'de yapılan çalışmada göre ise Karadeniz'in güneydoğu sahillerindeki dalga enerjisi potansiyeli verilmektedir. Bu çalışmada Sinop 10 MWh/m dalga güç akısı ile en yüksek değere sahip il olmuştur. Diğer kıyı şeridi illerinin (Samsun, Ordu, Giresun, Trabzon, Rize ve Hopa) yıllık dalga enerjisi potansiyeli yaklaşık 6 MWh/m olduğu ve bu potansiyeli 0.5-2

m belirgin dalga yüksekliklerine ve 2-5 s dalga periyotlarına sahip dalgaların oluşturduğu belirtilmektedir. Ayrıca [20]'de, gelecekte artacak olan DED'lerin verimliliği ve dalga enerjisinin çıkarılması için teknolojik yeteneklerin geliştirilmesi ile dalga enerjisinin dikkat çekici bir enerji kaynağı haline geleceği ve Karadeniz'in güneydoğusundaki kıyılarında tahmin edilen dalga enerjisi potansiyelinin düşük olduğu belirtilmektedir.

Ülkemizde gerçekleştirilen gerçek dalga enerjisi uygulamalarına bakacak olursak, bu konu ile ilgili ülkemizde yapılan ciddi prototip denemelerinden bir tanesi Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN) ve Türkiye Elektromekanik Sanayi A.Ş. (TEMSAN) işbirliğiyle 15 Şubat 2008 tarihinde başlatılan "Dalga Enerjisinden Elektrik Üretimi" isimli projeye Sakarya'nın Karasu ilçesinde gerçekleştirilmiştir. 5 kW gücünde ve mobil olarak tasarlanan sistem 4 adet duba, şamandıra ve generatörden meydana gelmektedir. Sistem dalgaların dikey hareketinin şamandıra ile generatöre iletilmesiyle çalışmaktadır [21].

Son zamanlarda Karadeniz için dalga enerjisi açısından sevindirici bir gelişme de yaşanmıştır. Batı Karadeniz Kalkınma Ajansı (BAKKA)'nın 27.03.2017 tarihli duyurusunda Avustralya menşeli CSG Exploration and Production Services firması ile gerçekleştirilen görüşmelerde Zonguldak'a ücretsiz bir pilot tesis kurulumunun talep edildiği ve firmanın 50 kW gücündeki bu tesisi ücretsiz olarak kurmayı kabul ettiği belirtilmiştir [22]. Böylelikle Karadeniz'de dalga enerjisi uygulamasına başlanacaktır. Bu gelişme bölgemiz ve ülkemiz için dalga enerji sistemlerinin geleceği açısından oldukça önemlidir.

1.2.2. Dalga Enerji Dönüştürücüsü Teknolojileri

Dalga enerjisi dönüştürücüleri (DED) en temel anlamda dalganın yatay ve dikey hareketlerini yakalayarak bu hareket enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemlerdir. DED'ler ile ilgili yapılan çalışmaların patent tarihi 1799 yılına kadar dayanmaktadır [23]. DED sistemleri üzerine yapılan çalışmalarda Japonya, Kuzey Amerika ve Avrupa'da binden fazla dalga enerji dönüşüm yöntemi patentlenmiştir [24]. Tasarımdaki bu büyük değişimlere rağmen, DED'ler genellikle konum ve türe göre sınıflandırılmaktadır [25].

Konumuna göre DED sistemleri kıyı, yakın kıyı ve açık deniz olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Kıyı tipi sistemlerinde DED'ler kıyı şeridinde konumlandırılır ve sığ sulara yerleştirilmektedir. Bu tip DED'lerin en büyük avantajı kurulumunun-bakımının kolay olması ve üretilen enerjiyi şebekeye aktarmak için uzun deniz kablosuna ihtiyaç

duyulmamasıdır. Bununla birlikte, uygun kıyı alanlarının kısıtlı olması ve kıyı dalgalarının daha az enerji içermesi kıyı enerji sistemlerinin olumsuz yönleri olarak tartışılmaktadır [25].

Yakın kıyı DED sistemleri kıyıya birkaç yüz metre mesafede ve 10-25 m derinlikte konumlandırılan DED'leri içermektedir. Bu alandaki DED'ler genellikle deniz tabanına sabitlenir ve salınan gövde tarzında uygulamaları mevcuttur. Ancak yapı, dalgaların ortaya çıkardığı gerilmeyi taşımalıdır. Tıpkı kıyı sistemlerinde olduğu gibi yakın kıyı sistemlerinin de dalgalardan enerji çıkarımı potansiyeli düşük güçlü dalgalar nedeniyle daha azdır [25].

Açık deniz uygulamaları ise genellikle 40 m'den daha derin sularda DED'lerin konumlandırılmasıdır. Bu tarz sistemler açık sularda dalga genliği ve periyodu daha fazla olduğu için dalga gücünden en çok yararlanan sistemlerdir. Fakat açık denize yerleştirilen DED'lerin bakımı pahalıdır ve dönüştürücü büyük genlikli dalgaların verebileceği hasarlara dayanıklı tasarlanmalıdır. Ayrıca, enerjinin kıyıya taşınması için uzun ve pahalı deniz kablolarına ihtiyaç duyulmaktadır [10].

Literatürde DED teknolojileri olarak salınımlı su kolonu (SSK), salınan gövde (SG) ve üstten aşımli sistemler (ÜAS) üzerine yapılan çalışmalar yer almaktadır. Bunlar arasında ise SG'li sistemler en sık kullanılan DED çeşidi olarak belirtilmiştir [26].

SSK sistemlerinde kolon adı verilen yapıların alt kısmında deniz suyu üst kısmında ise hava yer almaktadır. Dalga hareketinin üstte yer alan havayı sıkıştırmasıyla, oda içerisinde sıkışan havanın elektrik generatörünü döndürmesi sonucunda enerji üretilmektedir [27]. En önemli örneği LIMPET adı verilen, kıyı konumlu DED tipidir [24].

ÜAS'ler bir rampa yardımıyla topladıkları dalgaların kinetik enerjisini sistemin haznesinde toplayarak potansiyel enerjiye dönüştürmektedir. Depolanan bu su tıpkı hidrolik sistemlerde olduğu gibi tribüne iletilmektedir [27]. Bu teknoloji ile çalışan en bilindik DED tipi ve açık deniz uygulamalarında kullanılan ilk ÜAS olma özelliği taşıyan sistem Wave Dragon'dur (2003 yılında Danimarka'da, gücü: 140kW, rezervuar genişliği: 55m³) [28].

SG adı verilen sistemler ise genellikle açık sularda kurulan sistemlerdir. Dalgaların itici gücü DED gövdesini aşağı-yukarı ve/veya sağa-sola hareket ettirerek enerji indüklenmesini sağlar [27]. Bu tarz sistemler kendi içerisinde hidrolik ve doğrudan sürüştü (DS) olmak üzere ikiye ayrılır.

SG tip hidrolik sistemlerde hidrolik pompalar elektrik generatörünü çalıştırmaktadır. Bu tip DED'lerin en bilinen uygulaması Pelamis adı verilen DED'dir [29]. Eklemlili bir yapıdan oluşan Pelamis şu an ticari amaçlı kullanılan bir DED teknolojisidir. Pelamis'in

2008 yılında Portekiz açıklarında (kıyıdan 5km uzaklıkta) konumlandırılan 750kW'lık bir uygulaması vardır [30].

SG tipi DED'lerin diğ er bir uygulaması da DS sistemlerdir. Hidrolik sistemlere göre yapısı daha basit olan DS sistemler, verimli bir şekilde dalgadan enerji çıkarmak için kullanılmaktadır [27]. Yapısı temel olarak deniz yüzeyinde hareket eden bir ş amandıra ve doğrusal generatörden (DG) meydana gelen DS sistemler ile üretilen 3-faz elektrik enerjisi dalganın düzensiz karakteristiğini iç ermektedir. Bu durum üretilen enerjinin direkt yük beslemesinde veya şebeke bağlantısında kullanılmasına engel olmaktadır. Dolayısıyla DS sistemler ile üretilen enerjinin güç elektroniğı devreleri ile düzenlenmesi gerekmektedir [27]. DS-DED'in en bilinen uygulaması Archimedes dalga salıncağıdır (ADS). Deniz tabanına sabitlenmiş olan ADS sistemi, iç i hava dolu ş amandıranın üzerinden geçen dalganın dikey konum hareketiyle elektrik enerjisi üretmektedir [31]. Ş amandıranın hareketi doğrusal olduğu için elektrik üretiminde DG kullanılmaktadır. Su altı uygulaması olan ADS dalga enerji sistemi ilk prototipi 2000 yılında Portekiz kıyısında konumlandırılmış olup, 2MW'lık maksimum güce sahiptir [32]. Lysekil projesi (gücü:10kW, ÷ lke: İsveç) ve Oregon Üniversitesinin geliştirildiğı L10 DED sistemi (gücü:10kW, ÷ lke: Amerika) DS sistemlere verilebilecek diğ er önemli ç alışmalardır [33, 34].

Tez kapsamında kıyı konumlu DS- DED sistemi için güç elektroniğı devreleri ile ultra-kondansatör destekli bir güç ara yüzü tasarımı yapılarak dalgaların ürettiğı düzensiz enerjinin kullanılabilir hale getirilmesi hedeflenmektedir.

1.2.3. Dalga Enerji Sistemlerinde Kullanılan Güç Elektroniğı Devreleri ve Denetim Sistemleri

Bu bölümde literatürde dalga enerji sistemleri (DES) için kullanılan güç elektroniğı ara yüzleri ve denetim algoritmaları verilmektedir. Yapılan ç alışmalar benzetim ve deneysel olarak iki ana başlık altında incelenmiş, deneysel sistemlerde düzenli dalga ve düzensiz dalga modelleri olmak üzere iki alt başlık altında toplanmıştır. İncelenen ç alışmalardan bazıları gelecek sayfalarda verilmektedir.

Benzetim ç alışmaları: Bu kısımda DES'ler ile ilgili yapılan benzetim ç alışmaları incelenmiştir.

Boström vd. [35] DS-DG'nin ç alışma karakteristiğini farklı yük durumları için incelemektedir. Matlab ortamında geliştirdikleri benzetim modelinin doğruluğunu, Lysekil projesinden elde edilen verileri kullanarak kanıtlamışlardır. Generatörün davranışının hem

AA karakteristiğini hem de doğrultucu kullanarak DA karakteristiğini inceleyen çalışma herhangi bir denetim yöntemi kullanmamıştır.

Thornburn vd. [36] DG'lerden oluşan bir dalga enerji çiftliğinin (DEÇ) benzetimini gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada aynı ve farklı frekans ve genlik değerlerine sahip dalgaların uygulandığı beş ve on adet DG'lerden oluşan bir DEÇ'in enerji analizini yapmışlardır. Araştırmacılar birden fazla DG'nin kullanılmasıyla oluşturulan enerji çiftliği sisteminde üretilen enerjinin doğrultulmuş halinin daha az salınım içerdiğini ve böylelikle DES'lerde görülen sıfır geçişlerinin azaltıldığını savunmaktadırlar. Çalışmada herhangi bir denetim yönteminden bahsedilmemektedir.

Nie vd. [37] benzetim ortamında DS-DED sistemine karma enerji depo üniteleri (ultra-kondansatör (UK) ve Li-ion akü) entegre ederek sabit bir DA bara gerilimi elde etmektedir. Düzenli dalga rejiminde genlik değişimini dikkate alan çalışmada DED sistemi için artıran AA/DA doğrultucu, enerji depo üniteleri için ise çift yönlü AAC'ler kullanılmaktadır. Güç elektroniği devrelerinin denetiminde PI denetleyici kullanan araştırmacılar ayrıca bataryaların genellikle güç uygulamalarında sık görülen değişiklikler ile dalgalanmaları gidermede başarısız olduğunu savunmuşlardır.

Luan vd. [38] Matlab/Simulink/SimPower programında dalga enerjisi sisteminde kullanılan DG'den üretilen enerjiyi ilk olarak AA/DA doğrultucu ile DA sinyaline dönüştürdükten sonra DA/DA ARÇ ile optimum yük denetimini gerçekleştirmişlerdir. Düzenli dalga rejimini dikkate alan çalışmada PI denetleyici tipi kullanılmaktadır.

Gargov vd. [39] çalışmalarında çok fazlı hava-çekirdekli bir sabit mıknatıslı doğrusal generatörün (SMDG) modelini bilgisayar ortamında gerçekleştirmişlerdir. Düzenli dalga modelinin incelendiği çalışmada yazarlar güç elektroniği devresi olarak pasif diyot doğrultucu ve AAC kullanmışlardır. Denetim algoritması olarak ise aç-kapa denetim kullanılmaktadır.

Barnes vd. [40] SSK tip DED'de karşılaşılan güç salınımlarını düzeltmek için hızlı yanıt veren bir D-STATCOM isimli güç elektroniği cihazı önermiştir. Önerilen devrenin matematiksel analizinin ve benzetiminin yapıldığı çalışmada denetim için ise ileri-yön denetimi uygulanmıştır.

Murray vd. [41] çalışmalarında açık deniz SSK tip DED'in de görülen düzensiz güç salınımlarını gidermek için sistemin DA barasına UK ünitesi entegre etmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca UK'nın çevrim ömrü ile ilgili deneysel incelemeler de gerçekleştirmişlerdir.

Tedeschi vd. [42] yaptıkları çalışmada farklı kontrol teknikleri kullanarak düzensiz dalgaların enerji çıkarımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada güç elektroniği devrelerinden aktif 3-faz doğrultucu ve DA/AA evirici devresi kullanılmaktadır. Bu güç elektroniği devrelerinin denetiminde ise PI denetleyici tabanlı alan etki denetimi ve aktif ön-üç denetimi kullanılmaktadır.

Çolak vd. [43] dalgalardan enerji çıkarım verimliliğini artırmak ve şebekeye iletilen gücün kalitesini iyileştirmek için uzay vektör modülasyonu (UVM) denetimli üç seviyeli DA-AA evirici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Salınımlı su kolonu DED'i için gerçekleştirilen benzetim çalışması düzenli dalga durumu için incelenmiştir.

Andersen vd. [44] Wave Star DED'i için model öngörülü denetim (MÖD) ile reaktif denetimin (RD) enerji çıkarım performanslarını benzetim ortamında karşılaştırmışlardır. Generatör tarafı denetim uygulamasını içeren bu çalışma ile yazarlar MÖD kullanarak dalgalardan daha fazla güç çıkarımı elde edileceğini savunmuşlardır.

Mendonça vd. [45] DS-DED'lerde enerji dönüşüm verimliliğini üç farklı akım denetim yöntemi ile incelemektedir. Generatör tarafı denetimi yapan araştırmacılar üç-faz aktif doğrultucuyu histerisiz bant denetimi (HBD), uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (DGM) akım denetimi ve bu denetim yöntemlerinin avantajlarını içeren uzaysal histerisiz akım kaynağı denetimi kullanmışlardır. Her denetleyici tipinin akım kalitesini artırdığı ve en az akım salınımlarının uzay vektör DGM denetimi ile elde edildiği belirtilmektedir.

Farrok vd. [46] düzenli dalga modeli ile elde ettikleri gerilimi üç-faz doğrultucu ile DA sinyaline çevirdikten sonra bulanık mantık denetimli (BMD) 3-faz DA/AA eviriciyi enerjinin R-L-C yüküne aktarılmasında kullanmışlardır. Gerilim denetimi yapılan bu benzetim çalışmasında DED modellemek yerine üç-faz programlanabilir gerilim kaynağı kullanılmıştır.

Gruosso vd. [47] yaptığı çalışma tek ve dört adet DED bağlı dalga enerji sistemleri için aktif ve pasif doğrultucuların karşılaştırmasını içermektedir. Benzetim ortamında düzenli enerji modelinin dikkate alındığı çalışmada pasif doğrultucu tiplerinden köprü tipi tam dalga ve rezonans doğrultucu devreleri ile gerilim denetimli aktif doğrultucu kullanılmaktadır. Aktif doğrultucu denetiminde PI kontrolör kullanılan çalışmanın sonuçlarına göre tek DED'li sistemde pasif doğrultucularla elde edilen gerilim salınımları 250-300 V kadarken aktif denetimli doğrultucu çıkışta 100V kadar gerilim salınımları sağlamaktadır. Yazarlar ayrıca dizi şeklinde bağlanan DED'li sistemde gerilim düşümlerinin daha az olduğunu belirtmektedir.

Özkop vd. [48] bilgisayar ortamında kurdukları dalga enerji sisteminde, düzenli dalgalardan enerji üretilen bir DED modelinin pasif doğrultulmuş çıkışı ile bir aküyü paralel bağlayarak oluşturdukları DA baranın gerilimini DA/DA kıyıcı üzerinden DA motor yüklerine aktarmaktadır. Kıyıcının denetiminde dinamik çevrimli bulanık mantık tansigmoid denetleyici kullanılmıştır.

Jama vd. [49] SMDG'nin sönümlenme kuvvetini kontrol etmek için yeni bir çevrimiçi sönümleme denetim yöntemi önermektedir. Güç elektroniği devresi olarak 3-faz pasif doğrultucuya seri bağlı bir DA/DA ARÇ kullanan yazarlar bu yöntem ile dalgadan elektrik enerjisi çevrim verimliliğinin arttığını benzetim sonuçlarında göstermektedir. Ayrıca çalışmada elde edilen sonuçların yakın zamanda deneysel olarak da doğrulanacağı belirtilmektedir.

Shameem vd. [50] Matlab/Simulink ortamında batarya-güneş paneli ve dalga enerjisinden meydana gelen şebeke bağlantılı karma bir enerji sistemi kurmuşlardır. Dalga enerjisi modelinde salınımlı su kolonu DED tipi kullanılmaktadır ve DA baranın gerilimi bataryalar ile sabit tutulmuştur. Bataryanın şarj-deşarj durumu PI denetimli bir DA/DA AAÇ ile sağlanmaktadır.

Al-Mhana vd. [51] DES'lerde generatör ile yük arasına güç faktörünün iyileştirilmesini sağlamak için yön değiştirmeli seri kompensasyon kondansatörlü çevirici adını verdikleri güç elektroniği devresini önermektedirler. Benzetim sonuçları, güç çeviricisi ile önerilen simetrik çalışma oranı denetim stratejisinin güç faktörünün iyileştirilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. Yapılan bu çalışma düzgün dalga modelini içermektedir.

Müller vd. [52] Wave Dragon adı verilen DED'lerden oluşan bir dalga platformu için bilgisayar ortamında seri bağlı çok seviyeli H-köprüsü (SBCŞHK) güç elektroniği ara yüzü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Şebeke bağlantısında kullanılan SBCŞHK güç elektroniği devresinden önce 3-faz pasif doğrultucu ve DA/DA ARÇ devreleri de kullanılmaktadır. ARÇ denetiminde maksimum güç noktası izleyici algoritması ile PI denetleyici kullanan araştırmacılar, çok seviyeli H-köprüsü için ise PI denetleyici kullanmaktadır. Benzetim sonuçlarında önerilen güç elektroniği ara yüzü ile güç kalitesinin ve veriminin artırıldığı gösterilmektedir.

Cantarellas vd. [53] yüksek güç DES'lerden oluşan bir DEÇ'in şebeke bağlantısı için uygun güç sistemleri tasarımını ve denetimini araştırmaktadır. Şebeke bağlantısında kullanılan geleneksel pasif LCL filtreye alternatif olarak, pasif LCL+Trap filtre adı verilen

bir filtre topolojisi öneren yazarlar, AA/DA-DA/AA güç elektroniği devrelerini de kullanmaktadır. Çalışmada denetleyici olarak PI denetim kullanılmakta ve önerilen güç elektroniği topolojileri ile daha güvenilir ve düşük maliyetli bir güç işleme ünitesinin tasarlandığı savunulmaktadır.

Wu vd. [54] DED’de üretilen enerjiyi şebekeye aktarılabilir hale getirmek için sisteme batarya üniteleri entegre etmişlerdir. DED çıkışı için AA/DA doğrultucu, batarya sistemi için DA/DA çevirici kullanan yazarlar her iki sistemin çıkışını ortak bara da birleştirerek düzeltilen DA gerilim DA/AA evirici ile şebekeye aktarılmıştır. Bu benzetim çalışmasının güç elektroniği devrelerinin denetiminde PI denetleyici kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar: Bu kısımda DES’ler ile ilgili yapılan deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Deneysel sistemler düzenli dalga durumunu ve düzensiz dalga durumunu inceleyen çalışmalar olmak üzere iki alt başlık halinde sunulmaktadır. İncelenen çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Düzenli dalga durumunu dikkate alan çalışmalar: Özkop vd. [55] tarafından yapılan çalışmada yüksek değerli kondansatörlerden oluşan bir anahtarlama güç filtresinin denetimi ile düzenlenen dalga gücü, bir DA/DA azaltan çevirici (AZÇ) üzerinden yüke aktarılmaktadır. Düzenli dalga durumunun incelendiği makalede güç elektroniği ara yüzlerinin denetiminde çok çevrimli PI denetleyici kullanılmaktadır. Aynı yazar [56]’da yine anahtarlama güç filtresini bu kez farklı bir denetim yöntemi ile düzenli dalga rejimi için incelemiştir. Bu çalışmada önerilen güç elektroniğe devresi için denetleyici tipi olarak dinamik hatayı kullanan çok değişkenli, bulanık mantık ayarlamalı PI denetleyici kullanılmıştır.

Nie vd. [57] doğrudan sürürlü doğrusal DED emülatörünü laboratuvar ortamında kurmuşlardır. Düzenli dalga modeli ile generatörden elde ettikleri enerjiyi iki farklı AA/DA güç elektroniği topolojisi (AA/DA artıran doğrultucu ve AA/DA H-köprüsü artıran çevirici) kullanarak incelemişlerdir. Her iki devrenin sağladığı avantajların belirtildiği çalışmada denetleyici olarak PI ve tepki kuvvet denetimi gerçekleştirilmiştir.

Lu vd. [58] çalışmalarında dalga ve rüzgâr enerjisinin süreksizliğini ve belirsizliğini gidermek amacıyla bu iki enerji kaynağı ve batarya ünitesi ile birlikte bir DA mikro şebeke oluşturmuşlardır. Batarya tarafında gerektiğinde şarj olabilmesi veya DA baraya enerji aktarabilmesi için çift-yönlü DA/DA çevirici, rüzgâr ve dalga enerjisi için ise pasif 3-faz doğrultucu ve DA/DA AZÇ güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır. Hazır bir evirici

ünitesi ile AA yük beslemesi de yapılan çalışmada düzenli dalga durumu dikkate alınmıştır ve dalga tarafı çeviricinin denetiminde PI denetleyici kullanılmaktadır.

Blanco vd. [59] DS'li anahtarlama relüktans doğrusal generatörünü (ARDG) sürmek için iki farklı güç elektroniği topolojisi klasik H-köprüsü ve Miller çevirici kullanmışlardır. Deneysel ortamda üretilen düzenli dalga enerjisini işlemek için ise evirici tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Generatörden maksimum enerji çıkarımını sağlamak için faz veya reaktif kontrol adı verilen denetim algoritması uygulanan çalışmada deneysel testler döner ARG kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Vermaak vd. [60] çalışmalarında yeni bir doğrusal generatör tasarımına yer vermektedir. Düzenli deniz dalgasından üretilen enerjinin işlendiği deneysel test düzeneğinde generatörden maksimum enerji çıkarımının elde edilmesi için öngörülü denetim (ÖD) algoritması kullanılmaktadır. Hem benzetim ortamında hem de deneysel ortamda önerilen denetleyici tipinin performans değerlendirmesini yapan araştırmacılar güç elektroniği devrelerinden denetimli AA/DA doğrultucu ve tasarlanan doğrusal generatörü sürmek için DA/AA evirici kullanmaktadır.

Kazmierkowski vd. [61] çalışmalarında Wave Dragon adı verilen DED için güç elektroniği devresi olarak aktif AA/DA/AA güç elektroniği topolojisi kullanmaktadır. Düzenli dalga enerjisinin dikkate alındığı bu çalışmada UVM tabanlı güç ve tork denetimi gerçekleştirilmiştir.

Düzensiz dalga durumunu dikkate alan çalışmalar: Hazra vd. [62] küçük güçlü pedal tipi bir dalga enerji sisteminde görülen enerji düzensizliğinin UK ünitesi ve güç elektroniği devreleri ile kısa süreli giderilmesi üzerine bir deneysel çalışma yapmışlardır. DED çıkışını ilk olarak pasif doğrultucu ile DA sinyaline çeviren yazarlar daha sonra generatör akımı denetimli DA/DA ARÇ üzerinden üretilen gücü DA baraya aktarmışlardır. Güç salınımlarının giderilmesi için ise sisteme paralel bağlı UK ünitesi ve DA bara arasında çift yönlü çalışabilen çevirici tipi kullanmışlardır. Çeviricilerin denetiminde klasik PI denetleyici kullanılmış olup, denetleyici parametrelerinin nasıl ayarlandığı belirtilmemektedir. Ayrıca çalışmada sunulan çıkış geriliminin ciddi şekilde gerilim sıçramaları içerdiği görülmektedir.

Hazra vd. [63] diğer bir çalışmalarında benzetim ortamında UK ve akü ünitelerini birlikte kullanarak oluşturdukları bir karma enerji depo sistemini güç elektroniği devreleri ile DED'lerde karşılaşılan enerji salınımları gidermek için kullanmışlardır. Benzetim ortamında akü ve UK'yı birlikte kullanmanın avantajlarından bahseden yazarlar deneysel çalışmalarında sadece UK ünitesini kullanarak güç düzenlemesi gerçekleştirmişlerdir. Güç

elektronigi devrelerinden 3-faz evirici ve çift-yönlü aktif köprü tipi çevirici kullanan yazarlar denetleyici algoritması olarak PI denetleyici tercih etmişlerdir.

Boström vd. [64] rezonans doğrultucu (REZD) adı verilen ve kondansatör içeren yeni bir pasif doğrultucu tipini hem benzetim ortamında hem de deneysel ortamda test etmişlerdir. Uppsala Üniversitesinde geliştirilen doğrusal generatörlü L9 DED sisteminde denenen doğrultucu tipi klasik pasif diyot doğrultucu ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre REZD ile generatörün sönüm oranı artırılarak daha yüksek güç emilimi ve üretimi elde edilmiştir.

Cantarellas vd. [65] düzensiz dalgalardan maksimum enerji çıkarımının elde edilmesi için uyarlamalı vektör yaklaşımına dayalı yeni bir DED kontrol yöntemi önermektedir. Önerilen vektörel yaklaşım ile maksimum güç çıkarımı sağlanırken ayrıca ani güç dalgalanmalarının azaltıldığı da deneysel sonuçlar ile gösterilmektedir. Çalışmada güç elektronigi ara yüzü olarak AA/DA-DA/AA aktif güç çeviricisi ve eviricisi kullanılmaktadır.

Boström vd. [66] DS-DED'de üretilen düzensiz AA gücün doğrultulması ve filtrelenmesi üzerine yapılan benzetim ve deneysel çalışmaları incelemektedir. Deneysel testlerin gerçek bir açık deniz DED'inde gerçekleştirildiği çalışmada doğrultucu elemanı olarak 3-faz pasif diyot doğrultucu, filtreleme elemanı olarak ise UK üniteleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada herhangi bir denetim yönteminden bahsedilmemektedir.

Rahm vd. [67] Lysekil projesi kapsamında geliştirilen doğrudan sürürlü ve birbirine bağlı DED'lerde üretilen değişken elektrik enerjisinde salınımları azaltmak için her bir DED'in çıkışı pasif doğrultulmuş ve sonra elde edilen gerilim ortak DA barada toplanmıştır. Daha sonra ise DA gerilim PID denetimli bir evirici yardımıyla AA sinyaline dönüştürülüp, trafo ile yükseltildikten sonra kıyıda yer alan direnç yüküne iletilmektedir.

Sonuç olarak hem benzetim hem de deneysel ortamda düzenli ve düzensiz dalga enerjisi ile yapılan çalışmalar incelendiğinde güç elektronigi devrelerinden; aktif/pasif-AA/DA doğrultucu devreleri, AA/DA artıran doğrultucu, STATCOM cihazları, AA/DA H-köprüsü artıran doğrultucu, tek faz-üç faz DA/AA evirici devreleri, DA/DA artıran, azaltan ve artıran-azaltan çeviriciler, farklı tip denetimli-denetimsiz filtre ve benzeri devreler kullanılmaktadır. Adı geçen devreler maliyet, güvenilirlik, verim ve tasarım olarak birbirinden ayrılmaktadır. [26]'da verilen bilgilere göre aktif-pasif AA/DA doğrultucu ve DA/AA evirici devreleri DES'lerde en çok kullanılan güç elektronigi devreleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca dalga enerji sistemlerinin çok değişkenli güç yapısı

nedeniyle, akü ve ultra-kondansatörler gibi enerji depo üniteleri ve rüzgâr/güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla birlikte kullanımını içeren çalışmalarda mevcuttur.

Dalga enerjisini içeren yayınlarda elde edilen sonuçlar benzetim, deneysel ve hem benzetim hem de deneysel olarak doğrulanmaktadır. DES'lerin kurulumunun zor ve pahalı olması nedeniyle yapılan çalışmaların büyük bir kısmının (%70) benzetim çalışması olduğu görülmektedir [26]. Sadece düzenli dalga modelini içeren benzetim ve deneysel çalışmalarda bulunmaktadır. Dalgaların karakteristik yapısı gereği düzensiz olması nedeniyle sadece düzenli dalga modelini içeren çalışmaların, gerçek deniz durumunda ne kadar başarılı olacağı bilinmemektedir.

DES'lerde kullanılan denetleyici tiplerine bakılacak olunursa bu tip çalışmalar genelde dalgalardan enerji çıkarımını artırarak DED verimin artırılmasını yöneliktir. [26]'da en çok tercih edilen ilk beş denetleyici tipi; faz denetimi, kilitleme denetimi, PI denetleyici, optimal denetim ve öngörülü denetim olarak bildirilmiştir. Bu denetleyicilerin dışında PID denetleyici, pasif yük denetimi, kayan tip denetimi, uyarlamalı bulanık PI denetim, BMD, gürbüz denetim, sinir ağı denetimi, doğrudan tork denetimi, seri bağlı P-PI denetim, aç-kapa denetim, MÖD, reaktif denetim, karmaşık eşlenik denetimi, UVM ve çok çevrimli PI denetleyici çeşitleri de hem generatör tarafı hem de şebeke tarafı uygulamaları için kullanılan diğer denetim yöntemleridir [8, 26, 68].

Denetim sistemlerinde kullanılan denetleyici parametrelerinin optimum ayarlanması istenilen sistem performanslarının sağlanması açısından oldukça önemlidir. Dalga enerji sistemleri ile ilgili incelenen yayınlarda güç elektroniği ara yüzlerinin (GEAY) denetiminde kullanılan denetleyici parametrelerinin çoğunun nasıl ayarlandığı bildirilmemektedir. Ayrıca son zamanlarda oldukça dikkat çeken denetim yöntemlerinden kesir dereceli PID (KDPID) denetleyici performansının DES'lerde kullanılan GEAY denetimine literatür araştırmasında rastlanmamıştır.

1.3. Tezin Kapsamı ve Organizasyon Şeması

Bu tez kapsamında kıyı konumlu DS'li DED sistemlerinde düzensiz dalga etkileri nedeniyle üretilen elektrik gücü üzerindeki salınımların ve dengesizliklerin giderilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda DA/DA seri bağlı senkron artıran-azaltan çevirici (SBSAAÇ) güç elektroniği devresinin tasarımı ve denetimi gerçekleştirilmiştir. Kurulan enerji sisteminin sürdürülebilirliğini artırmak ve düzensiz dalgaların ortaya

çıkardığı gerilim düşümlerini gidermek için DA baraya güneş panelleri ile şarj edilen bir UK ünitesi entegre edilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen SBSAAÇ devresinin denetiminde klasik PID denetleyici, KDPID denetleyici ve BMD kullanılmıştır. Önerilen denetleyicilerden maksimum performansın alınabilmesi için hatanın enerjisi tabanlı bir amaç fonksiyonu kullanan çiçek tozlaşması algoritmasına (ÇTA) ve parçacık sürü optimizasyonu algoritmasına (PSO) denetleyici tasarımında yer verilmiştir. Ayrıca güç elektroniği devrelerinin, DED’de üretilen enerjinin ve UK ünitesinin modelleme başarımı da incelenmiştir. Hem benzetim hem de deneysel olarak kurulan sistemin etkinliği farklı elektriksel yük ve deniz durumları göz önüne alınarak test edilmiştir.

Tezin ilk bölümünde verilen Genel Bilgiler ’den sonra Yapılan Çalışmalar başlığı altında dalga modelleri ve enerji spektrumları, dalga enerji dönüştürücü emülatörünün (DEDE) tasarımı-analizi-modellenmesi, tez kapsamında kullanılan güç elektroniği, yalıtım ve ölçüm devrelerinin tasarımı-modellenmesi, UK ünitesinin analizi-modellenmesi, kontrol ünitesinin tanıtımı, yükler, kullanılan denetleyici tipleri ve optimizasyon algoritması yer almaktadır. Daha sonra Bulgular başlığı altında farklı deniz ve yük durumları için elde edilen benzetim ve deney sonuçları sunulmaktadır. Sonuç kısmında elde edilen modelleme başarımları, tez kapsamında kullanılan optimizasyon algoritması ile denetleyici performansları yorumlanmıştır. Son kısımda ise tez kapsamında ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara bazı öneriler verilmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

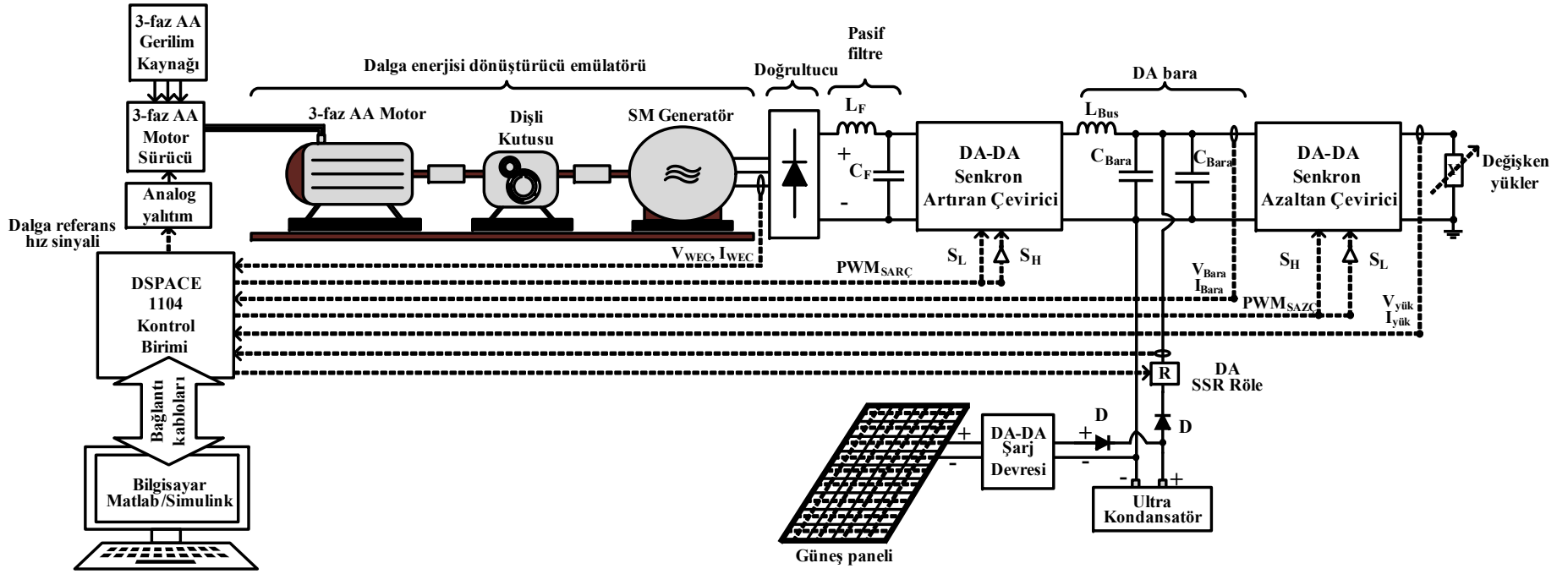
2.1. Giriş

Bu bölümde dalga enerji sistemi içerisinde yer alan alt başlıklara yer verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere dalga enerji sistemi aşağıda verilen alt sistemlerden meydana gelmektedir.

1. Dalga enerjisi dönüşüm sistemi
2. Güç elektroniği devreleri
3. Ultra kondansatör enerji ünitesi
4. Denetleyici yapıları
5. Optimizasyon algoritması
6. Güneş enerji sistemi
7. Yükler

Dalga enerji dönüştürücü sistemi sabit mıknatıslı senkron generatör, dişli sistemi, 3-faz motor ve sürücüsünden meydana gelmektedir. Bu ekipmanlar bir araya getirilerek düzenli ve düzensiz deniz dalgası durumunda üretilecek 3-faz gerilim için dalga enerji emülatörü tasarlanmıştır. Gerçek zamanlı üretilen bu enerji, benzetim ortamında da üretilerek sistemin ana beslemesi olarak dalga enerjisi kullanılmıştır.

Güç elektroniği başlığında ise DES'de üretilen düzenli ve düzensiz enerjinin kompanse edilerek yüke aktarılmasında kullanılan DA-DA seri bağlı SAZÇ-SARÇ devreleri ile 3-pasif doğrultucuya yer verilmektedir. Tez kapsamında deniz kıyı şeridinde vuran küçük güçlü dalgalardan elde edilen enerjinin kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu enerji seviyesi küçük genlikli olduğu için sisteme ayrıca güneş panelleri entegre edilmiştir. Güneş panelleri, UK enerji ünitesinin DA-DA hazır bir çevirici yardımıyla şarj edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu sayede tasarlanan sistemin sürdürülebilirliği artırılmıştır. Güneş enerjisi ile ilgili birçok çalışmaya literatürde yer verildiği için, tez kapsamında detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Güneş enerjisi tez kapsamında sadece enerji destek birimi olarak kullanılmaktadır. Kullanılan denetleyici yöntemleri ve optimizasyon algoritmaları da ayrıca bu başlığın altında sunulmaktadır.



Şekil 1. Tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen dalga enerjisi dönüşüm sistemi

2.2. Dalga Enerji Dönüştürücü Sistemi

Deniz dalgası genel olarak düzenli ve düzensiz karakteristikte olmak üzere ikiye ayrılır. Bu başlık altında düzenli ve düzensiz dalga karakteristikleri ve bu karakteristiklere ait tanımlar, dalga enerji spektrum çeşitleri, tez kapsamında kullanılan generatörün elektriksel ve ideal modelleri sunulmaktadır.

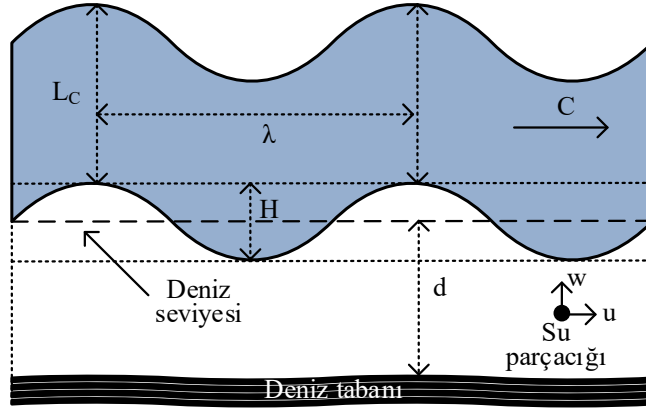
2.2.1. Dalga Modeli

Dalga oluşumları üç çeşit olay sonucunda meydana gelmektedir. Bu dalga tipleri rüzgâr temelli dalgalar, deprem oluşumlu dalgalar ve gel-git oluşumuna bağlı dalgalardır. Deprem oluşumlu dalgalar, deniz tabanında depremlere bağlı meydana gelen kaymalar sonucunda ortaya çıkan dalgalardır. Gel-git olayı sonucunda ise ortalama deniz seviyesinde meydana gelen değişimler dalga oluşumuna neden olmaktadır. Tez kapsamında ise rüzgâr oluşumlu dalgalar incelenmektedir.

Rüzgârın deniz üzerinde esmesi sonucunda deniz yüzeyinde meydana gelen hareketlenmeler, deniz dalgasını oluşturur ve bu tip dalgalara rüzgâr oluşumlu deniz dalgaları adı verilir. Rüzgâr oluşumlu bir dalganın büyüklüğü, deniz üzerinde esen rüzgârın hızı, esme süresi ve feç uzunluğuna bağlıdır [69]. Feç, dalga tahmin modellerinde sıkça kullanılan bir terimdir ve rüzgâr yönünde önemli bir değişiklik olmadan, rüzgârda var olan enerjinin dalga oluşturmak üzere denize aktarılması için kullanılan kesintisiz mesafe anlamına gelmektedir [69].

2.2.1.1. Düzenli Deniz Dalgası

Düzenli deniz dalgası tek bir frekansa ve genliğe sahip bir sinüs dalgası gibi modellenebilir. Bu modelin karakteristiklerine ait gösterim Şekil 2’de verilmektedir [69].



Şekil 2. Düzenli dalga karakteristiği

Şekil 2’de, λ dalganın uzunluğunu (m), H dalganın yüksekliğini (m), d su derinliğini (m), L_c dalga tepeleri arasındaki uzunluğu (m) ve C dalga hızını (m/s), u ve w sıra ile su parçacığının yatay ve dikey hız bileşenlerini ifade etmektedir. Bir periyotta (T), λ uzunluğu kadar yol alan bir dalganın hızı matematiksel olarak denklem (1)’de verilen eşitlik kullanılarak hesaplanır.

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

Hareket halindeki su parçacığı hızının yatay ve dikey birleşenleri ise aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir [70].

$$u = \frac{\pi H}{T} \cos(kx - \sigma t) \quad (2)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \sin(kx - \sigma t) \quad (3)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde k açısal dalga numarasını, σ dalga açısal frekansını ve x yatay koordinatı sembolize etmektedir. Bu parametrelere ait eşitlikler sıra ile denklem (4) ve (5)’te verilmektedir. Açısal frekansın negatif değer alması dalganın soldan sağa doğru hareket ettiği, pozitif değer alması da sağdan sola doğru hareket ettiği anlamına gelmektedir.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

$$\sigma = 2\pi f_d \quad (5)$$

Denklem (2) ve (4)'te verilen eşitlikler, gelecek bölümde incelenen düzenli ve düzensiz dalgadan üretilen 3-faz enerjinin modellenmesinde kullanılmaktadır.

2.2.1.2. Düzensiz Deniz Dalgası

Düzenli deniz dalgası her ne kadar birçok çalışmada yer alsada da gerçek deniz dalgaları düzensiz ve rastgele karakteristik yapıya sahiptir. Düzensiz deniz dalgası, farklı genlik ve frekansa sahip birden çok düzenli deniz dalgasının süper pozisyonu ile modellenebilir. Bu yöntem ile modellenen düzensiz dalgalar okyanus mühendisliğinde temel bir kavram olarak kabul edilmektedir. Gerçek deniz dalgalarının, gemi ve kıyı yapıları üzerindeki etkilerinin tahmininde bu modelin doğruluğu kanıtlanmıştır [71].

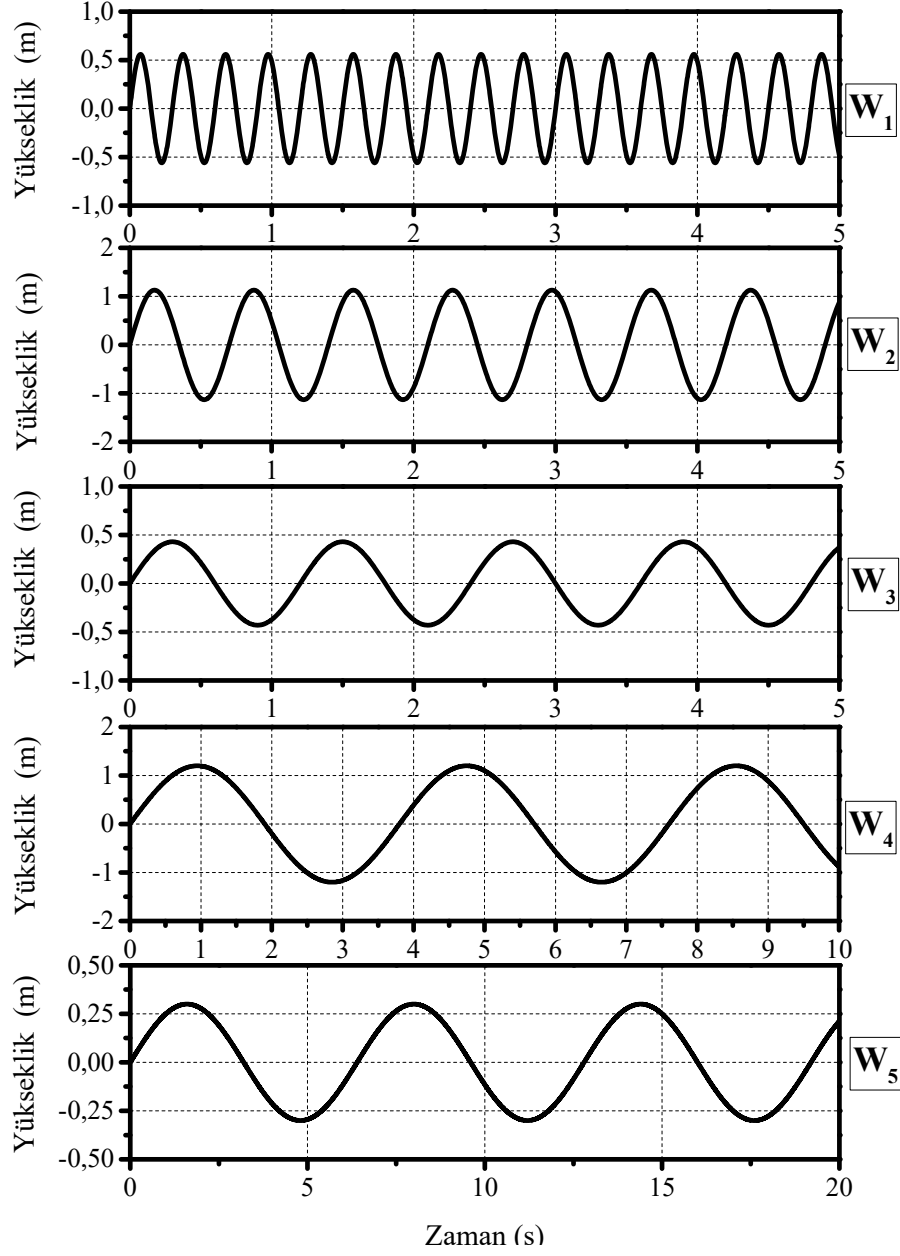
Şekil 3'te farklı genlik ve frekansa sahip beş adet sinüs dalgası (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5) verilmektedir. Bu dalgalara ait genlik ve frekans bilgisi Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 4. (W_{1-5}) dalgalarına ait genlik ve frekans bilgileri

| | W_1 | W_2 | W_3 | W_4 | W_5 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H (m) | 0.56 | 1.13 | 0.43 | 1.20 | 0.30 |
| F (Hz) | 3.333 | 1.428 | 0.833 | 0.263 | 0.156 |

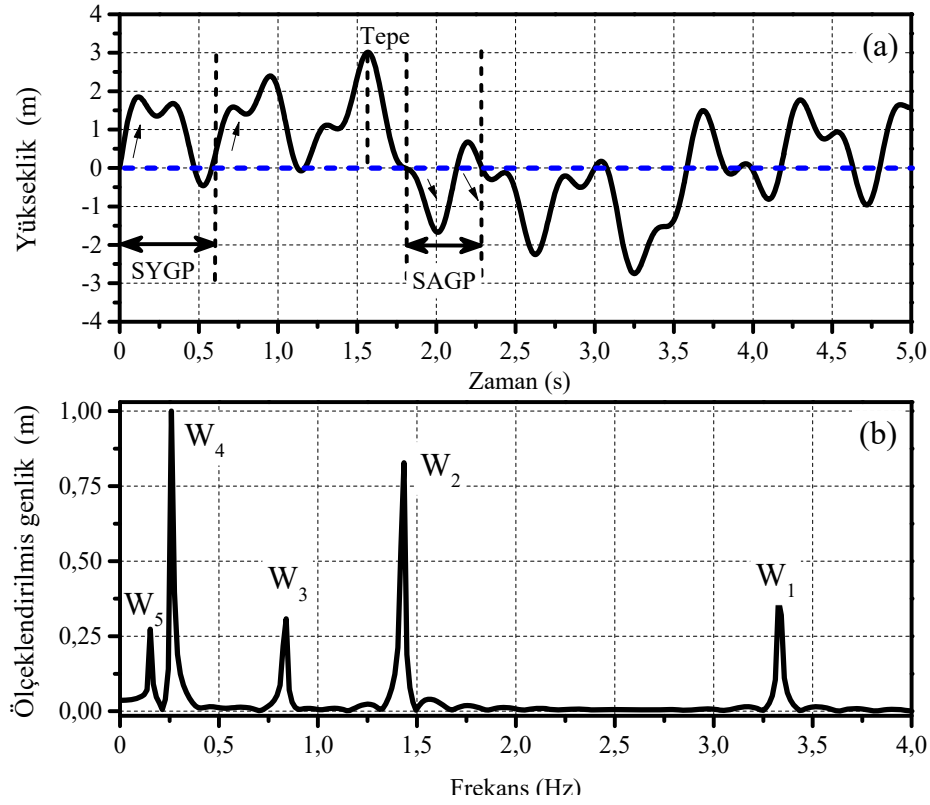
Bu sinyallerin toplanması ile elde edilen düzensiz dalga modeli ve bu dalga modelinin Fourier dönüşüm grafiği Şekil 4'te verilmektedir.

Şekil 4 (a)'da görüldüğü üzere düzensiz dalga karakteristiği farklı genlik ve periyotta birden fazla düzenli dalganın süper pozisyonu ile elde edilmiştir. Şekilde kullanılan kısaltmalardan SYGP, sıfır yukarı geçiş periyodunu, SAGP ise sıfır aşağı geçiş periyodunu ifade etmek için kullanılmıştır. Düzensiz dalgayı meydana getiren düzenli dalgaların frekans değerleri ise Şekil 4 (b)'de verilen Fourier analizinde açıkça görülmektedir.



Şekil 3. Farklı genlik ve frekanslardaki düzenli dalga karakteristikleri

Tez kapsamında bu yöntem ile üretilen düzenli ve düzensiz karakteristikteki gerilim sinyali, 3-faz AA sürücünün analog girişine uygulanarak, generatöre bağlı 3-faz motorun gerilim/frekans (V/f) kontrolü yapılmıştır. Bu sayede gerçek düzensiz deniz ortamında üretilebilecek olan enerji laboratuvar ortamında üretilmiştir. Düzensiz enerjinin üretim aşamasına ait detaylı bilgi gelecek bölümde yer alan dalga enerji dönüştürücüsü emulatörü (DEDE) başlığı altında sunulmuştur.



Şekil 4. Düzensiz dalga karakteristiği (a) ve Fourier analizi (b)

2.2.2. Dalga Enerji Spektrumları

Deniz alanlarındaki ölçüm istasyonlarının yetersizliği nedeniyle, rüzgâr oluşumlu deniz dalgalarının karakteristikleri, çoğunluğunu matematiksel analiz yöntemlerinin oluşturduğu farklı tip metotlar ile tahmin edilmektedir [72]. Bu metotlardan biri parametrik (deneysel) kestirim yöntemi, diğeri ise model tabanlı nümerik analiz yöntemidir.

2.2.2.1. Düzensiz Deniz Dalgası

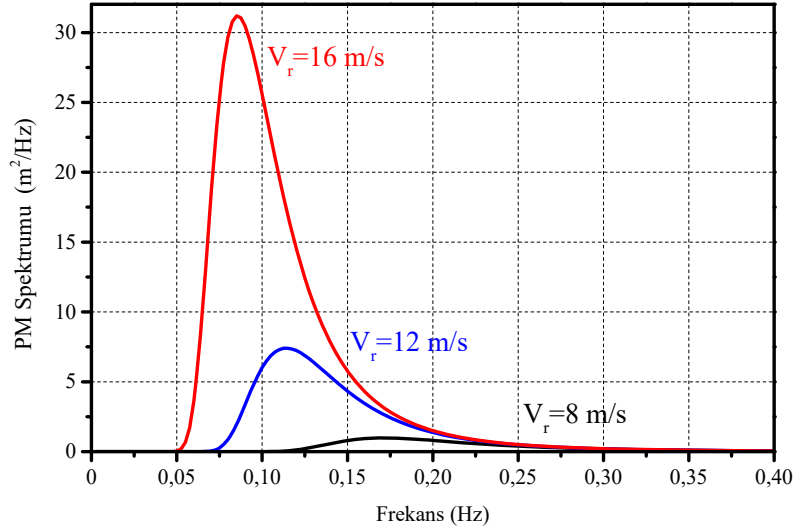
Pierson-Moskowitz (PM) [73] ve JONSWAP [74] modelleri bu yönetime ait çokça tercih edilen model çeşitleridir [75]. PM dalga spektral analiz yöntemine ait matematiksel eşitlikler aşağıda verilmektedir.

$$S(f)_{PM} = \alpha \frac{g^2}{f^5 (2\pi)^4} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f_m}{f} \right)^4 \right] \quad (6)$$

$$f_m = 0.1396 \frac{g}{V_r} \quad (7)$$

Yukarıda verilen eşitlikte, sabit sayı $\alpha=0.0081$, yer çekimi ivmesi $g=9.81 \text{ m/s}^2$, f dalganın frekansı, f_m enerji yoğunluğunun maksimum frekansı ve V_r deniz seviyesinin 19.5 metre üstünde ölçülen rüzgâr hızı (genel olarak 10-21 m/s) olarak sembolize edilmektedir.

Bu modelden üretilen bazı tipik dalga spektrumları Şekil 5'te verilmektedir. Dalga enerjisinin, dalga periyodu (T) ile yaklaşık olarak eksponansiyel olarak arttığı gözlenmektedir. Ayrıca rüzgâr hızındaki artışın hem dalga yüksekliği hem de periyodunu artırdığı da net bir şekilde grafikten görülmektedir.



Şekil 5. Farklı rüzgâr hızlarında Pierson-Moskowitz dalga spektrumu yanıtları

Deneysel yöntemler açık denizler ve durgun rüzgârlar için iyi bir başarımlar sağlasa da geçici rüzgâr durumları ve kısıtlamaları için yetersiz kalmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşımlar sadece belirgin dalga yüksekliği ve ortalama dalga periyodu için veriler sağlamaktadır [76].

2.2.2.2. Sayısal Model Tabanlı Dalga Enerji Spektrumları

Günümüzde tercih edilen diğer bir dalga kestirim yöntemi sayısal modellerdir. Sayısal modeller (Mike21 [77], Wavewatch [78], SWAN [79] vb.), deneysel parametrik modellerden farklı olarak deniz durumu ile ilgili daha çok veri (dağılım-yön-güç bilgileri) sağlayabilmektedir.

3. nesil bir spektral dalga modeli olan SWAN (Simulating Waves Nearshore) dalga modelinin daha çok kıyı ve kıyılara yakın olan deniz alanları için başarımı yüksektir ve aşağıda verilen temel hareket-denge eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (8)$$

Yukarıda verilen eşitlik görüldüğü üzere 6 adet terimden oluşmaktadır. $N(\sigma, \theta; x, y, t)$ hareket yoğunluğu, sırası ile rölatif dalga frekansı (σ), dalga yönü (θ), yatay koordinat (x), dikey koordinat (y) ve zamanın (t) bir fonksiyonudur [80]. İlk terim, hareket yoğunluğunun zaman göre yerel değişim oranı, ikinci ve üçüncü terim c_x ve c_y hızları ile (x,y) uzayında yayılma hareketini, dördüncü terim, derinlik ve akıntılarda meydana gelen değişikliklerin neden olduğu rölatif frekanstaki kaymaları (c_σ yayılma hızı ile σ uzayında), son terim ise derinlik ve akım bazlı kırılmayı (c_θ yayılma hızı ile θ uzayında) temsil etmektedir [80]. Eşitliğin sağında yer alan S ifadesi ise dalganın ortaya çıkışı, kayboluşu ve doğrusal olmayan dalga-dalga etkileşimlerini ifade etmektedir [80].

Dalga enerji modellerinin sonuçlarından elde edilen sıfır-yukarı geçiş periyodu (T_e) ve belirgin dalga yüksekliği (H_s) verileri aşağıda verilen dalga gücü eşitliği formülünde kullanılmaktadır [81].

$$P(kW / m) = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (9)$$

Yukarıda verilen eşitlikte ρ , su yoğunluğunu ($\rho(\text{Karadeniz})=1015 \text{ kg/m}^3$ [82]) ve g , yer çekimi ivmesini ifade etmektedir. Bilinen değerlerin yerine koyulması ile elde edilen sadeleştirilmiş güç denklemi (10)'da verilmektedir.

$$P(kW / m) = 0.486H_s^2T_e \quad (10)$$

Araştırmacılar genellikle gözlemlenen dalga yüksekliğinin en yüksek üçte birinin ortalama dalga yüksekliğini, dalga boyu olarak karakterize eder. Bu istatistiksel ortalama belirgin dalga yüksekliği olarak ifade edilir ve $H_{1/3}$ veya H_s sembolleri ile ifade edilir. Belirgin dalga yüksekliği aşağıda verilen formül ile hesaplanabilir.

$$H_{\frac{1}{3}} = \frac{3}{n} \sum_{k=1}^{n/3} H_k \quad (11)$$

Yukarıda verilen eşitlikte n, kaydedilmiş dalga yükseklik verilerinin sayısını ifade etmektedir.

2.2.3. Generatör Modeli

Bu başlık altında sabit mıknatıslı doğrusal generatörün (SMDG) ideal ve elektriksel modelleri sunulmaktadır.

2.2.3.1. SMDG'nin İdeal Modeli

Tez kapsamında SMDG'nin ideal modeli için [83]'te verilen matematiksel eşitlikler kullanılmıştır. [83]'de SMDG'nin matematiksel modeli çıkarılarak, farklı yük altında elde edilen sonuçlar deneysel olarak doğrulanmıştır. Matematiksel denklemler ile karakterize edilen 3-faz düzenli-düzensiz gerilim benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere Matlab/Simulink ortamında modellenmiştir. Tasarımda stator ile dikey hareket eden translator arasında kalan aktif bölge dikkate alınmamıştır.

Doğrusal bir jeneratörde, manyetik akı (Φ) translator üzerinde yer alan sabit mıknatıslar tarafından üretilmektedir. Sabit mıknatıslarda indüklenen bu akının sinüzoidal bir yapıya sahip olduğu düşünülebilir. Bu durumda manyetik akı eşitliği aşağıda verilen denklemle ifade edilebilir [83].

$$\Phi = \Phi_0 \sin(kx + \theta) \quad (12)$$

Yukarıda verilen eşitlikte sıra ile (Φ_0) manyetik akının genliği, (k) dalga numarası ($k=2\pi/\lambda$), (x) translator mesafesi ve (θ) faz kayması olarak sembolize edilmiştir.

Manyetik akının zamana göre değişimi ($d\Phi/dt$), translator mesafesinin zamana göre yer değişimine (dx/dt) bağlıdır. Dolayısıyla akının değişimi (13)'te gösterildiği gibi yazılabilir [83].

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{2\pi}{\lambda} \Phi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \theta\right) \frac{dx}{dt} \quad (13)$$

Faraday yasasına göre (N) sarımlı bir bobinde indüklenen gerilimin ifadesi, akının zamana göre değişiminin bir fonksiyonu olarak (14)'te verilen eşitlik kullanılarak ifade edilebilir.

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (14)$$

(13)'te verilen eşitlik, (14)'te yerine koyulursa, SMDG'de indüklenen gerilime ait matematiksel ifade aşağıda verilen eşitlik ile elde edilmektedir [83].

$$V = -\frac{2\pi}{\lambda} N \Phi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \theta\right) \frac{dx}{dt} \quad (15)$$

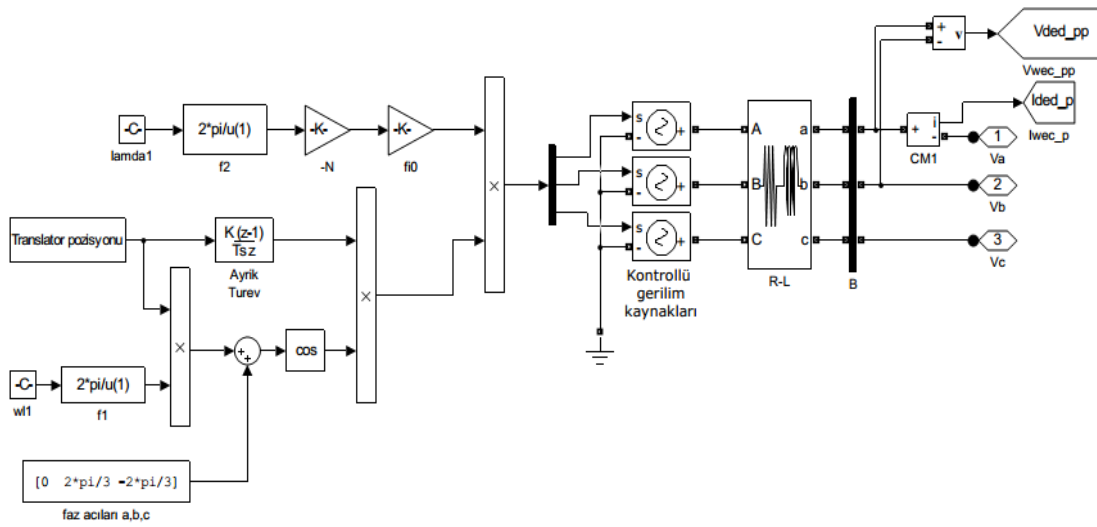
Sonuç olarak 3-faz bir generatör için faz kaymalarında ($\theta=[0 \ 2\pi/3 \ -2\pi/3]$) dikkate alındığı 3-faz gerilim eşitliği aşağıda verilmektedir.

$$V_a = -\frac{2\pi}{\lambda} N \Phi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right) \frac{dx}{dt} \quad (16)$$

$$V_b = -\frac{2\pi}{\lambda} N \Phi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{2\pi}{3}\right) \frac{dx}{dt} \quad (17)$$

$$V_c = -\frac{2\pi}{\lambda} N\Phi_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{3}\right) \frac{dx}{dt} \quad (18)$$

Dalga enerji dönüştürücüsünde indüklenen 3-faz düzenli ve düzensiz gerilim yukarıda verilen eşitlikler yardımıyla benzetim ortamında modellenmiştir. Modele ait Matlab/Simulink gösterimi Şekil 6'da verilmektedir. Gelecek başlıklarda benzetim ortamında elde edilen sonuçlar, deneysel düzenekten elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak tartışılmaktadır.



Şekil 6. DED benzetim modeli

2.2.3.2. SMDG'nin Dinamik Modeli

SMDG mekanik olarak doğrusal hareket yapsa da, elektriksel eşdeğer devresi sabit mıknatıslı senkron generatör (SMSG) ile hemen hemen aynıdır [84]. Aradaki en temel fark rotorun hareketidir. SMSG'de döner hareket yapan rotor varken, SMDG'de rotor yerine doğrusal hareket eden translatör vardır. Döner bir makinada mekanik açı, açısal hıza bağlı iken, doğrusal jeneratörde mekanik açı, doğrusal hıza bağlıdır [85]. Ayrıca, tork ve kuvvet eşitliklerinde bazı farklılıklar vardır. Generatöre ait dinamik dq-eksen eşitlikleri aşağıda verilmektedir [86].

$$\frac{d\lambda_{sd}}{dt} = V_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_m \lambda_{sq} \quad (19)$$

$$\frac{d\lambda_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_m \lambda_{sd} \quad (20)$$

$$\lambda_{sq} = L_s i_{sq} \quad (21)$$

$$\lambda_{sd} = L_s i_{sd} + \lambda_{SM} \quad (22)$$

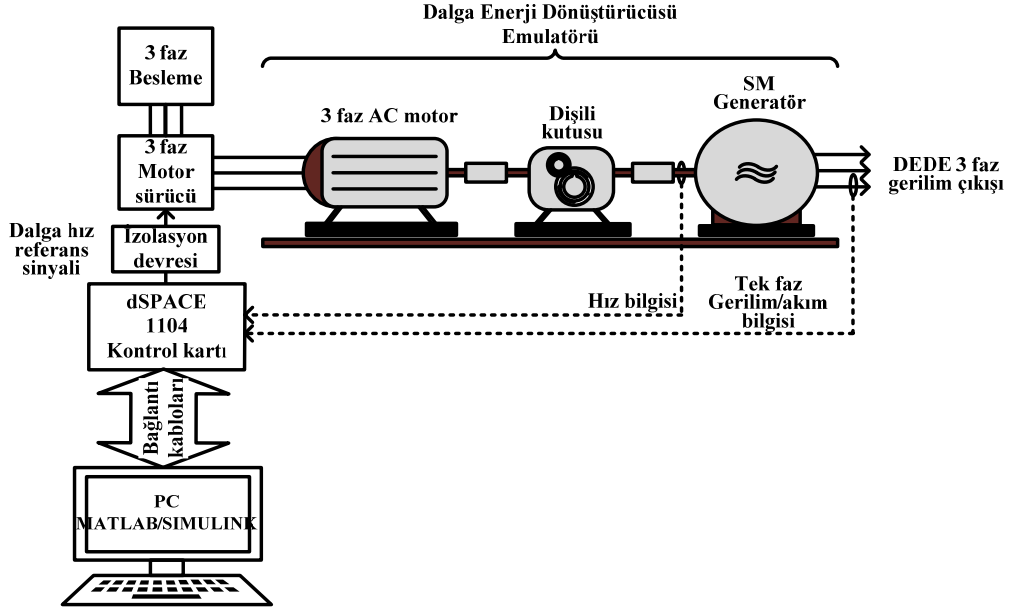
Yukarıda verilen eşitliklerde, V_{sd} ve i_{sd} d-eksen gerilimini ve akımını, V_{sq} ve i_{sq} q-eksen gerilimini ve akımını, R_s sargı direnci, λ_{SM} sabit mıknatıslar tarafından üretilen akıyı, ω_m elektriksel açı frekansını sembolize etmektedir. (21) ve (22)'de verilen eşitlikler, (19) ve (20)'de yerlerine koyulursa, (dq)-eksen gerilimleri aşağıda verilen eşitlikler ile ifade edilebilir.

$$\frac{d(L_s i_{sd} + \lambda_{SM})}{dt} = V_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_m L_s i_{sq} \quad (23)$$

$$L_s \frac{di_{sq}}{dt} = V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_m L_s i_{sd} \quad (24)$$

2.2.4. Dalga Enerji Dönüştürücüsü Emülatörü

Düzenli ve Düzensiz dalgaların, jeneratörde indüklediği gerilim karakteristiğini verecek olan dalga enerji dönüştürücü emülatörünün (DEDE) deneysel kurulumu laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de şematik gösterimi verilen DEDE bir adet 3 faz AA motor, hız düşürücü olarak kullanılacak olan dişli kutusu, sabit mıknatıslı generatör (SMG), 3 faz motor sürücü kartı, kontrol ünitesi, kontrol ünitesi elektriksel yalıtım devresi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Emülatörde kullanılan 3 faz AA motorun, sabit mıknatıslı generatörün ve dişli çarkın katalog bilgileri Ek'te verilmektedir.



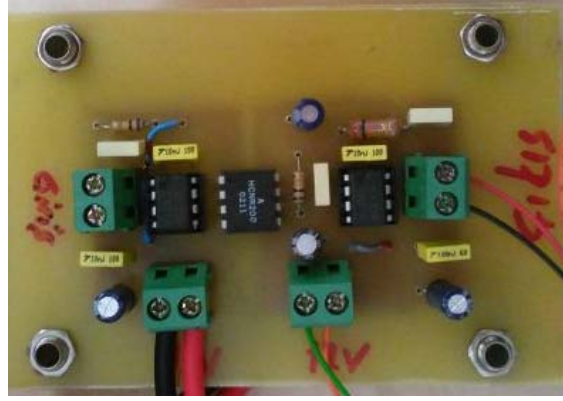
Şekil 7. Laboratuvar ortamında kurulan DEDE şematik gösterimi

Bilgisayar ortamında oluşturulan dalga hız referans sinyali (DHRS) ile 3 faz AA motor sürülerek, gerçek deniz dalgasının ürettiği elektriksel enerji laboratuvar ortamında üretilmektedir. Elde edilen düzensiz AA gerilim daha sonra 3 faz pasif doğrultucu ile doğrultulup, L-C filtreden geçirildikten DA-DA çeviriciler ile işlenecek olan düzenli ve düzensiz DA gerilim elde edilecektir.

3 faz AA motoru istenilen referans hızda sürmek için 4 kW'lık bir güce sahip motor sürücü kullanılmıştır. Motor sürücünün güç değeri, motorun anlık akım sıçramalarının karşılanması için motorun gücünün iki katından daha yüksek değerde seçilmiştir.

Sürücü üzerinde yer alan AI (analog giriş)-GND (toprak) bağlantı uçlarına kontrol ünitesinde üretilen DHRS uygulanarak, farklı frekans ve genliklerde 3 faz gerilim elde edilmektedir. Bu işlemin yapılması için sürücünün üst frekans ve alt frekans limitleri ile çalışma modu dışardan kontrol edilebilecek şekilde ayarlanmıştır.

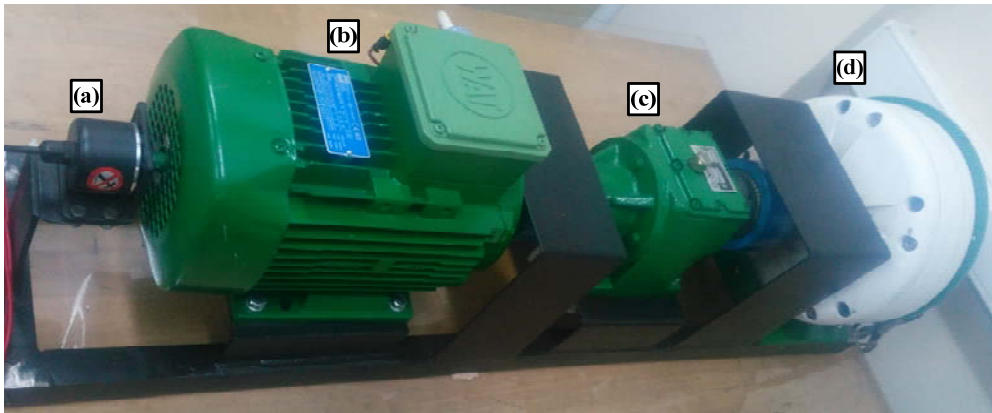
DHRS, sürücü sisteme analog yalıtım devresi üzerinden bağlanmıştır. Analog izolatör devresi HCNR200 entegresi, 2 adet LM358 işlemsel yükselteç ve pasif devre elemanlarından meydana gelmektedir. Analog yalıtım devresi 0-10V giriş gerilimi aralığını izole edecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarımı ve testleri yapılan devrenin deneysel devre gösterimi şekil 8'de, şematik ve baskı devre gösterimi ise Ek kısmında sunulmaktadır.



Şekil 8. Analog yalıtım devresi

Bilgisayar ortamında üretilen düzenli ve düzensiz dalga karakteristiği sinyali, analog yalıtım devresi üzerinden motor sürücüyü iletilmektedir. Motor sürücü frekans (f)/gerilim (V) kontrolü yaparak, dalga enerji türbininde görülen dalga hızı ve momentini generatöre uygulamaktadır.

Tezde, kıyıya vuran düşük hızlı dalgalar temel alındığı için dişli kutusu hız düşürücü görevi görmektedir. Tez kapsamında kullanılan generatör yenilenebilir enerji uygulamalarına uygun ve düşük dönüş hızlarında bile yüksek güç üretilen bir generatör tipidir. Farklı yönlerde ve büyüklüklerdeki jeneratör milinin hareketi sayesinde, farklı frekans ve genlik değerlerinde 3 faz AA gerilim elde edilmektedir. Bu tez çalışmasında hem düzenli dalga modeli hem de düzensiz dalga modeli ile üretilen enerjinin işlenmesi gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan DEDE mekanik kısmı Şekil 9’da verilmektedir.



Şekil 9. DEDE mekanik kısım, (a) enkoder, (b) 3-faz motor, (c) dişli çark, (d) SMSG

2.2.4.1. SMSG'nin Gerilim-Akım İlişkisinin İncelenmesi

DEDE tasarımında kullanılan SMSG ile yapılan elektriksel test sonuçları Tablo 5'te verilmektedir. SMSG'nin mili farklı hız değerlerinde döndürülerek, elde edilen 3 faz gerilim pasif doğrultucu kullanılarak DA gerilime dönüştürülmektedir. Daha sonra doğrultulmuş gerilim-akım değerleri iki farklı direnç yükü ve sisteme yük bağlı değilken gözlenmektedir. Tabloda bilgisayar ortamında üretilen ve sürücü sisteme uygulanan hız referans sinyali de (HRS) gösterilmektedir. Elektriksel analiz yapılırken aynı zamanda DEDE sistemine ait hız bilgilerinin de incelemesi yapılmıştır. Tablo 6'da farklı yük altında ve boşta motor tarafı hız bilgisi (MTHB), generatör tarafı hız bilgisi (GTHB) ve motor sürücü ekranından okunan hız referans sinyaline karşılık gelen frekans değerleri verilmektedir.

Tablo 5'ten görüldüğü üzere 3 faz motor sürücüyeye uygulanan gerilim arttığında, motorun dönüş hızı da artmaktadır ve buna bağlı olarak generatörde indüklenen gerilimde artmaktadır. DEDE sistem çıkışına yük bağlı değilken jeneratörden akım çekilmediği için gerilim değerleri, yükün bağlı olduğu duruma göre daha fazla elde edilmiştir. Sistem çıkışına yük bağlandığında ise gerilim değerinde 1-2 voltluk düşümler gözlenmektedir.

Tablo 5'te verilen yük durumlarında motora ve generatöre ait hız bilgileri ile sürücüyeye ait frekans değeri Tablo 6'da gösterilmektedir. Yük değeri azaltıldığında yani generatörden daha fazla akım çekilmek istendiğinde beklenildiği üzere hızda düşüş görülmektedir. Fakat yükün iki kat azaltıldığı durumda meydana gelen hız ve gerilim düşümlerinin çok küçük değerlerde olması kullanılan generatör tipinin düşük hızlarda etkin bir şekilde çalıştığının göstergesi olarak kabul edilebilir.

2.2.4.2. Dalga Enerji Dönüştürücüsünün Modelleme Başarımı

Bu başlık altında deneysel olarak üretilen 3-faz düzenli ve düzensiz gerilim, benzetim çalışmalarında kullanılan ve generatör modeli kısmında verilen ideal model sonuçları ile karşılaştırılmaktadır.

Laboratuvar ortamında dalga enerji türbini karakteristiğini emüle etmek için kurulan sistem hem düzenli dalga modeli hem de düzensiz dalga modeli için irdelenmiştir. DEDE sisteminde üretilen düzenli ve düzensiz gerilimin test edildiği blok diyagramı gösterimi Şekil 10'da verilmektedir.

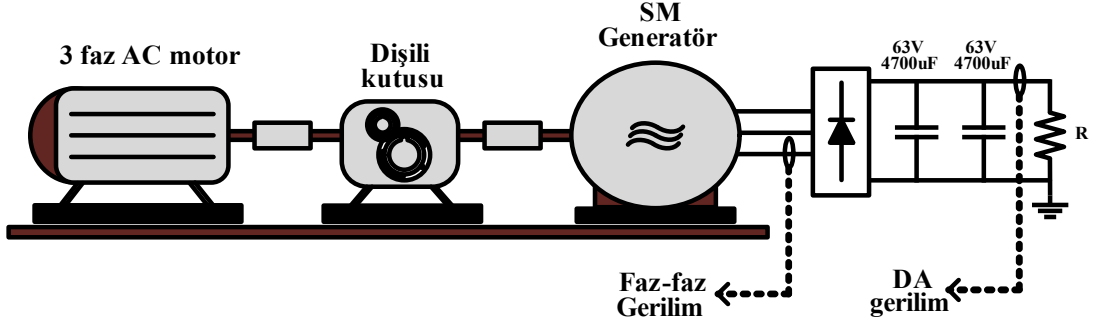
Sistem çıkışına 2 adet paralel bağlı 4700 uF-63 V elektriksel değerlere sahip kondansatör bağlanmıştır. Doğrultulmuş sistem çıkışı (DA gerilim) 20 Ω ve 200 Ω için gözlenmiştir.

Tablo 5. SMSG'nin elektriksel test sonuçları

| HRS (V) | Yük bağlı değil | Yük direnci R = 20 Ω | | | Yük direnci R = 10 Ω | | |
|------------|-----------------------|-----------------------------|-------------|------------|-----------------------------|-------------|------------|
| | Gerilim (V) | Gerilim (V) | Akım (A) | Güç (W) | Gerilim (V) | Akım (A) | Güç (W) |
| 1 | 5.170 | 4.13 | 0.201 | 0.83 | 3.92 | 0.391 | 1.53 |
| 2 | 10.90 | 9.62 | 0.472 | 4.54 | 9.27 | 0.919 | 8.51 |
| 3 | 16.84 | 15.17 | 0.738 | 11.19 | 14.58 | 1.451 | 21.15 |
| 4 | 22.78 | 20.56 | 1.01 | 20.76 | 19.94 | 1.992 | 39.72 |
| 5 | 28.72 | 26.22 | 1.283 | 33.64 | 25.12 | 2.553 | 64.13 |

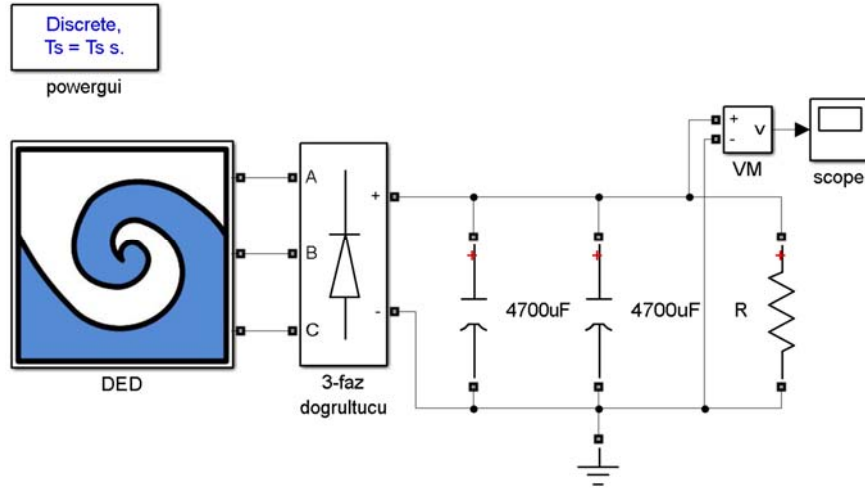
Tablo 6. SMSG, Motor ve sürücü hızları test sonuçları

| HRS (V) | Motor sürücü frekans değeri (Hz) | Yük bağlı değil | | Yük direnci R = 20 Ω | | Yük direnci R = 10 Ω | |
|------------|--|-----------------|-------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| | | Hız (rpm) | | Hız (rpm) | | Hız (rpm) | |
| | | MTHB | GTHB | MTHB | GTHB | MTHB | GTHB |
| 1 | 5.7 | 179.4 | 44.6 | 174.2 | 43.6 | 173.4 | 43.0 |
| 2 | 11.76 | 358.8 | 89.1 | 353.5 | 87.7 | 353.1 | 87.2 |
| 3 | 17.82 | 537.6 | 133.8 | 533.1 | 132.5 | 532.2 | 131.6 |
| 4 | 23.88 | 719.4 | 178.7 | 714.2 | 177.5 | 712.4 | 176.5 |
| 5 | 29.94 | 898.3 | 223.5 | 896.2 | 222.9 | 893.6 | 221.8 |



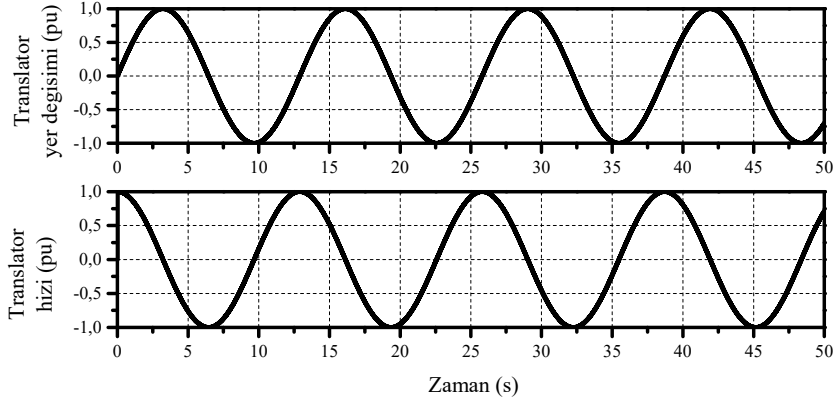
Şekil 10. DEDE sistemi düzenli ve düzensiz dalga enerjisi test üretim şeması

Deneysel olarak gerçekleştirilen testler, aynı şartlar altında benzetim ortamında da yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Benzetim ortamında kurulan DED sistemine ait model Şekil 11’de verilmektedir. Şekil 11’de verilen DED bloğunun içerisinde Şekil 6’da verilen matematiksel model (ideal DED modeli) bulunmaktadır.

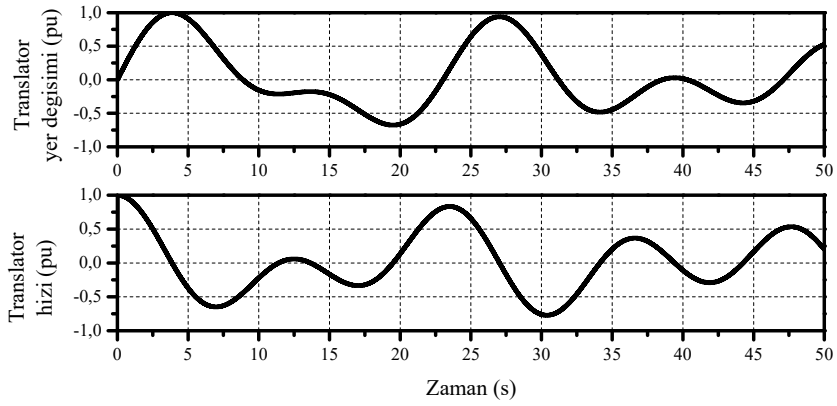


Şekil 11. DED düzenli ve düzensiz dalga enerjisi test üretim modeli

Düzenli ve düzensiz dalgaların indüklediği gerilim eşitliğinde (eşitlik 15) yer alan translator pozisyonunun birim zamandaki yer değişimi (dx/dt) yani hızına ait grafiksel gösterimler Şekil 12’de verilmektedir. Benzetim ve laboratuvar ortamlarında düzenli ve düzensiz gerilimlerin üretiminde bu sinyaller kullanılmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 12. Düzenli (a) ve düzensiz (b) dalga enerjisinin üretiminde kullanılan translator yer değişimi ve hız grafikleri

İlk olarak düzensiz dalga modeline ait üretilen faz-faz gerilimin deneysel ve benzetim modelinden elde edilen görüntüleri Şekil 13'te verilmektedir. Üretilen gerilimin anlık maksimum değeri yaklaşık 19 V değerindedir ve üretilen gerilim sinyali değişken bir periyota sahiptir. Deniz dalgasının doğal yapısı gereğince içerdiği süreksizlikler, gerilim düşümleri ve değişken periyodik yapısı, indüklenen gerilimde bu karakteristikleri yansıtmaya neden olur. Şekil 13'te görüldüğü üzere üretilen gerilim sıfır geçiş noktalarına sahiptir.

Düzenli dalga modeline ait, generatörde indüklenen ve benzetim modeli ile elde edilen faz-faz gerilimleri Şekil 14'te gösterilmektedir. Üretilen gerilimin maksimum değeri yaklaşık 19 V değerinde, periyodu ise 12.9 saniye olarak ayarlanmıştır. Düzenli dalga modeli düzensiz dalgaya göre periyodik gerilim tekrarlamaları içermektedir. Yapısı gereği bir periyotta iki kere gerilim değeri sıfıra inmektedir ve bu durum üretilen enerjinin direk olarak yük beslemesinde kullanılmasına engel olmaktadır.

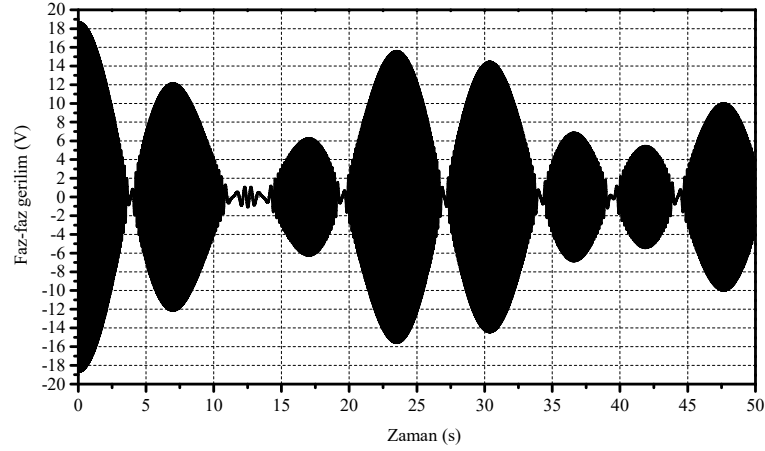
Düzensiz gerilimin doğrultulmuş ve kondansatörler ile filtrelenmiş farklı yük altındaki benzetim ve laboratuvar ortamındaki görüntüleri Şekil 15 ve 16’da gösterilmektedir. Yük değeri yüksek iken çıkışa bağlı kondansatörler ilk durumda şarj olduktan sonra bazı bölgelerde gerilimin sıfıra inmesini engellemektedir. Yük azaltıldığında ise DED’den çekilen akım arttığı için kondansatörler hızlı bir şekilde deşarj olmakta ve gerilimin sıfıra inmesini engelleyememektedir. Şekillerden görüldüğü üzere üretilen gerilim hem büyüklük olarak hem de periyodik olarak düzensizdir.

Düzenli enerji modelinin farklı yük değerleri altında benzetim ve laboratuvar ortamlarında üretilen 3-faz gerilimin pasif doğrultucu ile doğrultulmuş gerilim görüntüleri Şekil 17 ve 18’de verilmektedir.

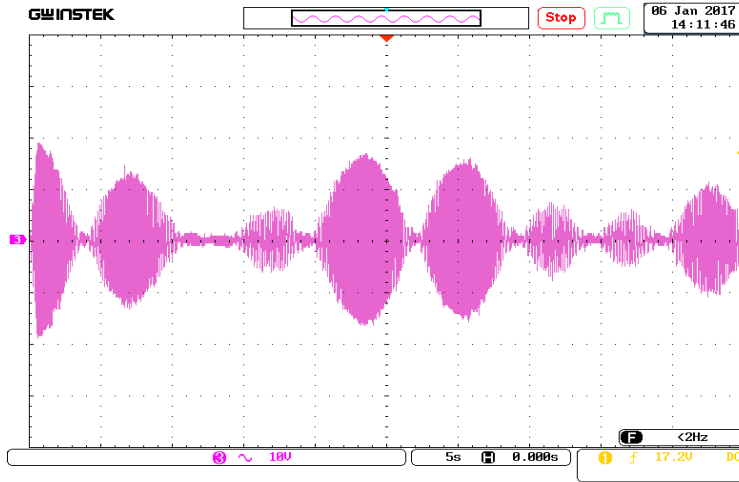
Düzensiz dalga durumunda olduğu gibi düzenli dalga durumunda da çıkışa bağlanan yükün değeri azaltıldığında kondansatörler çıkış geriliminin sıfıra inmesini engelleyememektedir. Çıkış yükü artırıldığında ise sistemden çekilen akım azaldığı için kondansatörlerin deşarj süresi uzamaktadır ve böylece gerilimin sıfıra inmesini engelleyerek 4 V seviyesinde tutmayı başarmaktadır.

Her iki model içinde sistem çıkışına bağlanan kondansatörlerin değerleri artırıldığında daha dengeli ve doğrultulmuş bir DA gerilim elde edilecektir. Aynı zamanda sisteme bağlanan yük değeri de azaltıldığında kondansatörler gerilim düşümlerini doldurmakta yetersiz kalacaktır.

Bu başlık altında verilen gerçek zamanlı sistem ve benzetim modeli ile elde edilen grafiklerde görüldüğü üzere gerçek zamanlı elde edilen sonuçlar ile benzetim ortamında elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Gerçek zamanlı testlerde elde edilen sonuçlarda ve benzetim sonuçlarında çıkışa bağlanan direnç yükü azaltıldığında kondansatörler hızlı bir şekilde deşarj olarak gerilimin sıfıra inmesini engelleyememektedir. Bu durum da DED’de üretilen gerilim yük beslemesinde kullanılamaz durumdadır. Bu problemin giderilmesi için bu tezde önerilen güç elektroniği topolojisi ve güneş enerjisinden şarj edilen ultra-kondansatör (UK) yapısından oluşan sistem DED’e entegre edilecektir.

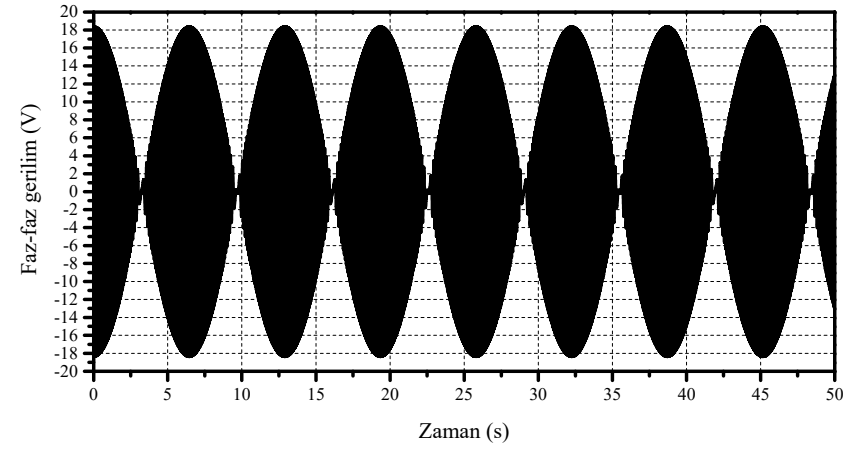


(a)

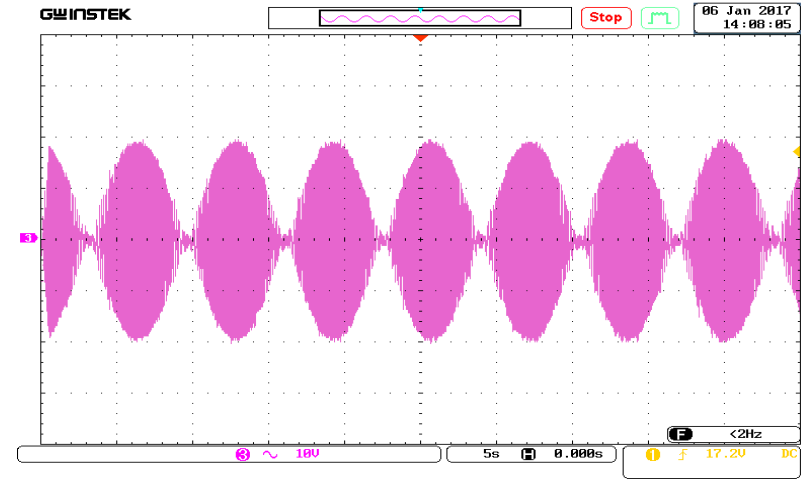


(b)

Şekil 13. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli tek faz gerilim

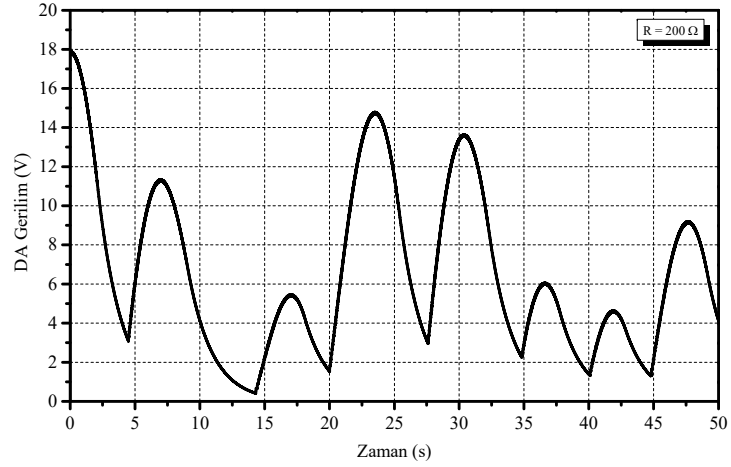


(a)

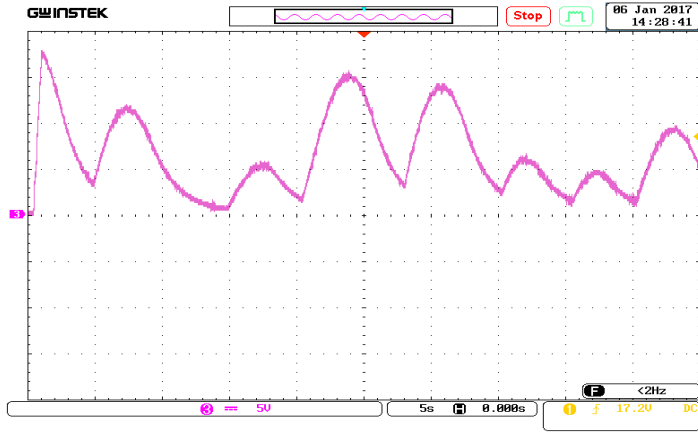


(b)

Şekil 14. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli tek faz gerilim

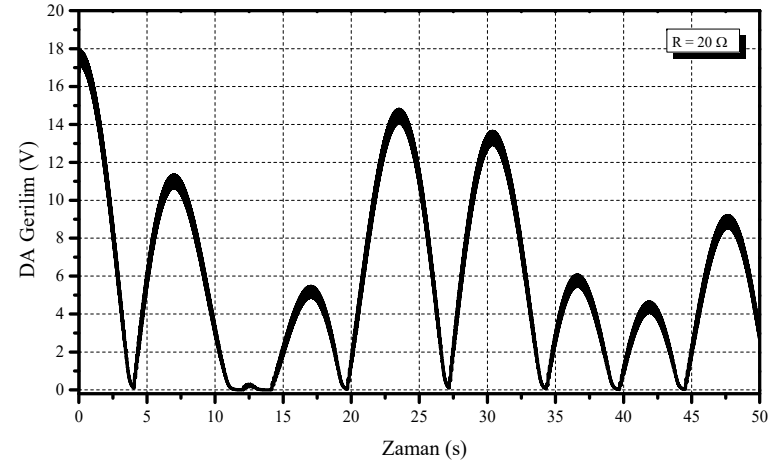


(a)

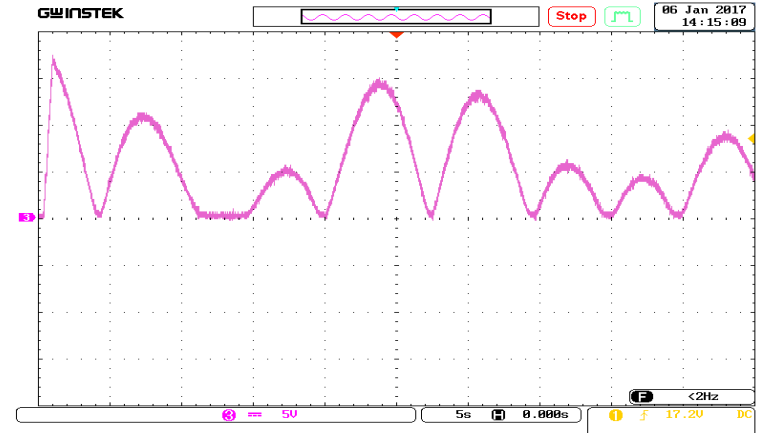


(b)

Şekil 15. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzensiz 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 200 Ω)

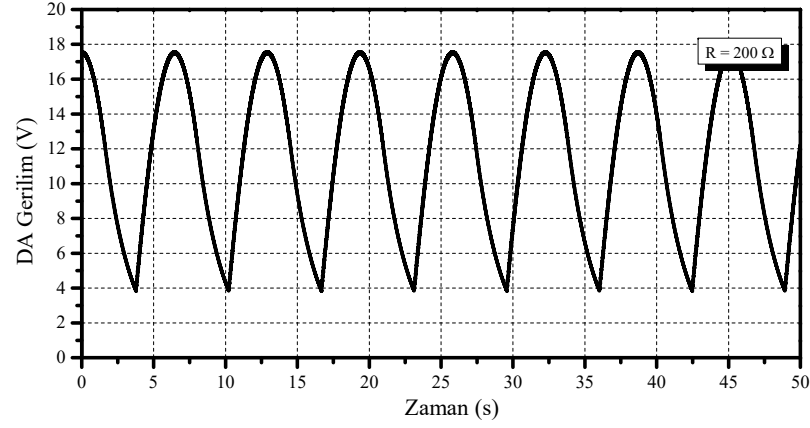


(a)

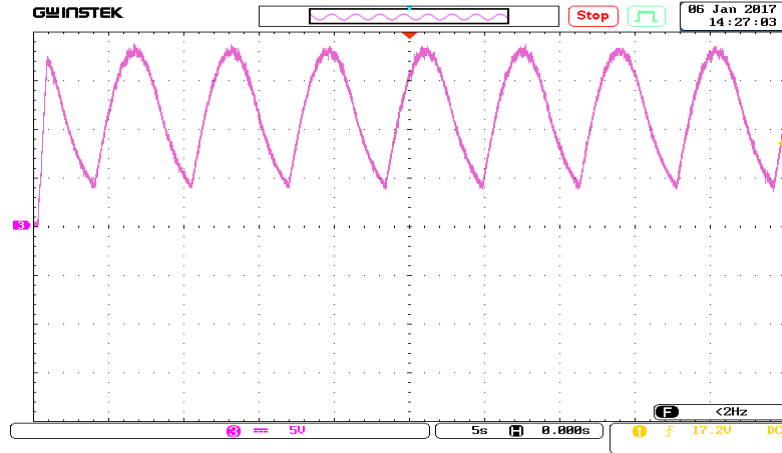


(b)

Şekil 16. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzensiz 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 20 Ω)

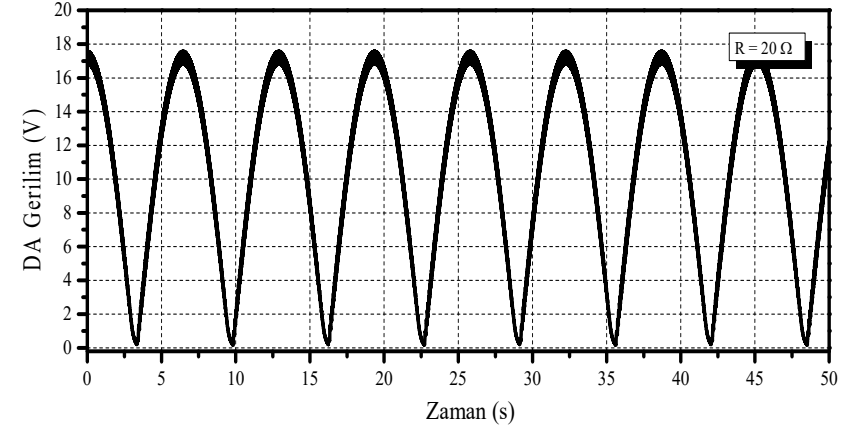


(a)

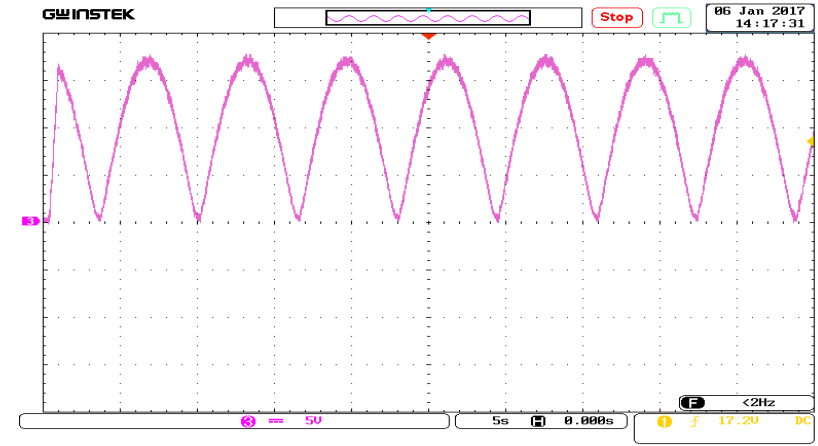


(b)

Şekil 17. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 200 Ω)



(a)



(b)

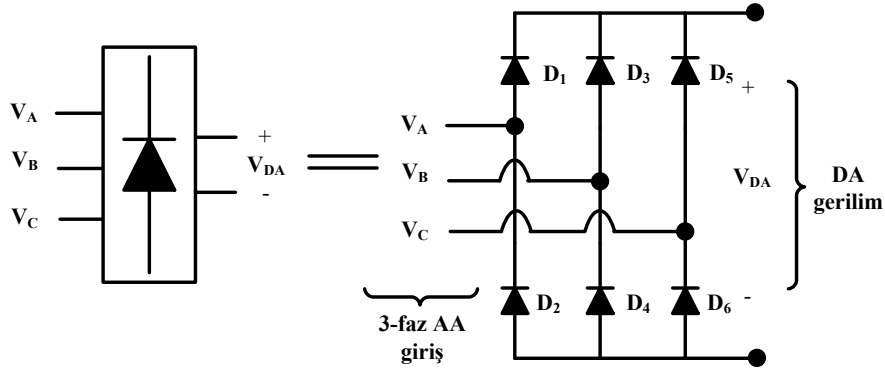
Şekil 18. Benzetim (a) ve laboratuvar (b) ortamlarında üretilen düzenli 3-faz gerilimin doğrultulmuş gösterimleri (Yük direnci: 20 Ω)

2.3. Güç Elektroniği Devreleri

Bu bölümde DED’de üretilen enerjinin işlenmesinde kullanılan güç elektroniği çeviricileri, pasif doğrultucu, sürücü devre ve gerilim-akım bilgilerinin okunmasında kullanılan kart devresi hakkında bilgiler verilmektedir.

2.3.1. 3-faz Diyot Doğrultucu

AA-DA doğrultucu generatörde indüklenen 3-faz gerilimi, DA sinyaline çevirmek için kullanılmaktadır. Daha sonra elde edilen bu DA sinyali işlenmek üzere güç elektroniği çeviricilerine iletilmektedir. Tezde kullanılan doğrultucu şeması Şekil 19’da verilmektedir. Kullanılan doğrultucu 3-faz giriş gerilimini, DA sinyaline çevirdiği için 6 adet diyottan meydana gelmektedir.



Şekil 19. 3-faz diyot doğrultucu devre şeması

2.3.2. DA-DA Güç Çeviricileri

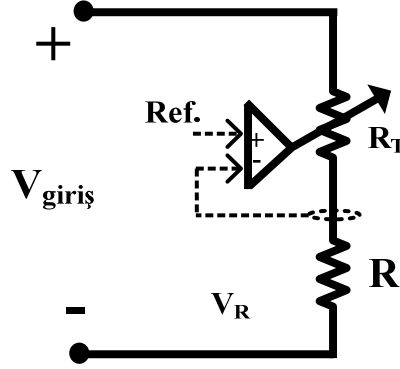
Güç elektroniği devreleri, enerji kaynağı ile elektriksel yük arasında verimli bir güç akışı sağlamak için kullanılmaktadır [87]. Güç elektroniği ara yüzünde yer alan denetleyici ile bu güç akışı istenilen gerilim-akım referans değerinde gerçekleştirilmektedir.

İlerleyen teknolojik gelişmeler ile birlikte güç elektroniği devrelerinin kullanım alanları da hızla artmaktadır. Bu alanlardan bazıları; gelecekte geleneksel ulaşım araçlarının yerini alacak olan elektrikli ve hibrid elektrikli araçlar [88, 89], hava koşullarına bağlı olarak güç çıkışlarında düzensizlik içeren güneş, rüzgâr ve dalga enerjisi gibi yenilenebilir enerji

kaynaklarının kullanımı [90-93], kesintisiz güç kaynakları [94, 95] ve robotik uygulamalardır [96].

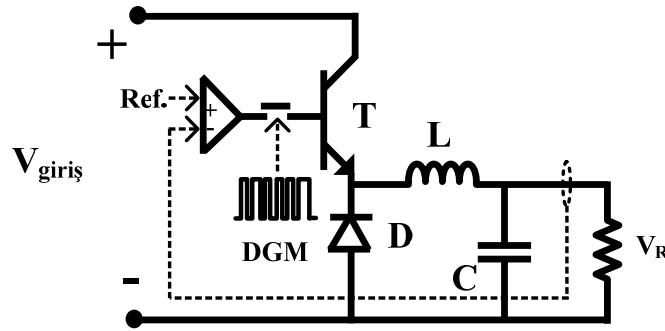
Bir DA-DA çevirici, sabit veya değişken DA giriş gerilimini istenilen seviye DA gerilimine dönüştüren güç elektroniği devresidir. DA-DA çevirici çeşitleri en temel haliyle doğrusal ve anahtarlama olarak sınıflandırılabilir.

Doğrusal regülatörler seri ve paralel bağlantılarda olabilen, giriş gerilimini azaltan regülatör çeşitleridir. Doğrusal bir regülatöre ait gösterim Şekil 20’de verilmektedir. Bu yapıda, seri bağlı anahtarlama elemanı ayarlanabilir bir direnç gibi davranmakta ve sistemin verimini oldukça düşürmektedir [97].



Şekil 20. Doğrusal bir gerilim regülatörünün eşdeğer devresi

Şekil 21’de gösterilen anahtarlama DA-DA çeviricide yer alan anahtarlama elemanı ise sabit frekansa sahip bir darbe genişlik modülasyonu (DGM) sinyali ile sürülerek ortalama bir gerilim değeri üretilir ve bu sinyalin salınımları L-C filtre ile yok edilmektedir.



Şekil 21. Anahtarlama gerilim regülatörü devresi

Anahtarlamaalı çeviriciler yalıtımlı ve yalıtımsız olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Yalıtımlı tip DA-DA çeviricide kullanılan bobin yalıtım özelliği göstererek giriş ve çıkışı birbirinden izole etmektedir. Yalıtımsız çeviricilerin ise en temel kullanılan yapıları azaltan, artıran, azaltan-artıran ve Cuk çeviricilerdir [98]. Her bir çeviricinin uygulama alanına göre özel avantajları ve eksik yönleri bulunmaktadır [99, 100].

Çeviriciler genellikle sürekli ve süreksiz olmak üzere iki modda çalışmaktadır. Sürekli iletim modunda, indüktör akımı asla sıfıra inmezken, süreksiz iletim modunda indüktör akımı her anahtarlama periyodunun bitimine kadar sıfır değerine inmektedir. Her iki modun da kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Tez kapsamında kullanılan çeviricilerin sürekli iletim modu analizleri yapılmaktadır.

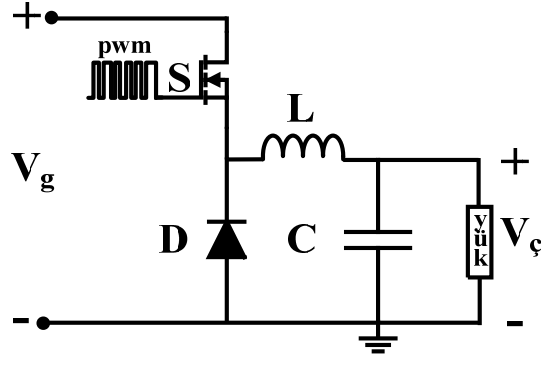
[101] ve [102]'de yapılan çalışmalarda çevirici yapısı incelenirken devre elemanlarının parazitik dirençlerinin de dikkate alınması önerilmektedir. Bu nedenle, modelleme aşamasında daha gerçekçi bir model çıkarımı elde etmek için devre elemanlarının eşdeğer seri dirençleri de dikkate alınmaktadır.

Gelecek bölümlerde anahtarlamaalı DA-DA çeviricilerin yalıtımsız sınıfında yer alan azaltan ve artıran çeviricilerin senkron yapılarının tasarımı ve modelleme başarımı incelenmektedir.

2.3.2.1. DA-DA Senkron Azaltan Çevirici

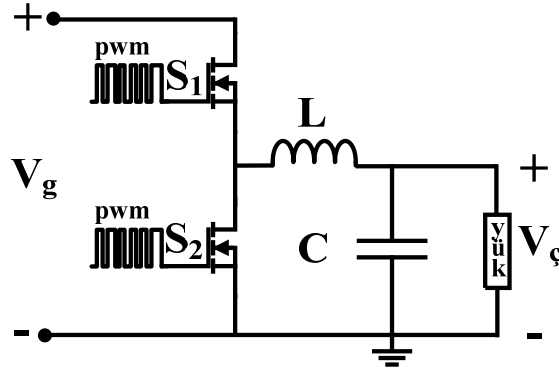
Genel anlamda DA-DA azaltan çevirici (AZÇ), gerilim düşürücü-akım artırıcı bir çevirici tipidir. Yani giriş geriliminin polaritesini değiştirmeden çıkışta daha düşük bir DA gerilim elde etmek için kullanılır. AZÇ genel devre şeması aşağıda Şekil 22'de gösterilmektedir.

Şekil 22'de S anahtarlama elemanı, D diyot, L bobin, C kondansatör, V_g giriş gerilimi, V_c çıkış gerilimi olarak sembolize edilmiştir. S anahtarı yüksek anahtarlama frekansında kontrol devresi tarafından sürekli aç-kapa yapılır ve L-C çıkış filtresi ile yük üzerinde değişken giriş geriliminden daha az ve sabit bir DA gerilim elde edilir.



Şekil 22. DA-DA AZÇ genel devre şeması

Senkron azaltan çevirici (SAZÇ) tasarımında, AZÇ’de yer alan diyotun yerine anahtarlama elemanı kullanıldığı için, iletim kayıpları azaltılarak tüm sistemin verimi artırılmıştır [103]. Bu yüzden düşük gerilimli uygulamalarda SAZÇ kullanımı, AZÇ’ye göre daha uygun görülmektedir. Tez kapsamında çıkış yük gerilimini sabit bir değerde tutmak için DA-DA SAZÇ devresi kullanılmıştır. SAZÇ’nin genel devre şeması Şekil 23’te verilmektedir.

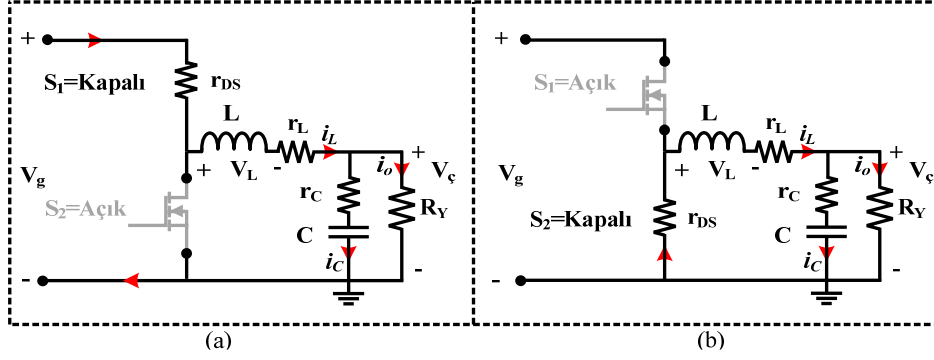


Şekil 23. DA-DA SAZÇ genel devre şeması

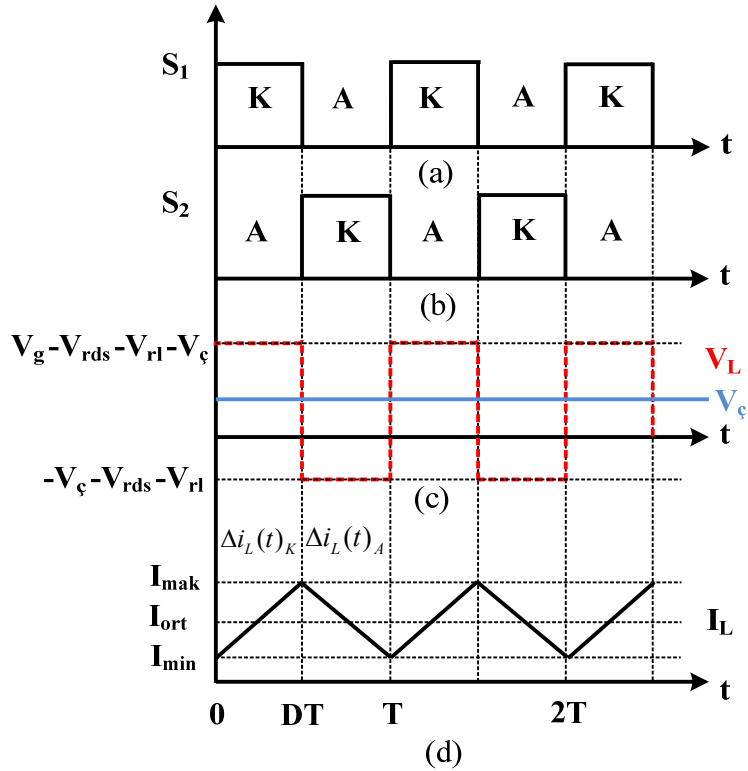
2.3.2.1.1. Sürekli İletim Modunda SAZÇ Analizi

Şekil 24’te verilen devrede r_L endüktansın eşdeğer seri direncini, r_{DS} mosfet iletim direncini ve r_C kondansatörün eşdeğer seri direncini ifade etmektedir. Sürekli iletim modunda S_1 anahtarı kapalı, S_2 anahtarı açık (Şekil 24(a)) olduğu sürece, giriş gerilimi endüktansı, kondansatörü ve çıkışı beslemektedir. Bu durumda endüktans akımı doğrusal olarak $(V_g - V_{r_{ds}} - V_{r_L} - V_C)/L$ eğimi ile artmaktadır. S_1 anahtarı açık, S_2 anahtarı kapalı (Şekil

24(b)) olduğu süre içerisinde ise çıkışın besleme gerilimi ile bağlantısı kesildiğinden, endüktans bir akım kaynağı gibi davranarak kendi polaritesinin tersi yönde yüke akım akıtır. İlk durumda şarj olan endüktans, bu durumda $(-V_{\phi}-V_{rds}-V_{rL})/L$ eğimi ile deşarj olmaktadır [104]. Şekil 25'te tasarımda yer alan anahtarların durumuna göre endüktansın gerilim ve akım karakteristiklerinde meydana gelen değişimler gösterilmektedir.



Şekil 24. SAZÇ çalışma prensibi (a) S1 kapalı, S2 açık, (b) S1 açık, S2 kapalı



Şekil 25. (a) S1 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, (b) S2 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, S1 ve S2 anahtarlarının durumuna göre değişen (c) endüktans gerilimi ve (d) endüktans akımını (SAZÇ devresi)

Şekil 25 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere, S₁ anahtarının kapalı, S₂ anahtarının açık olduğu süre içerisinde (T_{kapalı}=DT), endüktans gerilimi V_L(t);

$$V_g(t) = V_{r_{DS}}(t) + V_L(t) + V_{r_L}(t) + V_\zeta(t) \quad (25)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_g(t) - V_{r_{DS}}(t) - V_{r_L}(t) - V_\zeta(t) \quad (26)$$

(26)'da verilen eşitlik yardımıyla (T_{kapalı}) süresi içerisinde endüktansın akım değerinde meydana gelen değişim;

$$(\Delta i_L(t))_K = \frac{V_g(t) - V_{r_{DS}}(t) - V_{r_L}(t) - V_\zeta(t)}{L} DT \quad (27)$$

S₁ anahtarının açık, S₂ anahtarının kapalı olduğu süre içerisinde (T_{açık}=(1-D)T), endüktans gerilimi V_L(t);

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -(V_\zeta(t) + V_{r_{DS}}(t) + V_{r_L}(t)) \quad (28)$$

(28)'de verilen denklem yardımıyla (T_{açık}) süresi içerisinde endüktansın akım değerinde meydana gelen değişim;

$$(\Delta i_L(t))_A = -\frac{V_\zeta(t) + V_{r_{DS}}(t) + V_{r_L}(t)}{L} (1-D)T \quad (29)$$

Bir endüktansın anahtarların kapalı ve açık olduğu durumlarda akım değişimi toplamı sıfır olmalıdır (Denge eşitliği). Diğer bir deyişle bir periyod boyunca endüktans üzerindeki toplam gerilim düşümü sıfır olmalıdır [104]. Şekil 25 (c) ve (d)'de endüktans geriliminin ve akımının değişimi açıkça gözlenmektedir. Buna göre (27) ve (29)'da verilen denklemler kullanılarak elde edilen doluluk-boşluk oranı veya çalışma oranı (D), (33)'te verilen eşitlik ile gösterilmektedir.

$$(\Delta i_L(t))_K + (\Delta i_L(t))_A = 0 \quad (30)$$

$$\frac{V_g(t) - V_{r_{DS}}(t) - V_{r_L}(t) - V_{\zeta}(t)}{L} DT - \frac{V_{\zeta}(t) + V_{r_{DS}}(t) + V_{r_L}(t)}{L} (1-D)T = 0 \quad (31)$$

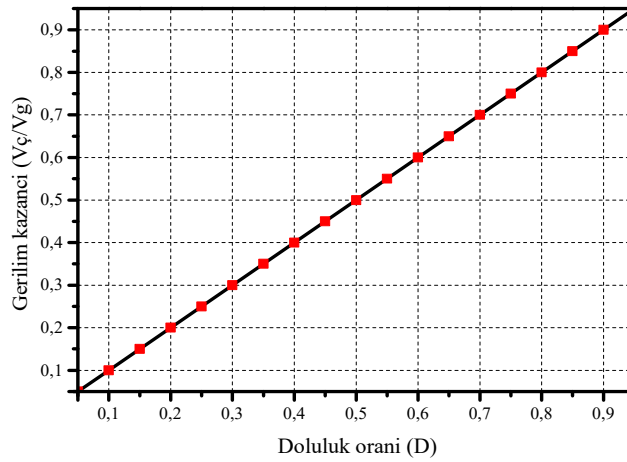
(31)'de verilen eşitlik düzenlendiğinde, çıkış gerilimi ve giriş gerilimi arasındaki bağıntı (32)'de ifade edildiği gibi olur.

$$D = \frac{V_{\zeta}(t) + V_{r_{DS}}(t) + V_{r_L}(t)}{V_g(t)} \quad (32)$$

Mosfetin r_{DS} direnci ve endüktansın parazitik direnci r_L ihmal edilirse, (32)'te verilen eşitlik, (33)'te görüldüğü gibi elde edilir.

$$D = \frac{V_{\zeta}(t)}{V_g(t)} \quad (33)$$

Yukarıda verilen eşitlikten görüldüğü üzere SAZÇ'nin çalışma oranı, çıkış geriliminin, giriş gerilimine oranı ile elde edilmektedir. Kayıpsız bir SAZÇ'nin gerilim kazancı (V_{ζ}/V_g)-doluluk oranı (D) karakteristik grafiği Şekil 26'da verilmektedir.



Şekil 26. Kayıpsız SAZÇ gerilim kazancı (V_{ζ}/V_g)-doluluk oranı (D) karakteristiği

2.3.2.1.2. SAZÇ Tasarımı

Tezde çıkışta yer alan yüke sabit bir gerilim sağlamak için kullanılacak olan SAZÇ devresine ait tasarım değerleri Tablo 7’de verilmektedir. Tasarımda kullanılan pasif devre elemanlarının değerleri [104]’de verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır.

Tablo 7’de verilen değerler için hesaplanan maksimum ve minimum doluluk-boşluk oranı;

$$D_{mak} = \frac{V_{\zeta}(t)}{V_g(t)} = \frac{12}{13} = 0.923 \quad (34)$$

$$D_{min} = \frac{V_{\zeta}(t)}{V_g(t)} = \frac{12}{42} = 0.28 \quad (35)$$

Tablo 7. SAZÇ tasarım değerleri

| $V_{g(mak)}$ | $V_{g(min)}$ | V_{ζ} | $I_{\zeta(max)}$ | $I_{\zeta(min)}$ |
|--------------|--------------|-------------|------------------|------------------|
| 42V | 13V | 12V | 5A | 0.5A |

Devrenin maksimum ve minimum güç çıkışı ile yük direnci;

$$P_{\zeta(mak)} = V_{\zeta} I_{\zeta(mak)} = (12)(5) = 60W \quad (36)$$

$$P_{\zeta(min)} = V_{\zeta} I_{\zeta(min)} = (12)(0.5) = 6W \quad (37)$$

$$R_{Y(mak)} = \frac{V_{\zeta}}{I_{\zeta(min)}} = \frac{12}{0.5} = 24\Omega \quad (38)$$

$$R_{Y(min)} = \frac{V_{\zeta}}{I_{\zeta(mak)}} = \frac{12}{5} = 2.4\Omega \quad (39)$$

20 kHz anahtarlama frekansı ile sürekli endüktör akımı (i_L) için gerekli endüktans değeri aşağıda verilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır.

$$i_{L\min} = i_L - \left| \frac{\Delta i_L}{2} \right| = \frac{V_\xi}{R} - \left| \frac{\frac{V_\xi}{L}(1-D)T}{2} \right| \geq 0 \quad (40)$$

$$\frac{V_\xi}{R} \geq \left| \frac{V_\xi(1-D)T}{2L} \right| \quad (41)$$

$$L_{SAZÇ} \geq \frac{(1-D_{\min})R_{\max}}{2f_s} = \frac{(1-0.28)24}{2 \times 20 \times 10^3} = 0.432 \text{ mH} \quad (42)$$

(42)'te yapılan hesaplamalara göre endüktans değeri 0.432 mH'den fazla olmalıdır. Tasarım için bu değere yakın olan 0.33 mH/0.12 Ω 'luk bir endüktans kullanılmıştır. Çıkış gerilimindeki dalgacığın ($V_r/V_\xi \leq \%1$) olması için gerekli kapasite değeri ise aşağıda verilen formüller yardımıyla hesaplanmıştır [104].

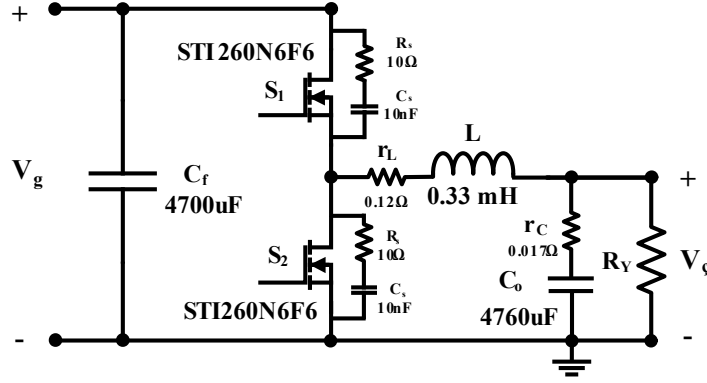
$$I_c = C \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (43)$$

$$\Delta V_c(t) = \frac{I_c(t)}{C} DT \quad (44)$$

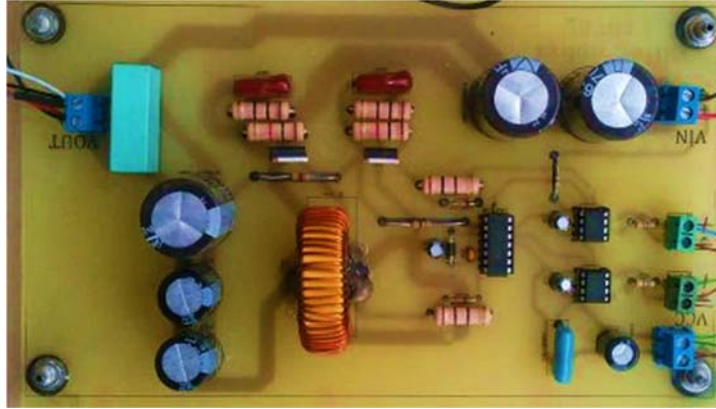
$$\frac{\Delta V_\xi}{V_\xi} = \frac{1-D}{8CLf^2} \quad (45)$$

$$C_{SAZÇ} \geq \frac{(1-D_{\min})V_\xi}{8V_r L f_s^2} = \frac{(1-0.28)12}{8(0.12)(0.432 \times 10^{-3})(20 \times 10^3)^2} = 52 \mu F \quad (46)$$

(46)'da verilen hesaplamalara göre çıkış kondansatörünün minimum değeri $52 \mu\text{F}$ olarak hesaplanmıştır. Devre tasarımında çıkış filtre kondansatörü $4760\mu\text{F}/0.017\Omega$ kullanılmıştır. Tasarlanan SAZÇ devresine ait detaylı şematik gösterim ve deneysel devre görüntüsü Şekil 27'de verilmektedir. Ayrıca tasarımda kullanılan baskı devre çizimi Ek bölümünde sunulmaktadır.



(a)

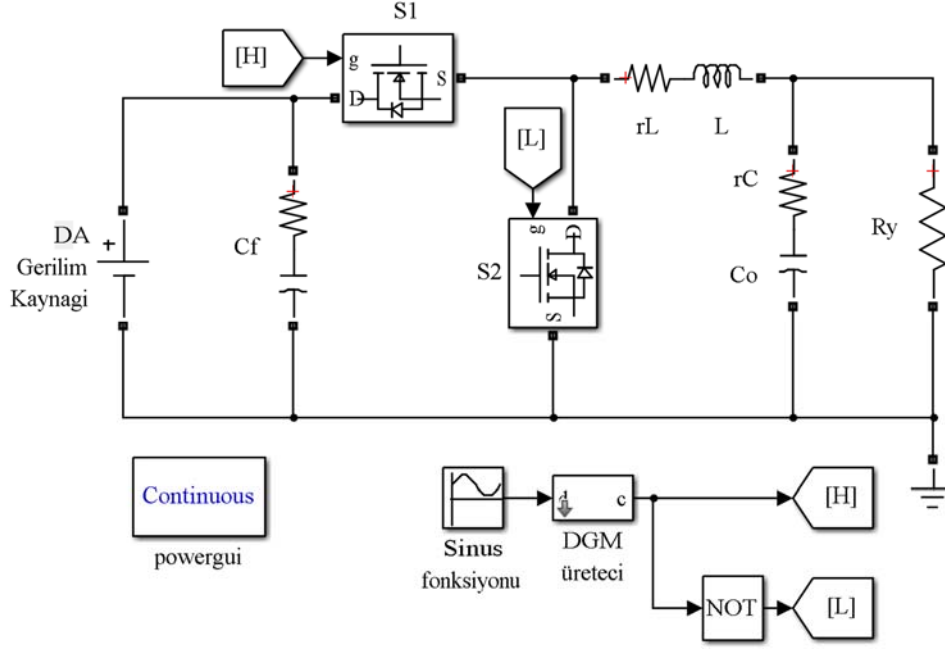


(b)

Şekil 27. (a) SAZÇ detaylı devre şeması ve (b) deneysel devre görüntüsü

2.3.2.1.3. SAZÇ Devresinin Modelleme Başarımı

Bu başlık altında Matlab/Simulink ortamında modellenen SAZÇ devresinin sonuçları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak, modellenen sistemin başarımı irdelenmiştir. Benzetim ortamında modellenen SAZÇ devresi Şekil 28'de gösterilmektedir.

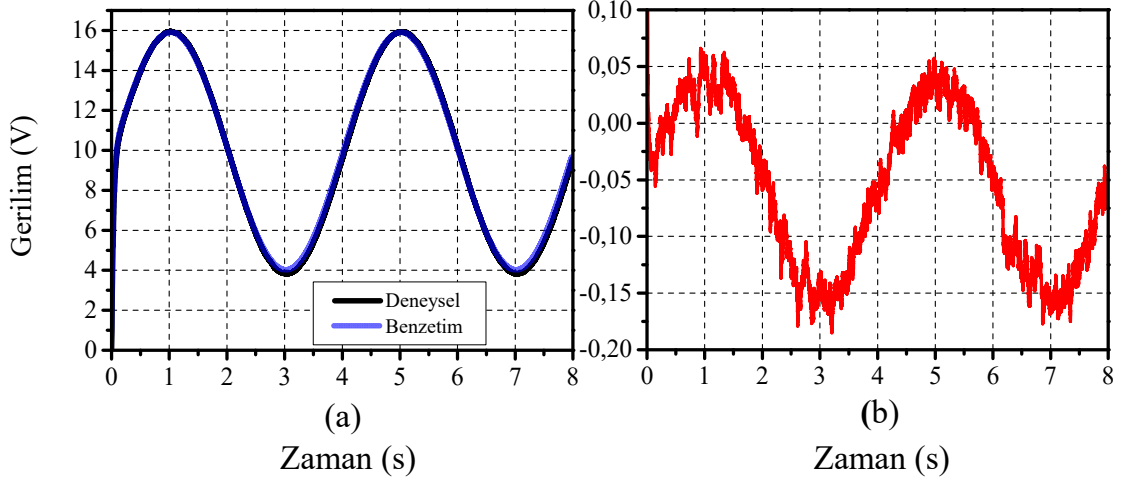


Şekil 28. Benzetim ortamında modellenen SAZÇ devresi

Benzetim modeli ve baskı devresi alınan SAZÇ girişine doluluk-boşluk oranı olarak bias değeri 0.5, periyodu 4 saniye ve genliği 0.3 olan bir sinüs sinyali uygulanmıştır. Deney aşamasında yük direnci 20Ω ve giriş gerilimi değeri ise 20 V olarak alınan sabit parametrelerdir. Giriş olarak uygulanan doluluk-boşluk oranına ait matematiksel ifade (47)'de verilmektedir. Elde edilen grafiksel sonuçlar ise Şekil 29'da verilmektedir.

$$d(t) = 0.3 \sin(0.5\pi t) + 0.5 \quad (47)$$

Şekil 29'dan görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar birbiriyle uyumlu elde edilmiştir. Başlangıç zamanında en yüksek hata oranı görülmesine rağmen ortalama 0.1 V'luk bir modelleme hatası ile sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.

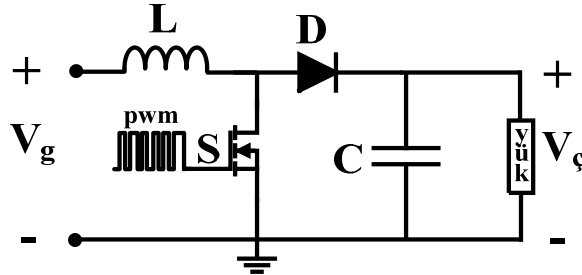


Şekil 29. (a) Benzetim modeli ve deneysel SAZÇ devresinin sistem yanıtları, (b) modelleme hatası

2.3.2.2. DA-DA Senkron Artıran Çevirici

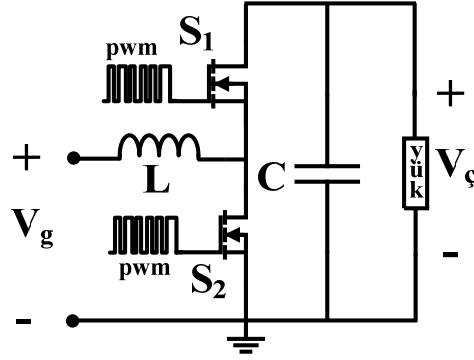
Genel anlamda DA-DA artıran çevirici (ARÇ), AZÇ'nin tersine, gerilim yükseltici-akım düşürücü bir çevirici olarak görev yapmaktadır. ARÇ, giriş geriliminin polaritesini değiştirmeden çıkışta daha yüksek bir DA gerilim elde etmek için kullanılır. ARÇ'ye ait genel devre şeması Şekil 30'da gösterilmektedir.

Aşağıda verilen şekilde görüldüğü üzere ARÇ devresi diyot (D), endüktans (L), çıkış kondansatörü (C), yük ve anahtarlama elemanından (S) meydana gelmektedir. Devre girişine uygulanan gerilim V_g ile, devre çıkışından alınarak yük beslemesinde kullanılan gerilim $V_ç$ ile sembolize edilmektedir. S anahtarının yüksek frekanslı DGM sinyali ile sürülmesiyle ve pasif elektriksel elemanların şekilde gösterildiği gibi bağlanmasıyla çıkış gerilimi, giriş geriliminden daha yüksek elde edilir.



Şekil 30. ARÇ genel devre şeması gösterimi

Senkron artıran çevirici (SARÇ) tasarımında, ARÇ’de yer alan diyotun yerine anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Tez kapsamında dalga enerji dönüştürücüsünden gelen düzensiz enerjiyi olabildiğince kullanılabilir hale getirerek, DA-bara gerilimini sabit bir değerde tutmak için DA-DA SARÇ devresi kullanılmaktadır. Tasarlanan SARÇ’ın genel devre şeması Şekil 31’de görülmektedir.

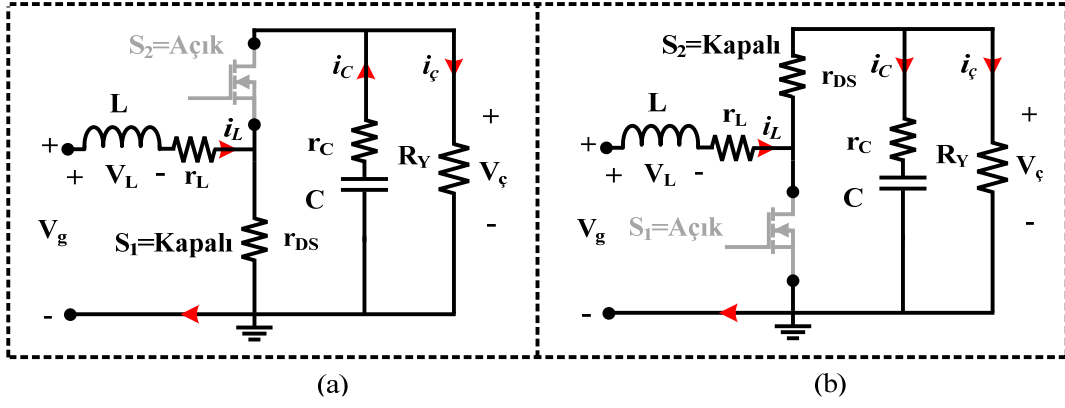


Şekil 31. SARÇ genel devre şeması gösterimi

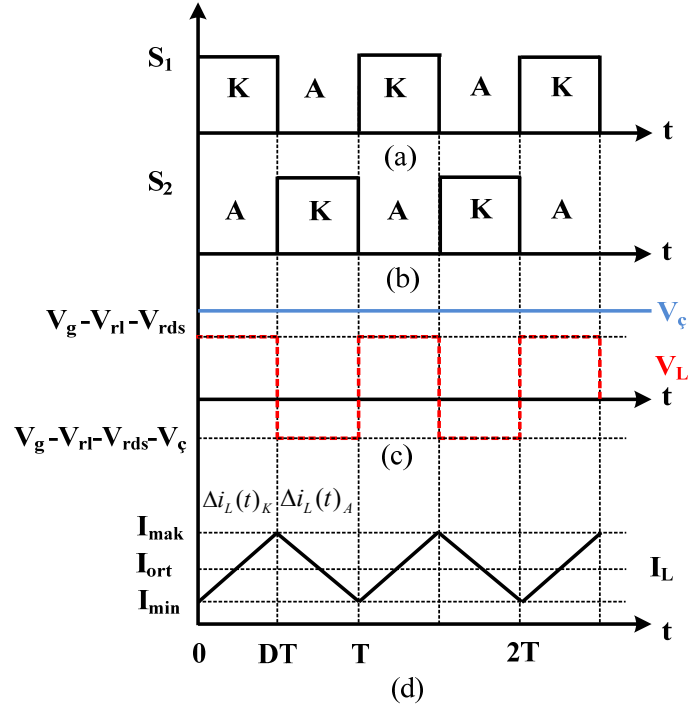
2.3.2.2.1. Sürekli İletim Modunda SARÇ Analizi

Şekil 32’de verilen devrede r_L endüktansın eşdeğer seri direncini, r_{ds} mosfet iletim direncini ve r_C kondansatör eşdeğer seri direncini ifade etmektedir. Sürekli iletim modunda S_1 anahtarı kapalı, S_2 anahtarı açık (Şekil 32(a)) olduğu sürece, giriş gerilimi, endüktansın üzerine düşmektedir. Bu durumda endüktans şarj olmakta ve akımı doğrusal olarak $(V_g - V_{rL} - V_{rds})/L$ eğimi ile artmaktadır. S_1 anahtarı açık, S_2 anahtarı kapalı (Şekil 32(b)) olduğu süre içerisinde ise yük gerilimi, giriş gerilimi ile şarjlı endüktans tarafından sağlanmaktadır. Bu durumda endüktans deşarj olmakta ve akımı $(V_g - V_{rL} - V_{rds} - V_ç)/L$ eğimi ile azalmaktadır [104].

Şekil 33’te SARÇ tasarımında yer alan anahtarların açık-kapalı durumlarına göre endüktansın gerilim ve akım değişimleri verilmektedir.



Şekil 32. SAZÇ çalışma prensibi, (a)S1 kapalı, S2 açık, (b) S1 açık, S2 kapalı



Şekil 33. (a) S1 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, (b) S2 anahtarının iletimde ve kesimde olduğu zamanlar, S1 ve S2 anahtarlarının durumuna göre değişen (c) endüktans gerilimi ve (d) endüktans akımı (SARÇ devresi)

Şekil 33 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere, S1 anahtarının kapalı, S2 anahtarının açık olduğu süre içerisinde ($T_{\text{kapalı}}=DT$), endüktans gerilimi $V_L(t)$;

$$V_g(t) = V_L(t) + V_{r_L}(t) + V_{r_{DS}}(t) \quad (48)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_g(t) - V_{r_L}(t) - V_{r_{DS}}(t) \quad (49)$$

(49)'da verilen eşitlik yardımıyla ($T_{\text{kapalı}}$) süresi içerisinde endüktansın akım değerinde meydana gelen değişim;

$$(\Delta i_L(t))_K = \frac{V_g(t) - V_{r_L}(t) - V_{r_{DS}}(t)}{L} DT \quad (50)$$

S_1 anahtarının açık, S_2 anahtarının kapalı olduğu süre içerisinde ($T_{\text{açık}}=(1-D)T$), endüktans gerilimi $V_L(t)$;

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_g(t) - V_{r_L}(t) - V_{r_{DS}}(t) - V_{\zeta}(t) \quad (51)$$

(51)'de verilen denklem yardımıyla ($T_{\text{açık}}$) süresi içerisinde endüktansın akım değerinde meydana gelen değişim;

$$(\Delta i_L(t))_A = \frac{V_g(t) - V_{r_L}(t) - V_{r_{DS}}(t) - V_{\zeta}(t)}{L} (1-D)T \quad (52)$$

Bir endüktansın, anahtarların kapalı ve açık olduğu durumlardaki akım değişimi toplamı sıfır olmalıdır (Denge eşitliği). Diğer bir deyişle bir periyod boyunca endüktans üzerindeki toplam gerilim düşümü sıfır olmalıdır [104]. Şekil 33 (c) ve (d)'de endüktans geriliminin ve akımının değişimi açıkça gözlenmektedir. Buna göre (50) ve (52)'de verilen denklemler kullanılarak elde edilen doluluk-boşluk oranı veya çalışma oranı (D), (55)'te verilen eşitlik ile elde edilmektedir.

$$(\Delta i_L(t))_K + (\Delta i_L(t))_A = 0 \quad (53)$$

$$\frac{V_g(t) - V_{r_L}(t) - V_{r_{DS}}(t)}{L} DT + \frac{V_g(t) - V_{r_L}(t) - V_{r_{DS}}(t) - V_{\zeta}(t)}{L} (1-D)T = 0 \quad (54)$$

(54)'te verilen eşitlik düzenlendiğinde, çıkış gerilimi ve giriş gerilimi arasındaki bağıntı (55)'te ifade edildiği gibi olur.

$$D = \frac{V_{\zeta}(t) + V_{r_L}(t) + V_{r_{DS}}(t) - V_g(t)}{V_{\zeta}(t)} \quad (55)$$

(55)'te verilen eşitlik için endüktansın seri eşdeğer direnci (r_L) ve mosfetin iletim direnci (r_{DS}) ihmal edilirse çalışma oranı aşağıda verilen eşitlik ile gösterilir.

$$D = \frac{V_{\zeta}(t) - V_g(t)}{V_{\zeta}(t)} = 1 - \frac{V_g(t)}{V_{\zeta}(t)} \quad (56)$$

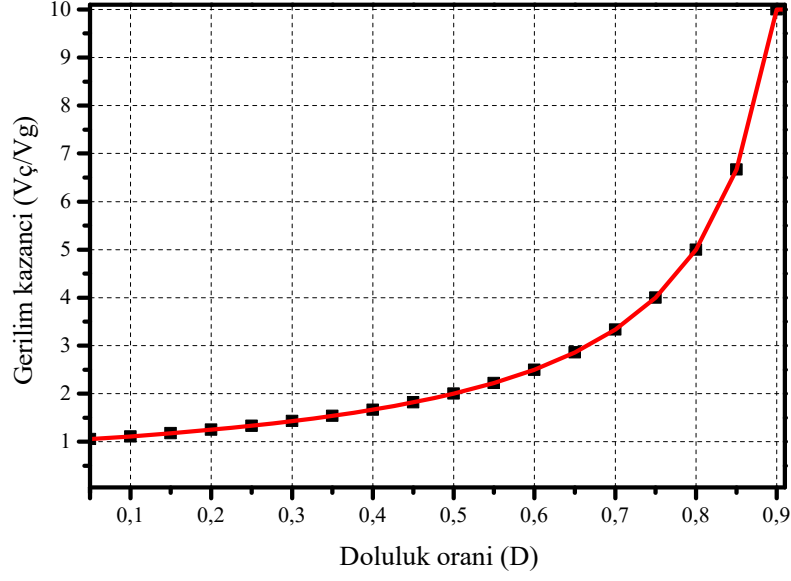
(56)'da verilen eşitlik gerilim kazancı olarak yazılırsa aşağıda verilen bağıntı elde edilmektedir.

$$\frac{V_{\zeta}(t)}{V_g(t)} = \frac{1}{1-D} \quad (57)$$

(57)'yi kullanılarak, SARÇ'ın gerilim kazancı (V_{ζ}/V_g)-doluluk oranı (D) karakteristik grafiği Şekil 34'te verilmektedir.

2.3.2.2.2. SARÇ Tasarımı

Tez kapsamında tasarlanan sistemde, DED'den elde edilen düzensiz gerilimin regüle edilerek DA-baraya aktarılmasında kullanılacak olan SARÇ devresine ait tasarım değerleri Tablo 8'de verilmektedir. Tasarımda kullanılan pasif devre elemanlarının değerleri [104]'te verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 34. SARÇ gerilim kazancı ($V_{\ç}/V_g$)-doluluk oranı (D) karakteristiği

Tablo 8’de verilen değerler için hesaplanan maksimum-minimum çalışma oranı ve yük değeri;

$$D_{\max} = 1 - \frac{V_{g(\min)}}{V_{\ç}} = 1 - \frac{11}{18} = 0.388 \quad (58)$$

$$D_{\min} = 1 - \frac{V_{g(\max)}}{V_{\ç}} = 1 - \frac{17}{18} = 0.055 \quad (59)$$

Tablo 8. SARÇ tasarım değerleri

| $V_{g(\max)}$ | $V_{g(\min)}$ | $V_{\ç}$ | $I_{\ç(\max)}$ | $I_{\ç(\min)}$ | f_s | $V_r/V_{\ç}$ |
|---------------|---------------|----------|----------------|----------------|-------|--------------|
| 17V | 12V | 18V | 5A | 0.5A | 20kHz | $\leq 1\%$ |

$$R_{Y(\max)} = \frac{V_{\ç}}{I_{\ç(\min)}} = \frac{18}{0.5} = 36\Omega \quad (60)$$

$$R_{Y(\min)} = \frac{V_{\zeta}}{I_{\zeta(\max)}} = \frac{18}{5} = 3.6\Omega \quad (61)$$

20 kHz anahtarlama frekansı ile sürekli endüktör akımı (i_L) için gerekli endüktans değeri aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$L_{SARÇ} \geq \frac{2R_{Y(\max)}}{27f_s} = \frac{(2)36}{27 \times 20 \times 10^3} = 0.133mH \quad (62)$$

(62)'de yapılan hesaplamalara göre endüktans değeri 0.133 mH'den fazla olmalıdır. Tasarım için 0.28 mH/0.095 Ω 'luk bir endüktans kullanılmıştır.

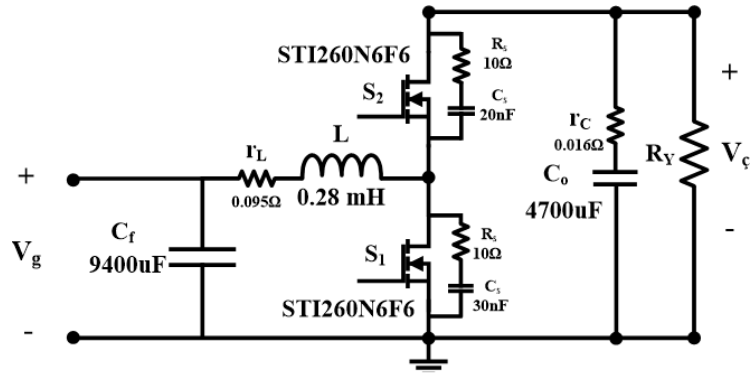
Çıkış gerilimindeki dalgalanma gerilimi ($V_r/V_{\zeta}=\%1$, $V_r=0.18$) kondansatör ve kondansatörün eşdeğer seri direnci üzerinde yarı yarıya paylaşılmaktadır ($V_{cpp}=0.18/2=0.09$). Bu durumda tasarımda kullanılacak minimum kondansatör değeri;

$$C_{SARÇ} \geq \frac{D_{\max}V_{\zeta}}{V_{cpp}R_{Y(\min)}f_s} = \frac{(0.388)18}{(0.09)(3.6)(20 \times 10^3)} = 1077\mu F \quad (63)$$

(63)'te verilen hesaplamalara göre çıkış kondansatörünün minimum değeri 1077 μF olarak hesaplanmıştır. Devre tasarımında çıkış filtre kondansatörü 4700 μF /0.016 Ω kullanılmıştır. Tasarlanan SARÇ devresine ait detaylı şematik gösterim ve deneysel devre görüntüsü Şekil 35'te verilmektedir. Ayrıca tasarımda kullanılan baskı devre çizimi Ek bölümünde sunulmaktadır.

2.3.2.2.3. SARÇ Devresinin Modelleme Başarımı

Bu başlık altında Matlab/Simulink ortamında modellenen SARÇ devresinin sonuçları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak modellenen sistemin başarımı irdelenmiştir. Benzetim ortamında modellenen SARÇ devresi Şekil 36'da gösterilmektedir.

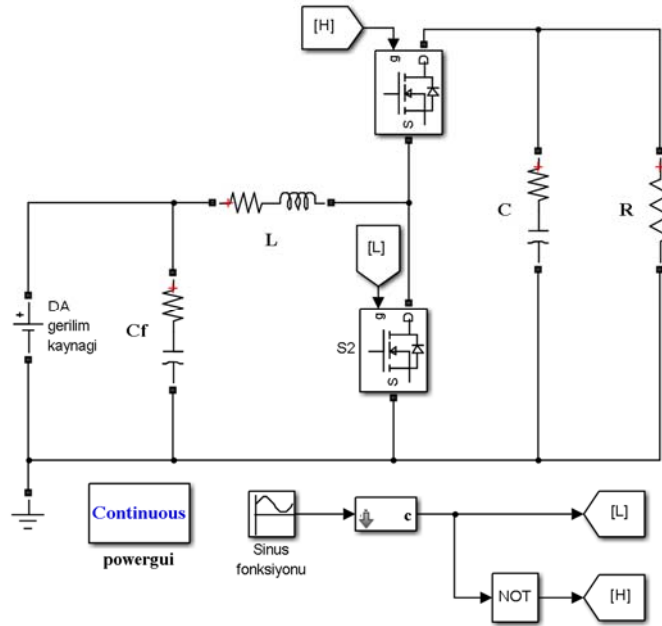


(a)



(b)

Şekil 35. (a) SARÇ detaylı devre şeması ve (b) deneysel devre görüntüsü

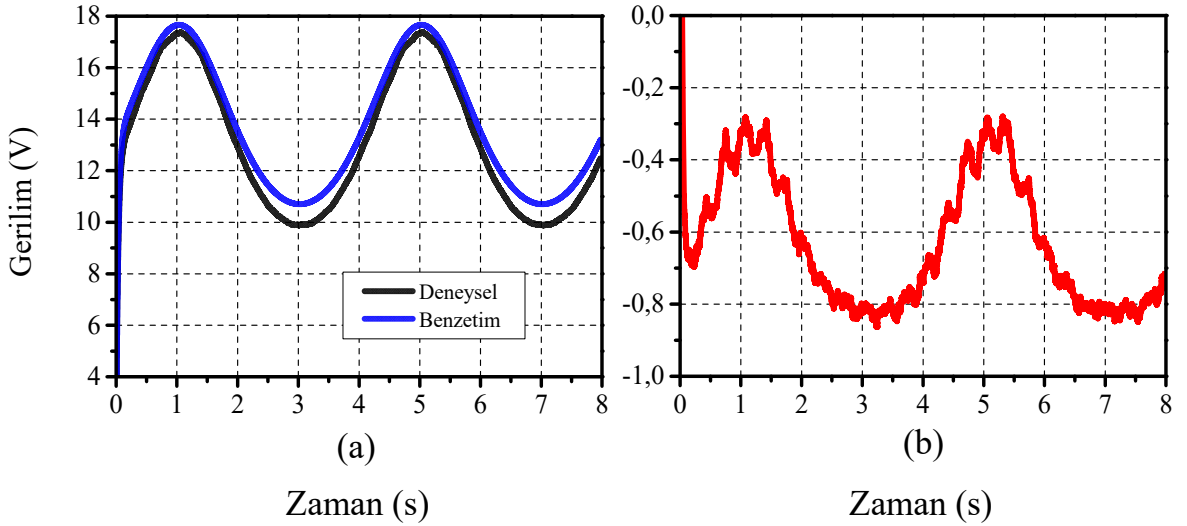


Şekil 36. Benzetim ortamında modellenen SARÇ devresi

Benzetim modeli ve baskı devresi alınan SARÇ girişine doluluk-boşluk oranı olarak bias değeri 0.3, periyodu 4 saniye ve genliği 0.2 olan bir sinüs sinyali uygulanmıştır. Deney aşamasında yük direnci 20Ω ve giriş gerilimi değeri ise 10 V olarak alınan sabit parametrelerdir. Giriş olarak uygulanan doluluk-boşluk oranına ait matematiksel ifade (64)'te verilmektedir. Elde edilen grafiksel sonuçlar ise Şekil 37'de gösterilmektedir.

$$d(t) = 0.2 \sin(0.5\pi t) + 0.3 \quad (64)$$

Şekil 37'den görüldüğü üzere elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın değerler vermektedir. Ortalama 0.5V'luk bir modelleme hatası ile sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir.



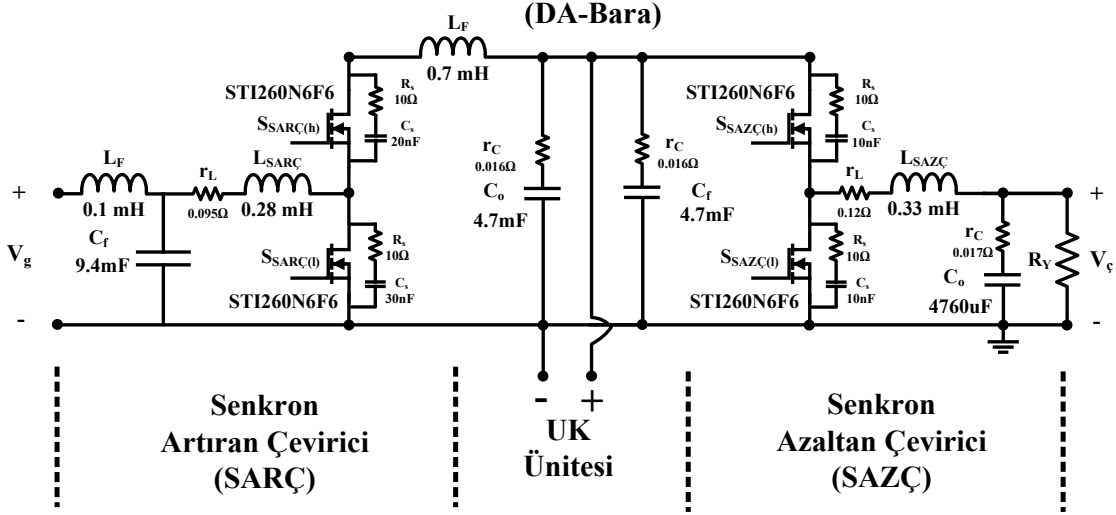
Şekil 37. (a) Benzetim modeli ve deneysel SARÇ devresinin sistem yanıtları, (b) modelleme hatası

2.3.2.3. Seri Bağlı Senkron Azaltan-Artıran Çevirici Yapısı

Seri bağlı senkron azaltan-artıran çevirici (SBSAAÇ) yapısı, SARÇ devresi ile SAZÇ devresinin arka arkaya bağlanması ile elde edilmiştir. SARÇ, DED ile DA-bara arasında yer almakta ve DED'de üretilen doğrultulmuş düzensiz DA gerilimin düzenlenerek DA-baraya aktarılmasında kullanılmaktadır.

Seri bağlı çevirici yapısının, SAZÇ kısmı ise DA-bara ile yük arasında yer almaktadır. SAZÇ, DA-bara gerilimini işleyerek yük geriliminin istenilen seviyede tutulması için farklı

denetim algoritmaları ile kontrol edilmektedir. SBSAAÇ yapısına ait detaylı şematik gösterim Şekil 38’de verilmektedir. Devre elemanlarının hesaplanması ile ilgili açıklama çeviricilere ait bölümde sunulmuştur.



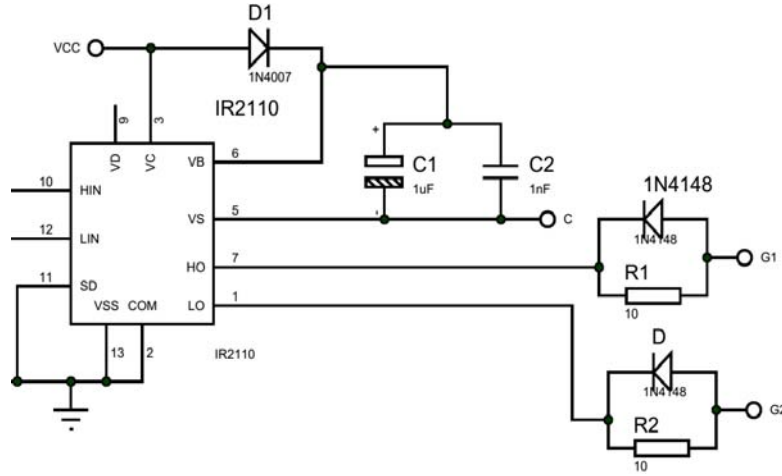
Şekil 38. Tasarlanan SBSAAÇ yapısının devre şeması

Çeviricilerin tasarımında anahtarlama elemanı olarak N-kanal mosfet (STI260N6F6) tercih edilmiştir [105]. Kullanılan mosfetin iletim durumundaki drain-source direnci ($R_{DS(on)}$) 3 m Ω 'dur. Bu değerin çok küçük olması ortaya çıkan kayıpları azaltarak önerilen güç elektroniği ara yüzünün yüksek verimde olmasını sağlamaktadır. Ayrıca tasarımında mosfetin drain-source arasına bağlanan ve anahtarlama anlarında görülen gerilim sıçramalarını engellemek için R-C sönümlendirme devresi tasarımı da gerçekleştirilmiştir.

$S_{SARÇ(L)}$ ve $S_{SAZÇ(L)}$ anahtarlarının kaynak (S) ucu toprağa bağlı olduğu için alçak taraf sürücü ile (low side driver), $S_{SARÇ(H)}$ ve $S_{SAZÇ(H)}$ anahtarlarının kaynak uçları ise diğer anahtarların drain uçlarına bağlı olduğu için yüksek taraf sürücü (high side driver) ile sürülmektedir. Devre tasarımında hem alçak hem de yüksek tarafı sürebilen, içerisinde yüksekten-alçağa ve alçaktan-yükseğe geçen DGM sinyallerinin çakışmaması için ölü zaman bulunan bir sürücü entegre kullanılmıştır. Çeviricilerde kullanılan anahtarları iletime ve kesime almak için kullanılan sürücü devresi gelecek bölümde sunulmaktadır.

2.3.3. Sürücü ve Optik Yalıtım Devresi

Kontrol biriminden alınan DGM çıkış sinyalinin gücü, önerilen çevirici yapısında yer alan mosfet anahtarlama elemanlarını sürmek için yetersiz kalmaktadır. Bununla birlikte, birbirlerinin eşleniği olarak çalışan anahtarlar aynı anda birlikte iletimde olmamalıdır. Kullanılan mosfetin iletim direnci çok düşük olduğu için anahtarların aynı anda kapalı olması kaynak tarafından çok yüksek büyüklükte akım çekilmesine neden olacaktır. Bu durumda hem kaynağın hem de devre elemanlarının bozulmasına neden olabilir [106]. Bu nedenle, her iki çeviricide de, yüksek ve alçak taraf mosfetleri sürmek ve anahtarlar arasındaki geçişte ölü zamanı dikkate almak için IR2110 entegresi kullanılmaktadır. IR2110, yüksek güçlü ve yüksek hızlı mosfet veya IGBT anahtarlama elemanlarını sürmek için kullanılan ve içeriğinde birbirinden bağımsız hem yüksek taraf sürücü hem de alçak taraf sürücü olan bir sürücü entegredir [107]. Sürücü devresine ait şematik gösterim Şekil 39'da verilmektedir.



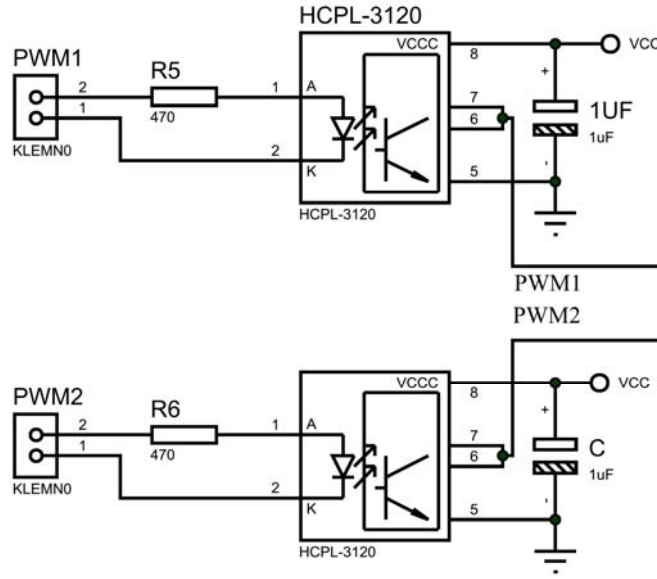
Şekil 39. IR2110 sürücü devresi

Yukarıda verilen şekilde D_1 ve C_1 - C_2 bootstrapping diyotu ve kondansatörleridir. C_1 ve C_2 kondansatörleri, D_1 diyotu üzerinden şarj olarak, yüksek taraf mosfetin sürülmesinde kullanılmaktadır. Yüksek taraf sürücü sinyali entegrenin 10. pininden, alçak taraf sürücü sinyali entegrenin 12. pininden uygulanmaktadır. Şekil 39'da (c) ile sembolize edilen uç, yüksek ve alçak taraf mosfetlerin birbirlerine bağlandığı noktaya, (g_1) ucu yüksek taraf

mosfetin kapısına ve (g_2) ucu alçak taraf mosfetin kapısına bağlanmaktadır. Her bir çevirici devresi için ayrı bir sürücü devresi tasarlanmıştır.

dSPACE kontrol ünitesinden üretilen DGM sinyalleri direkt olarak sürücü devreye bağlanmamaktadır. Olası bir kısa devre durumunda kontrol kartının zarar görmemesi için HCPL 3120 entegresi kullanılarak optik yalıtım devresi tasarlanmıştır. HCPL 3120 entegresi, mosfet ve IGBT sürmek içinde kullanılabilen bir optokuplör entegresidir [108].

Tasarlanan optik yalıtım devresinin şematik gösterimi Şekil 40'ta verilmektedir. Her bir DGM sinyali için yani her bir mosfet için ayrı bir optik yalıtım devresi tasarlanmıştır.



Şekil 40. DGM sinyali için kullanılan optik yalıtım devresi

2.3.4. Akım-Gerilim Bilgisi Ölçüm Kartı

DA hat ve çıkış yükü akım ve gerilim ölçümleri için LEM marka LA-25P (25 A, dönüştürme oranı 1:1000) ve LV-25P (500 V, dönüştürme oranı 2500:1000) akım ve gerilim transdüserleri kullanılmaktadır. Doğrusallıklarının ve hassasiyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle bu transdüserler birçok uygulamada tercih edilmektedir. Gerilim ve akım transdüserlerinin beslemesinde simetrik (± 12 V) güç kaynağı kullanılmaktadır. Ölçüm kartlarının çıkış gerilimleri ise çıkış direnci ile elde edilmektedir.


2.4. Ultra Kondansatör

Bu başlık altında, tez kapsamında dalga enerji sistemlerinde görülen gerilim düşümlerini ve enerji süreksizliğini gidermek için kullanılan ultra kondansatör (UK) enerji depo ünitesinin genel özellikleri, literatürde yer alan UK modelleri, UK modelleme süreci ve modelleme başarımı sunulmaktadır.

2.4.1. UK Karakteristik Özellikleri

Elektrokimyasal kondansatörler diğer isimleriyle ultra kondansatörler (UK) veya süper kondansatörler, elektrik alan içerisinde enerjiyi depolamaktadır. Tıpkı bataryalar ve kondansatörler gibi tekrar şarj edilebilme özelliğine sahip olan enerji depolama üniteleri olarak kullanılmaktadır [109].

Ultra kondansatörlerin güç yoğunluğu bataryalardan yüksektir. Fakat enerji yoğunlukları bataryalara göre daha düşüktür [109]. Bu şu anlama gelmektedir, aynı hacimdeki bir batarya ile UK incelendiğinde, batarya daha fazla enerji depolayabilmektedir. Fakat UK hızlı bir şekilde daha yüksek güç çıkışı sağlamaktadır. Aynı zamanda UK düşük empedansa sahip olduğu için ısı kayıpları da diğer depo ünitelerine karşı çok düşüktür. Aşağıda verilen şekilde bir kondansatör ve ultra kondansatörün depolanan enerji ve kaybolan enerji bakımından karşılaştırılması gösterilmektedir. Örnek olarak, kondansatör için (25 V- 2200 uF- $R_{esd}=18 \text{ m}\Omega$) değerleri, UK için ise (2.5 V-2600 F- $R_{esd}=0,7 \text{ m}\Omega$) değerleri seçilmiştir. Kaynaktan 10 A çekilen bir uygulama için kayıp güç yani ısıya dönüşen güç hesabı da aşağıda verilen şekilde gösterilmektedir.



$$E_{\max(k)} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (2200 \times 10^{-6}) (25^2) = 0.68 \text{ J}$$

$$P_{\text{ısı}(k)} = I^2 R_{esd} = (10^2) (0.018) = 1.8 \text{ W}$$

$$E_{\max(uk)} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (2600) (2.5^2) = 8.125 \text{ K J}$$

$$P_{\text{ısı}(uk)} = I^2 R_{esd} = (10^2) (0.0007) = 0.07 \text{ W}$$

Şekil 41. Klasik kondansatör ve UK'nın depo edilen enerji ve ısı kaybı açısından karşılaştırılması

Şekil 41’de görüldüğü üzere UK, klasik kondansatöre göre daha az güç kaybı ortaya çıkarmakta ve depo ettiği enerji miktarı ise çok yüksek bir değerdir.

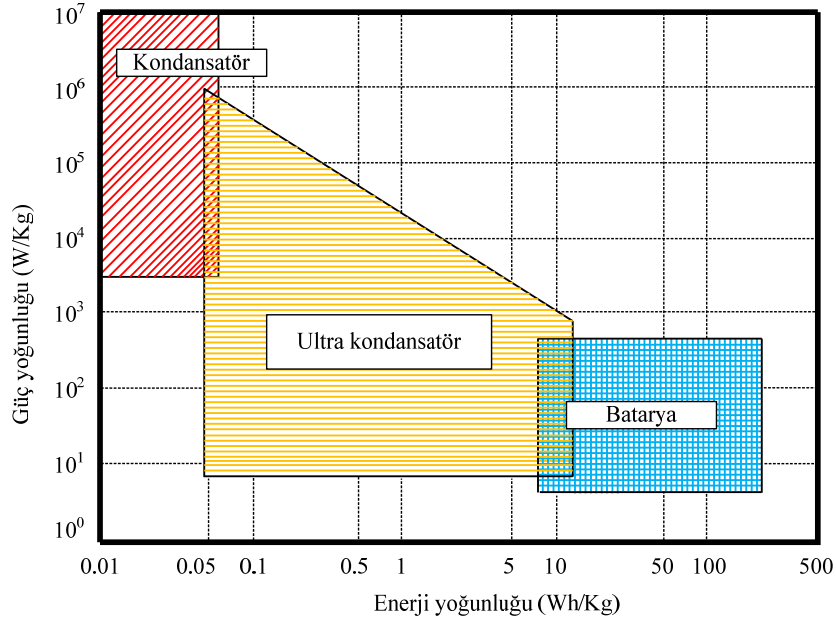
Bataryalar kimyasal reaksiyonlar ile enerjiyi depolarken, UK ise elektrot yüzeyi sayesinde elektrostatik depolama yapmaktadır. Bu yüzden hızlı bir şekilde şarj/deşarj olabilmektedirler. Klasik kondansatör, ultra kondansatör ve bataryanın bazı performans özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 9’da verilmektedir [110].

Tablo 9. UK, kondansatör ve bataryanın bazı performans özellikleri bakımından karşılaştırılması [110]

| Performans ölçütü | Kondansatör | Ultra kondansatör | Batarya |
|--------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------|
| Şarj süresi | 10^{-3} - 10^{-6} dakika | 0.3-30 dakika | 1-5 saat |
| Deşarj süresi | 10^{-3} - 10^{-6} dakika | 0.3-30 dakika | 0.3-3 saat |
| Enerji yoğunluğu (Wh/Kg) | <0.1 | 1-10 | 10-100 |
| Şarj/deşarj ömrü | >500.000 | >500.000 | 1000 |
| Güç yoğunluğu (W/kg) | <100.000 | <10.000 | <1.000 |
| Şarj/deşarj verimliliği | >0.95 | 0.85-0.98 | 0.7-0.85 |

Tablo 9’da verilen veriler incelendiğinde UK’nın, klasik kondansatör ile batarya arasında karakteristik özellikler gösterdiği anlaşılmaktadır. Tablo 9’da görülen güç ve enerji yoğunluklarının klasik kondansatör, ultra kondansatör ve batarya için grafik üzerinde gösterimi Şekil 42’de verilmektedir [111].

UK’lar çok yüksek güçleri çok yüksek hızla depolayabildikleri ve istendiğinde yine çok yüksek hızla depoladıkları enerjiyi yüke aktarabildikleri için güç sistemlerinde karşılaşılan gerilim düşümü ve kısa süreli gerilim kesintileri gibi geçici durumların giderilmesinde kullanılmaktadır [112]. Bu özelliğiyle dalga enerji sistemlerinde de sıkça görülen gerilim düşümlerinin giderilerek yükün beslenmesinde sürekliliğinin artırılması için tez kapsamında UK kullanımı uygun görülmüştür. Ayrıca DA-bara üzerine bağlanacak olan UK yardımıyla gerilim kararlılığının sağlanması da hedeflenmektedir.



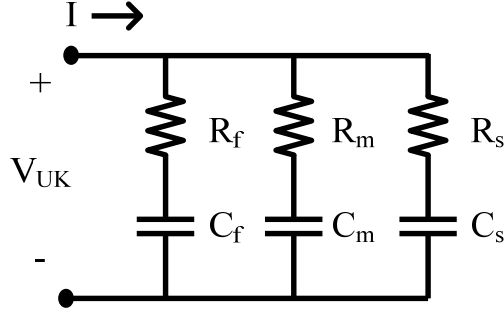
Şekil 42. Kondansatör, UK ve bataryanın güç ve enerji yoğunluklarının karşılaştırılması [111]

2.4.2. UK Modelleri

Bu başlık altında literatürde yer alan UK modelleri verilmektedir. Model yapılarında gösterilen R direnci, C ise kondansatörü sembolize etmektedir.

2.4.2.1. RC Paralel Kol Modeli

Bu model şarj ve deşarj anında mevcut UK davranışını modellemek için yapılmıştır. Bu modeli benzetmek için 3 farklı RC zaman sabitine ait kol birbirine paralel olarak bağlanmıştır. İdealde, üçten fazla kolun paralel bağlanması sistemi daha iyi benzetmeye yardımcı olacaktır. Fakat kol sayısı arttıkça sistem karmaşıklaşmaktadır. Yapılan çalışmalarda modelin doğruluğunu tam anlamıyla ortaya koymak için iki veya üç adet kolun paralel bağlanarak sistemin modellenmesi önerilmiştir [113]. Bu modelleme yöntemine ait gösterim Şekil 43'te gösterilmektedir.

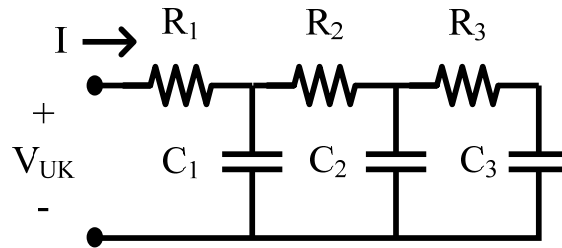


Şekil 43. UK paralel RC kol modeli

Şekil 43'te görüldüğü üzere, her bir kolun farklı bir zaman sabiti vardır. Bu kollar kendi arasında hızlı, orta ve yavaş olmak üzere üçe ayrılmaktadır. R_f-C_f kolu hızlı, R_m-C_m kolu orta ve son olarak R_s-C_s kolu ise uzun dönemi ifade etmektedir. Hızlı kol, anlık yani birkaç saniyelik şarj ve deşarj anındaki durumu modellemek, orta kol birkaç dakikalık dolma-boşalma durumunu modellemek ve uzun dönem kolu ise şarj-deşarj süresi 10 dakikadan uzun olan durumlar için kullanılmaktadır [113]. Model şarj ve deşarj durumlarında iyi bir UK dinamik davranışı sağlamaktadır. Yukarıda bahsedilen direnç ve kapasite değerleri, basit bir deneysel test yardımıyla elde edilmektedir. Ayrıca, modelin doğruluğu RC klasik modele göre daha fazladır. Fakat yapılan varsayımlar nedeni ile düşük gerilimlerde %10'luk bir hata payı ortaya çıkmaktadır [113].

2.4.2.2. RC İletim Kol Modeli

Bu model De Levie tarafından sunulan, boşluklu elektrot teoriye dayanmaktadır [114]. UK'yı modellemek için iletim hat modeli referans olarak kullanılmıştır. UK modellenmesinde kullanılan üç kollu bir iletim hattı modeli Şekil 44'te gösterilmektedir.

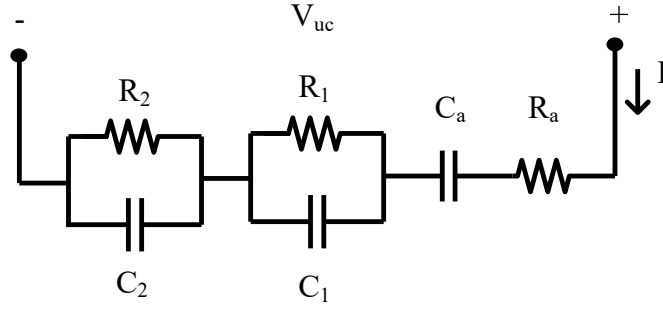


Şekil 44. UK Üç kollu RC iletim hattı modeli

Model UK'nın fiziksel yapı karakteristiğini direk olarak yansıtmaktadır. Modelde kullanılan parametreler, sabit akım testi ile hesaplanmakta, ayrıca modelleme için karmaşık analitik hesaplamalar gerekmektedir.

2.4.2.3. RC Seri-Paralel Kol Modeli

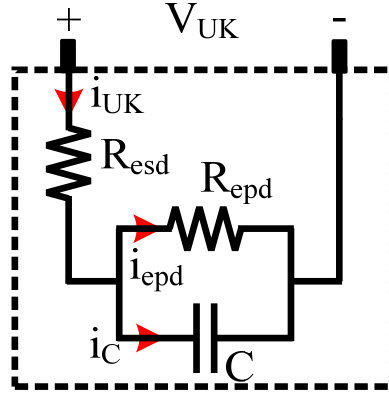
Seri-paralel RC kollardan oluşan model Şekil 45'te gösterilmektedir. Verilen şekilde, R_a eşdeğer seri direnci, C_a ve diğer paralel RC kolları ise UK'nın boşluk empedansını ifade etmektedir. [115]'te verilen çalışmada empedans spectroscopy test metodu ile şekilde görülen parametrelerin nasıl hesaplanacağı anlatılmaktadır.



Şekil 45. UK'nın RC seri-paralel kol modeli

2.4.2.4. Klasik RC Model

Bu yapıda UK basit bir RC devresi kullanılarak modellenmektedir. Şekil 46'da görüldüğü üzere model bir adet kondansatör ve iki adet direnç içermektedir. Bu dirençlerden ilki eşdeğer seri direnç R_{esd} , diğeri ise eşdeğer paralel direnç R_{epd} 'dir. R_{esd} , ultra kondansatör ünitesinin şarj/deşarj akımını sınırlamak ve bu durumlarda ortaya çıkan ısı kaybını modellemek için kullanılan iç direnci sembolize etmektedir. R_{epd} , ultra kondansatör ünitesinin zaman içerisinde kendi kendinedeşarj olma kayıplarını göstermek için kullanılmaktadır [116].



Şekil 46. UK'nın RC modeli.

Bu model tipinde UK'ya ait gerilim ile akım arasındaki ilişkiyi ifade eden eşitlik aşağıda verilmektedir.

$$V_{UK}(t) = i_{UK}(t)R_{esd} + \frac{1}{C} \int_0^t [i_{UK}(t) - i_{epd}(t)] dt + V_{UK(ilk)}(t) \quad (65)$$

Yukarıda verilen eşitlikte i_{UK} UK akımını, V_{UK} UK gerilimini ve $V_{UK(ilk)}$ UK'nın başlangıç şarj gerilimi ifade etmektedir.

Yüksek gerilim ve akım değerlerine sahip UK elde etmek için, UK hücrelerinin seri-paralel bağlantılı kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu model ile oluşturulacak olan UK ünitesinin dinamik davranışını verecek toplam kapasite ve toplam eşdeğer direnç formülleri aşağıda verilmektedir.

$$R_{\Sigma(UK)} = n_s \left(\frac{R_{esd}}{n_p} \right) \quad (66)$$

$$C_{\Sigma(UK)} = n_p \left(\frac{C}{n_s} \right) \quad (67)$$

Yukarıda verilen denklemlerde $R_{\Sigma(UK)}$ UK ünitesinin toplam seri eşdeğer direnci (Ω), $C_{\Sigma(UK)}$ UK ünitesinin toplam kapasitesi (F), n_s seri bağlanan kondansatör sayısı, n_p paralel bağlanan kondansatör sayısını ifade etmektedir.

2.4.3. UK Modelleme Başarımı

Bölüm 2.4.2.'de verilen UK modellerinin birbirilerine karşı iyi yönleri ve olumsuz yanları mevcuttur. Bu modellerin detaylı karşılaştırılması [117]'de verilmektedir.

Tez çalışması kapsamında UK'yı modellemek için klasik RC model kullanılmıştır. Bu modelin kullanılmasının nedeni tasarımının kolay olması, darbe yükleri ve yavaş deşarj uygulamaları için elverişli olmasıdır [117, 118].

Bu çalışmada enerji depo ünitesi olarak Maxwell BMOD0083-P048 kodlu UK modülü kullanılmıştır. UK modeline ait elektriksel ve fiziksel veriler Tablo 10'da verilmektedir. Kullanılan UK modülü her biri 1500F değerinde ve 1.5Wh maksimum enerji depolama kapasitesine sahip 18 adet UK hücresinin seri bağlı kombinasyonundan meydana gelmiştir [119].

Tablo 10. Maxwell BMOD0083-P048 UK özellikleri [119]

| | |
|------------------------------|------|
| Kapasite (F) | 83 |
| ESR ($m\Omega$) | 10 |
| Gerilim (V) | 48 |
| Güç yoğunluğu (W/kg) | 2700 |
| Mak. Enerji yoğunluğu(Wh/kg) | 2.6 |
| Ağırlığı (kg) | 10.3 |

Bir UK'da depo edilen enerji, terminalleri arasındaki gerilim değişimi ve kapasitesine bağlıdır. Bu duruma ait matematiksel eşitlik aşağıda verilmektedir.

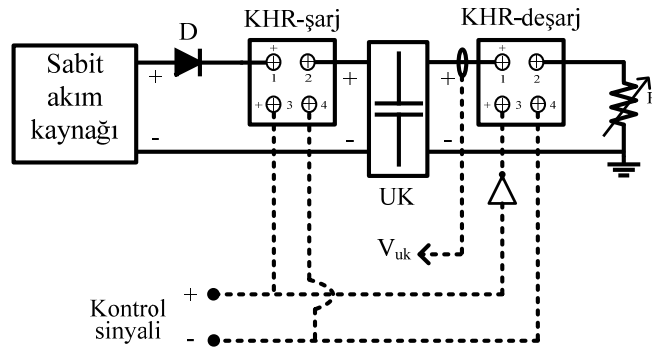
$$E_{UK} = \frac{1}{2} C_{UK} (V_{UK(son)}^2 - V_{UK(ilk)}^2) \quad (68)$$

(68)'de verilen eşitlikte $V_{UK(son)}$, UK'nın en son ölçülen gerilim değeridir. Yukarıda verilen eşitliğinde kullanılması ile UK'nın yüke sağlayabileceği güç eşitliği (69)'ta görüldüğü gibi elde edilir.

$$P_{YÜK} \Delta t = \frac{1}{2} C_{UK} (V_{UK(son)}^2 - V_{UK(ilk)}^2) \eta_c \quad (69)$$

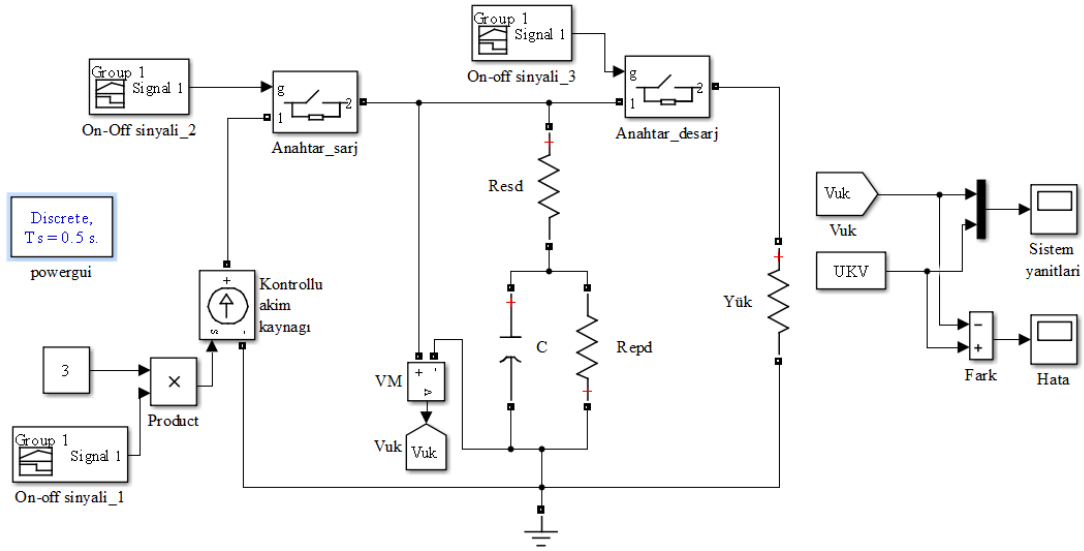
$P_{YÜK}$ yükün ihtiyaç duyduğu güç değeri, η_c UK'nın girişine bağlı olduğu DA-DA SAZÇ'nin verimi olarak ifade edilmiştir. UK'nın ilk gerilim değeri ve son gerilim değeri sıra ile 18 ve 13 V, ortalama çevirici verimi %88 ve maksimum yük güç ihtiyacı 24 W (12Vx2A) olarak seçilirse, (69)'da verilen eşitlik yardımıyla, tek başına UK'nın çıkışı yaklaşık 4 dakika besleyebileceği hesaplanmıştır. Bu süre dalga enerjisinin kullanılması ve solar sistem ile UK'nın sürekli şarj halinde tutulması sağlanarak daha da artırılmaktadır.

UK benzetim modelinden elde edilen veriler ve gerçek zamanlı testler karşılaştırılarak modelleme hatası grafiksel olarak çizdirilmiştir. Şarj ve deşarj deneyleri için gerçekleştirilen kurulumun şematik gösterimi Şekil 47'de verilmektedir.

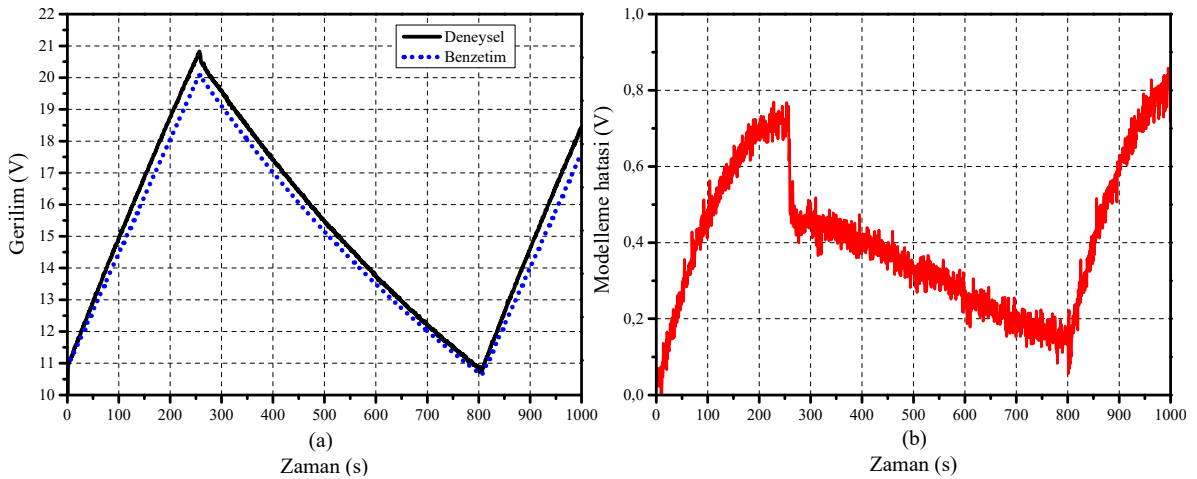


Şekil 47. UK şarj-deşarj testleri için yapılan deneysel kurulumun şematik gösterimi

Şekil 47'de görülen şematik iki kısımdan meydana gelmektedir. Birinci kısım UK şarj kısmıdır. Sabit akım kaynağı 3 A'ya ayarlanarak UK'nın şarj olması sağlanmaktadır. Bu durumda şarj rölesi (KHR-şarj) kapalı durumda, deşarj rölesi (KHR-deşarj) açık konumdadır. İkinci kısım ise UK deşarj kısmıdır. İlk durumda şarj edilen UK, bu kısımda deşarj edilmektedir. Bunun için UK'nın kaynak ile olan bağlantısı kesilerek, yani şarj rölesi açılarak, deşarj rölesi kapatılır. Böylece UK'nın uçlarına direnç yükü bağlı konuma gelir. Ayrıca şarj durumunda UK'dan kaynak tarafına akım akmasını engellemek amacıyla akım kaynağının çıkışına bir güç diyotu eklenmiştir. Bilgisayar ortamında kurulan model ise Şekil 48'de verilmektedir.

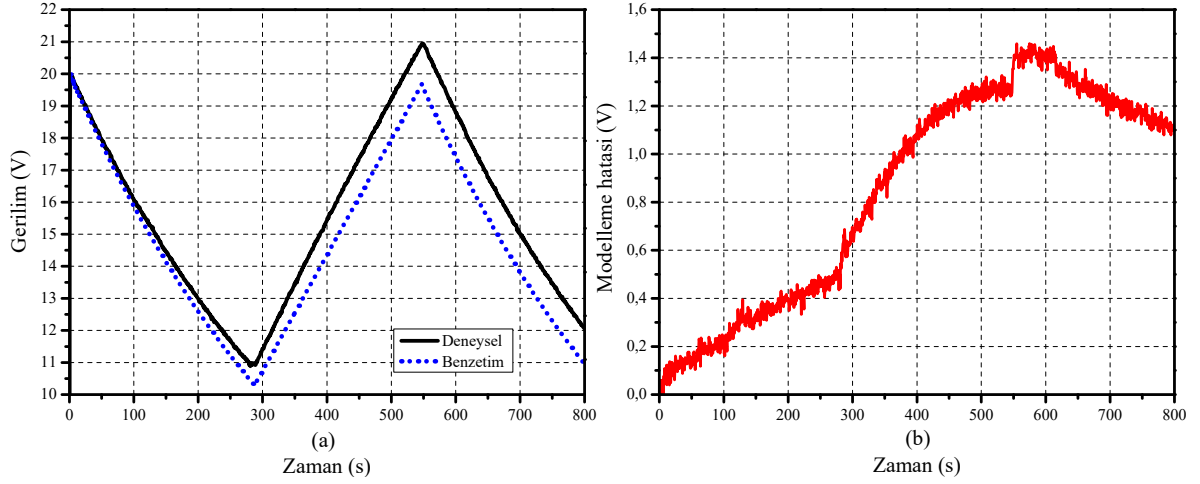


Şekil 48. Bilgisayar ortamında kurulan UK şarj-deşarj test modeli



Şekil 49. (a) UK şarj-deşarj eğrisi ve (b) modelleme hatası ($R=10.4 \Omega$)

Farklı yük altında UK şarj-deşarj benzetim sonuçları, deneysel sonuçlar ve modelleme hataları Şekil 49 ve Şekil 50'de verilmektedir. Şekil 49 (a)'da UK'nın şarj vedeşarj eğrisi verilmektedir. Deşarj direnci 10.4Ω olarak ayarlanan duruma ait modelleme hatası ise Şekil 49(b)'de gösterilmektedir. En yüksek modelleme hatası 0.8 V civarlarında elde edilmiştir. Şekil 50 (a)'da diğer bir UK şarj vedeşarj eğrisi görülmektedir. Deşarj durumu 5.2Ω 'luk direnç yükü ile sağlanmıştır. Modelleme hatası ise Şekil 50 (b)'de verilmektedir. Buna göre en yüksek hatanın 1.4 V civarlarında olduğu grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 50. (a) UK şarj-deşarj eğrisi ve (b) modelleme hatası ($R=5.2 \Omega$)

Literatürde yer verildiği gibi UK'nın modellenmesi için kullanılan klasik RC devresi yavaş deşarj olma durumlarında başarılı sonuçlar vermektedir. Deşarj durumunda UK'nın çıkışına bağlanan yük miktarı azaldıkça, modelleme hatasının arttığı açıkça grafiklerden görülmektedir.

2.4.4. UK Koruma ve Şarj Devresi

Tasarlanan sistemde gerilim farkından faydalanarak dalga enerjisinin yetersiz kaldığı anlarda DA-baraya bağlı UK ünitesi devreye girerek sistemin enerjisiz kalmasını engellemektedir. Tezde kıyıya vuran dalgalar dikkate alındığı için generatörde üretilen enerji küçük ölçekli olmaktadır. Bu durumda DED sistemi UK'yı şarj edemeyeceğinden, UK şarjı için güneş panelleri kullanılmaktadır. Güneş panellerinden üretilen enerji gerilim regülatörü ile düzenlenerek yaklaşık olarak 17.5 V DA değerinde sabit tutulmakta ve UK'nın şarj edilmesinde kullanılmaktadır. UK'nın eşdeğer seri direnci çok düşük olduğundan şarj edilmesi için sabit akım ayarı gerekmektedir. Tezde kullanılan fotovoltaik sistem sadece UK'nın şarjlı tutulabilmesi için kullanılan enerji destek birimidir. Bu nedenle detaylı bir şekilde tartışılmamıştır.

UK bağlantısı ile aynı zamanda bir adet DA katı hal rölesi de kullanılmıştır. Kullanılan katı hal rölesi (KHR) 100V - 20A elektriksel değerlere sahiptir. KHR UK'nın alt-gerilim korumasının sağlanmasında ve kısa devre olması durumunda UK'yı devreden ayırmak amacı ile kullanılmaktadır. Kısa devre korumasında UK'dan çıkan akım 5A'dan büyük olduğu zaman röle açılmaktadır. Alt-gerilim koruması ise UK'nın direk olarak hatta bağlandığı

çalışmalarda dikkate alınan diğer bir koruma tipidir. Bu durumda UK'nın şarj gerilimi 13V'nin altına düştüğü zaman, daha fazla deşarj olmasını engellemek için yine KHR yardımıyla hattan ayrılmaktadır. KHR sürücü devresi ve bağlantı terminallerine ait şematik ve baskı devre gösterimi Ek bölümünde verilmektedir. Devreye ait deneysel görüntü Şekil 51'de verilmektedir.



Şekil 51. UK koruma ve şarj devresi deneysel gösterimi

2.5. Fotovoltaik Enerji Destek Birimi

Tez kapsamında UK'nın sürekli şarj durumunda tutulması ve sistemin enerji sürdürülebilirliğinin artırılması için güneş panelleri kullanılmıştır. Güneş enerjisi sadece bir destek ünitesi olarak düşünüldüğünden detaylı bir şekilde incelenmemektedir. Benzetim çalışması için kullanılan model [120]'de verilmektedir.

2.6. Kontrol Ünitesi

Tez kapsamında kullanılan kontrol algoritmalarının gerçek zamanlı uygulaması ve gerilim-akım bilgilerinin bilgisayar ortamına aktarılmasında DS1104 kontrol kartı kullanılmaktadır. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan algoritmalar, DS1104'e yüklenerek sonuçlar elde edilmektedir.

DS1104 kontrol ünitesi genel olarak bilgisayarın PCI slotuna takılan kontrol kartı, bağlantı paneli (CP1104), bilgisayar ara yüz programı (ControlDeskNextGeneration, CDNG) ve USB aparatından meydana gelmektedir. DS1104 kontrol kartının temel özellikleri aşağıda verilmektedir [121].

- 8 adet, 16 bitlik, $\pm 10V$ çıkış aralığına sahip dijital-analog çevirici
- 8 adet, 16 ve 12 bitlik, $\pm 10V$ giriş aralığına sahip analog-dijital çevirici

- 2 adet bağımsız enkoder
- Kart üzerinde bir adet Slave (TMS320F240) işlemci
- Kart üzerinde bir adet Master (MPC8240) işlemci
- Diğer giriş-çıkış, zamanlama ve kesici özellikleri

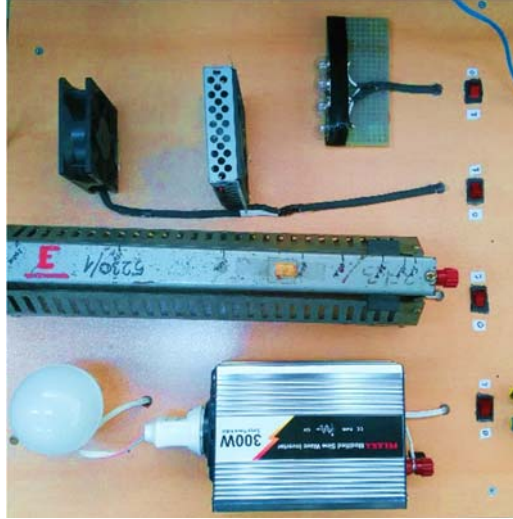
CDNG yazılımı kullanılarak hazırlanan grafiksel kullanıcı ara yüzü ile sistem çıkışları, gerilim-akım verileri, zaman bilgisi grafiksel veya sayısal olarak izlenebilmektedir. Ayrıca bu yazılım kullanılarak denetim kartının anlık çalıştırılması ve durdurulması da sağlanmaktadır. CDNG ara yüzüne ait bir gösterim Şekil 52’de verilmektedir.



Şekil 52. CDNG ara yüzüne ait bir gösterim

2.7. Yükler

Tez kapsamında DA yük olarak bir adet 12 Ω 'luk direnç, 12 V-0.5 A'lık DA lamba seti ve 2 adet 12 V-0.17 A'lık DA motor kullanılmıştır. Ayrıca, DED sisteminin çıkışına 300 W'lık bir evirici eklenerek AA bir lamba beslemesi de gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan yükler bir araya getirilerek aşağıda gösterilen yük seti oluşturulmuştur.



Şekil 53. Tez kapsamında kullanılan evirici, DA ve AA yükler

2.8. Denetleyici Yöntemleri ve Optimizasyon Algoritmaları

2.8.1. Giriş

Bu bölümde tez kapsamında tasarlanan denetleyiciler ve bu denetleyicilere ait parametrelerin ayarlanmasında kullanılan optimizasyon yöntemi verilmektedir. SAZÇ ve SARÇ devreleri istenilen DA bara ve yük gerilimlerini sağlamak için ayrı ayrı denetlenmektedir. Güç elektroniği devrelerinin denetiminde klasik oransal-integral-türev denetleyici (PID), kesir dereceli PID denetleyici ve bulanık mantık denetleyici (BMD) kullanılmaktadır. Bu denetleyicilerin parametrelerinin optimizasyonunda ise popülasyon tabanlı sezgisel arama algoritmalarından çiçek tozlaşması algoritması (ÇTA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması kullanılmaktadır.

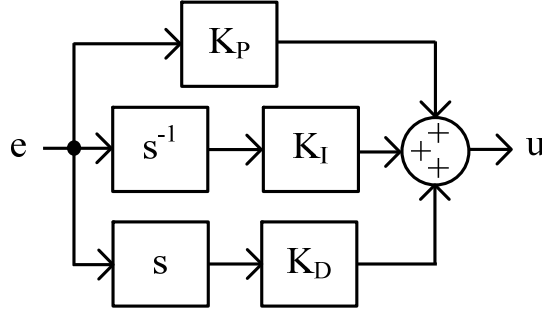
2.8.2. Denetleyici Yöntemleri

2.8.2.1. PID Denetleyici

Klasik PID denetleyicinin buluşu 1910 yılına dayanmasına rağmen, halen birçok kontrol probleminde istenilen geçici ve kalıcı durum yanıtlarının sağlanmasında sıkça kullanılmaktadır [122]. Öyle ki, kontrol sistemlerinin yaklaşık olarak %90'ında PID

denetleyici ve onun farklı kombinasyonları kullanılmaktadır [123]. Bunun temel nedeni ise denetleyici yapısının ve uygulamasının basit olmasından kaynaklanmaktadır [124].

PID denetleyicinin optimum şekilde ayarlanması gereken üç adet parametresi vardır. Bunlar sistem yanıtını hızlandırıcı veya yavaşlatıcı etkisi olan oransal katsayı (K_P), kalıcı durum hatasının giderilmesinde kullanılan integral katsayısı (K_I) ve aşımın bastırılmasını sağlayan türevsel katsayıdır (K_D). Klasik bir PID denetleyicinin Laplace çözüm kümesinde ifade edilen blok diyagramı gösterimi Şekil 54'te verilmektedir.



Şekil 54. Klasik PID denetleyicinin blok diyagramı gösterimi

Yukarıda verilen şekilde e hatayı, u kontrol sinyalini, s türev operatörünü ve s^{-1} integral operatörünü ifade etmektedir. PID denetleyiciye ait zaman çözüm kümesi eşitliği aşağıda gösterilmektedir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (70)$$

Klasik PID denetleyiciye ait transfer fonksiyonu ise (71)'de verilmektedir.

$$G_c(s) = P + I + D = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (71)$$

Yukarıda verilen eşitlikte T_I ve T_D sıra ile integral ve türev zaman sabitini ifade etmektedir. PID denetleyici ve onun türevleri kontrol uygulamalarında sıkça tercih edilmesine rağmen, birçok PID denetleyici pratikte iyi ayarlanamamaktadır [125, 126, 127].

Optimum bir şekilde ayarlanamayan denetleyici parametreleri nedeniyle denetleyiciler istenilen geçici ve kalıcı performans değerlerini sağlayamamaktadır.

2.8.2.2. Kesir Dereceli PID Denetleyici

Kesir dereceli integral-türev işlemleri kullanılarak farklı uygulama alanlarındaki birçok sistemin karakteristik yapısı daha iyi tanımlanabilmektedir [128]. Bu yüzden son yıllarda elektronik [129], robotik [130,131], kontrol sistemleri [132, 133], sinyal işleme [134, 135] ve benzeri bilim dallarında araştırmacılar kesir dereceli işlemlerin avantajından faydalanmaktadır.

Kesir dereceli integral ve türev işlemlerinin çözülebilmesi ile birlikte kesir dereceli PID denetleyicilerde türetilmiştir. Kesir dereceli işlemler, tamsayı olmayan dereceli türev ve integral fonksiyonlarının avantajını sağlamaktadır. Riemann-Liouville, Grunwald-Letnikov ve Caputo yaygın olarak kullanılan kesirli dereceli matematik tanımlamalarıdır [136]. α kesir dereceli bir $f(t)$ fonksiyonunun Riemann-Liouville (RL) türev tanımı aşağıda verilen denklemle ifade edilmektedir [137].

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \left(\frac{d}{dt} \right)^n \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1+\alpha-n}} d\tau, (n-1 < \alpha < n) \quad (72)$$

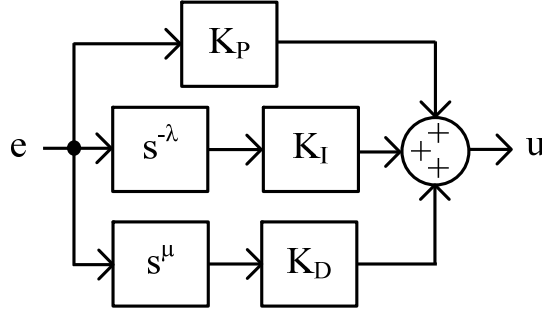
(72)'de verilen eşitlikte, ${}_a D_t^\alpha$ kesir dereceli türev operatörünü, a integralin alt sınırını, t integralin üst sınırını ve Γ Gama fonksiyonunu sembolize etmektedir. Gama fonksiyonunun matematiksel ifadesi (73)'te verilmektedir.

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (73)$$

(72)'de verilen ifadenin Laplace dönüşümü ise aşağıda verilen eşitlik ile gösterilmektedir.

$$\int_0^\infty e^{-st} {}_0 D_t^\alpha f(t) dt = s^\alpha F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^k {}_0 D_t^{\alpha-k-1} f(t) \Big|_{t=0} \quad (74)$$

KDPID denetleyici, klasik bir PID denetleyicide var olan parametrelere ek olarak 2 adet denetleyici parametresine daha sahiptir. Bunlar integral operatörünün kesir derecesi (λ) ve türev operatörünün kesir derecesi (μ)'dür. Bu ekstra parametreler sayesinde daha esnek ve hassas bir denetim yordamı elde edilirken, parametre sayısının artması denetleyici tasarımını zorlaştırmaktadır [138, 139]. KDPID denetleyiciye ait blok diyagramı gösterimi Şekil 55'te verilmektedir.



Şekil 55. KDPID denetleyicinin blok diyagramı gösterimi

Yukarıda verilen şekilde e hatayı, u kontrol sinyalini, K_p oransal katsayısını, K_I integral katsayısını, K_D türev katsayısını, s^μ kesir dereceli türev operatörünü, $s^{-\lambda}$ kesir dereceli integral operatörünü ifade etmektedir. KDPID denetleyiciye ait zaman çözüm kümesi eşitliği (75)'te gösterilmektedir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \frac{d^{-\lambda} e(t)}{dt^{-\lambda}} + K_D \frac{d^\mu e(t)}{dt^\mu} \quad (75)$$

KDPID denetleyicinin transfer fonksiyonu dönüşümü ise (76)'da verilmektedir.

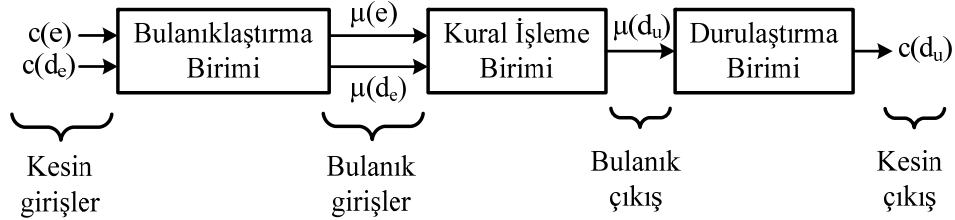
$$G_c(s) = P + I^\lambda + D^\mu = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D s^\mu \quad (76)$$

Tez kapsamında KDPID denetleyicinin kullanıldığı benzetim ve deneysel çalışmalarda FOMCON adı verilen bir Matlab/Simulink araç kutusu kullanılmıştır [140].

2.8.2.3. Bulanık Mantık Denetleyici

İlk olarak 1965 yılında L. A. Zadeh'in [141] önerdiği bulanık mantık teknolojisinin, Mamdani ve arkadaşları tarafından kontrol sistemlerine uygulanmasıyla bulanık mantık kavramı geniş bir uygulama alanı kazanmıştır [142, 143, 144]. Bulanık mantık algoritmasının denetleyici olarak kullanıldığı robotik uygulama, güç elektroniği devreleri, endüstriyel süreçler, elektriksel güç sistemleri [145-153] vb. birçok alan mevcuttur. Denetleyici olarak kullanılmasının yanında bulanık mantık yapısının karar verici mekanizması, sistem modellemesi, kestirim hesabı, optimizasyon problemi çözümü gibi mühendislik alanlarında da kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur [154-161].

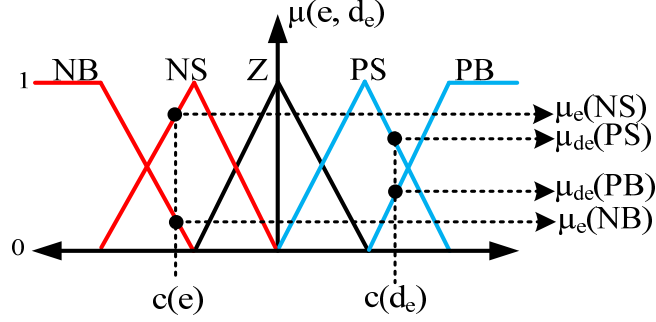
Tez çalışmasında bulanık mantık kavramı denetleyici olarak kullanılmaktadır. Bulanık mantık denetleyicilerin (BMD) kontrol sistemlerinde sıkça tercih edilmesinin başında BMD'lerin sistem bilgisine ihtiyaç duymadan yani sistemin modellenmesine gerek kalmadan, girişine uygun çıkış işareti üretebilmesi gelmektedir. Bulanık denetim, tıpkı bir uzmanın sistemi denetlemesi gibi işlemektedir [162]. BMD Şekil 56'da görüldüğü üzere bulanıklaştırma, kural işleme ve durulaştırma adı verilen üç ana birimden meydana gelmektedir. Gelecek alt başlıklarda bu temel birimler açıklanmaktadır.



Şekil 56. BMD temel yapısı

Bulanıklaştırma birimi klasik kümede tanımlanan $[0,1]$ kesin girişlerinin bulanıklaştırıldığı kısımdır [163]. Bu kesin girişler Şekil 56'da görüldüğü üzere $c(e)$ ve $c(de)$ şeklinde hata ve hatanın değişimidir. Negatif geri beslemeli kontrol sistemlerinde hata sinyali (e) istenilen sistem yanıtı (r) ile ölçülen sistem yanıtının (y) farkı olarak tanımlanırken, hatanın değişimi (de) hatanın şu anki değeri ile bir önceki değerinin farkıdır.

$\mu(e)$ ve $\mu(d_e)$ ise hata ve onun değişiminin karşılık geldiği bulanık kümelerdeki üyelik derecelerini ifade etmektedir. Bulanıklaştırma işlemine ait şematik bir gösterim Şekil 57’de verilmektedir.



Şekil 57. Bulanıklaştırma biriminin çalışma yapısı

Şekil 57’de görüldüğü üzere bulanıklaştırma ünitesine uygulanan kesin girişler, negatif büyük (NB), negatif küçük (NS), sıfır (Z), pozitif küçük (PS) ve pozitif büyük (PB) olmak üzere beş adet sözel ifadeye bölünmüş üçgen bulanık kümelerde üyelik derecelerine sahiptir. Bulanık kümeler üçgen, yamuk, Gauss, çan ve sigmoid fonksiyonları olarak kullanılabilir [164]. [164] ve [165]’te yapılan denetim çalışmalarında yukarıda adı geçen üyelik fonksiyonu tiplerinin BMD üzerinde ortaya çıkardığı performans sonuçları verilmektedir. Her iki makalede de üçgen tip bulanık kümenin diğer bulanık kümelere göre kalıcı hal hatası ve geçici durum yanıtı performansı açısından daha iyi yanıt verdiği belirtilmektedir. Bu iki makaleden yola çıkarak, tez kapsamında tasarlanan BMD’nin bulanıklaştırma biriminde üçgen üyelik fonksiyonu tercih edilmiştir.

Kural işleme ünitesinde bulanıklaştırılan giriş değerleri önceden belirlenen kurallara göre işleme alınmaktadır. Kural tablosunda yer alan kurallar “eğer...ise...” koşullu cümle yapısında sözel olarak tanımlanmaktadır. Örnek olarak aşağıda verilen kural cümleleri incelenebilir.

- Eğer girişler $e=NS_e$ ve $d_e=PS_{de}$ ise, çıkış $du=Z_{du}$
- Eğer girişler $e=NS_e$ ve $d_e=PB_{de}$ ise, çıkış $du=PS_{du}$
- Eğer girişler $e=NB_e$ ve $d_e=PS_{de}$ ise, çıkış $du=NS_{du}$
- Eğer girişler $e=NB_e$ ve $d_e=PB_{de}$ ise, çıkış $du=Z_{du}$

Yukarıda verilen kurallarda dört ayrı durum için, çıkışın alacağı bulanık değer kümeleri verilmektedir. BMD’de bu kurallar yardımıyla girişlere göre bir çıkış değeri belirlenmektedir. Ayrıca her bir girişin ve çıkışın kendilerine ait NB, NS, Z, PS ve PB ifadelerine sahip olduğu görülmektedir.

Bu kurallarda kullanılan “ve” bağlacı matematiksel işlemlerde kullanılan kümelerin kesişimi anlamına gelmektedir. x ve y girişleri için z çıkışı aşağıda verilen eşitlikte gösterilmektedir. BMD tasarımında birleşim ve bütünleme gibi farklı kural işlemleri de kullanılabilir [166].

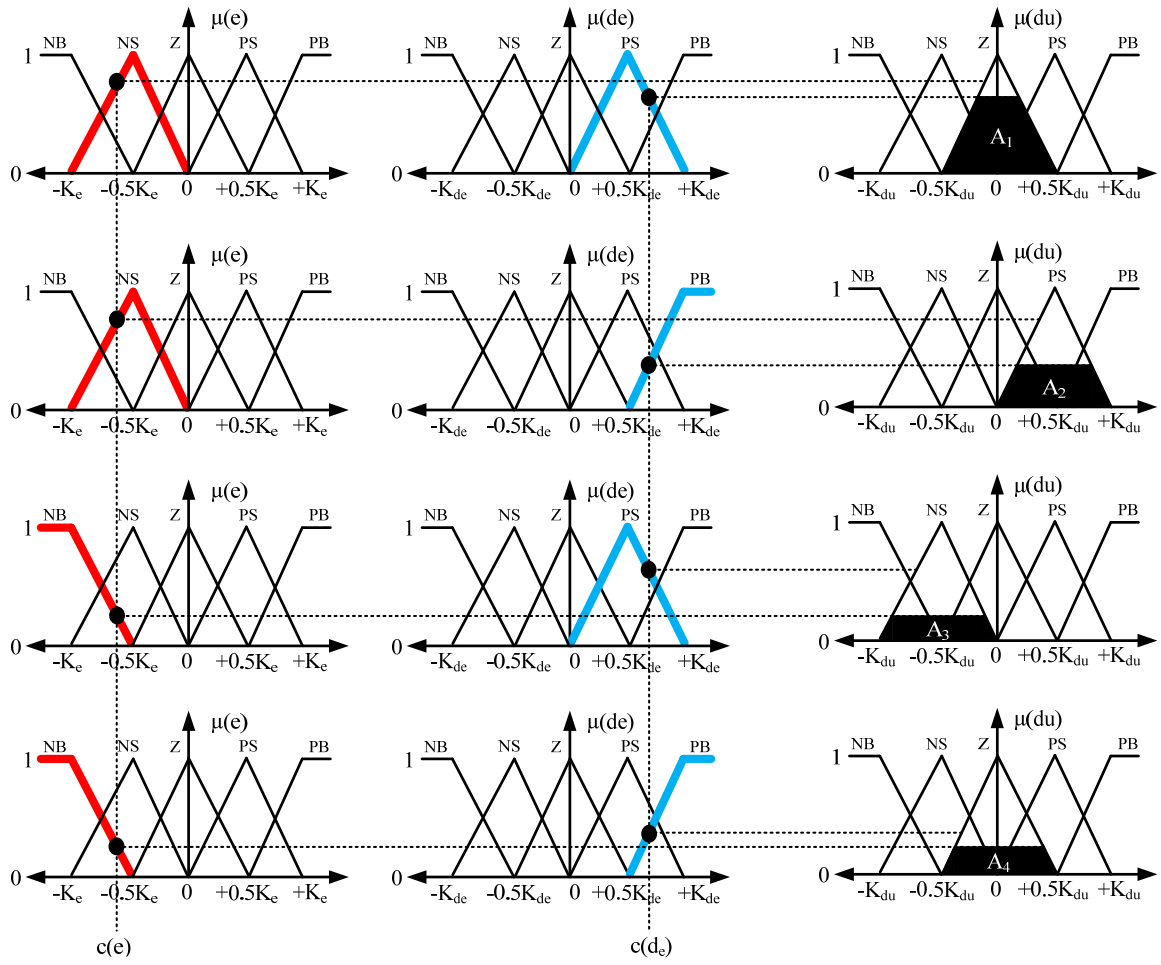
$$z = x \wedge y = \min(x, y) \quad (77)$$

Kesişim eşitliği yukarıda verilen dilsel kurallara uygulandığında, girişlere göre üretilen çıkış üyelik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

- $\min(\mu_{NS}(e), \mu_{PS}(de)) = \mu_Z(du)$
- $\min(\mu_{NS}(e), \mu_{PB}(de)) = \mu_{PS}(du)$
- $\min(\mu_{NB}(e), \mu_{PS}(de)) = \mu_{NS}(du)$
- $\min(\mu_{NB}(e), \mu_{PB}(de)) = \mu_Z(du)$

Bu birimde gerçekleştirilen sonuç çıkarım işleminin daha anlaşılır bir gösterimi Şekil 58’de verilmektedir. Kural işleme ünitesinde sonuç çıkarımı için Mamdani’nin maks-min metodu kullanılmıştır [167]. Aşağıda verilen şekilde de görüldüğü üzere maks-min metodu ile giriş değerleri için minimum yani kesişim işlemi yapıldıktan sonra elde edilen sonuçların maksimumu yani birleşimi işlemi yapılmaktadır. Birleşim işlemine ait gösterim durulaştırma bölümünde verilmektedir. Ayrıca, aşağıda verilen şekilde görülen K_e , K_{de} ve K_{du} katsayıları, girişler ve çıkış için kullanılan bulanık üçgen kümelerin sınır değerlerini belirtmektedir. Tez kapsamında kullanılan optimizasyon algoritması ile bu parametreler ayarlanmaktadır.

Tasarlanan BMD’de iki giriş beş farklı üçgen üyelik fonksiyonu ile temsil edilmektedir. Bu durum ise 25 (5x5) kurallı bir kural tablosunu oluşturmaktadır. Tablo 11’de girişlere göre çıkışın hangi kuralların işleme alınarak belirleneceğini gösteren kural tablosu yer almaktadır. Tablo 11’de farklı renkte işaretlenerek gösterilen kurallar, bir önceki sayfada verilen örnekte aktif olan kuralları (4-5-9-10) ifade etmektedir. Ayrıca, kural tablosunun oluşturulma aşamasında izlenecek yol [168]’de detaylı biçimde açıklanmıştır.

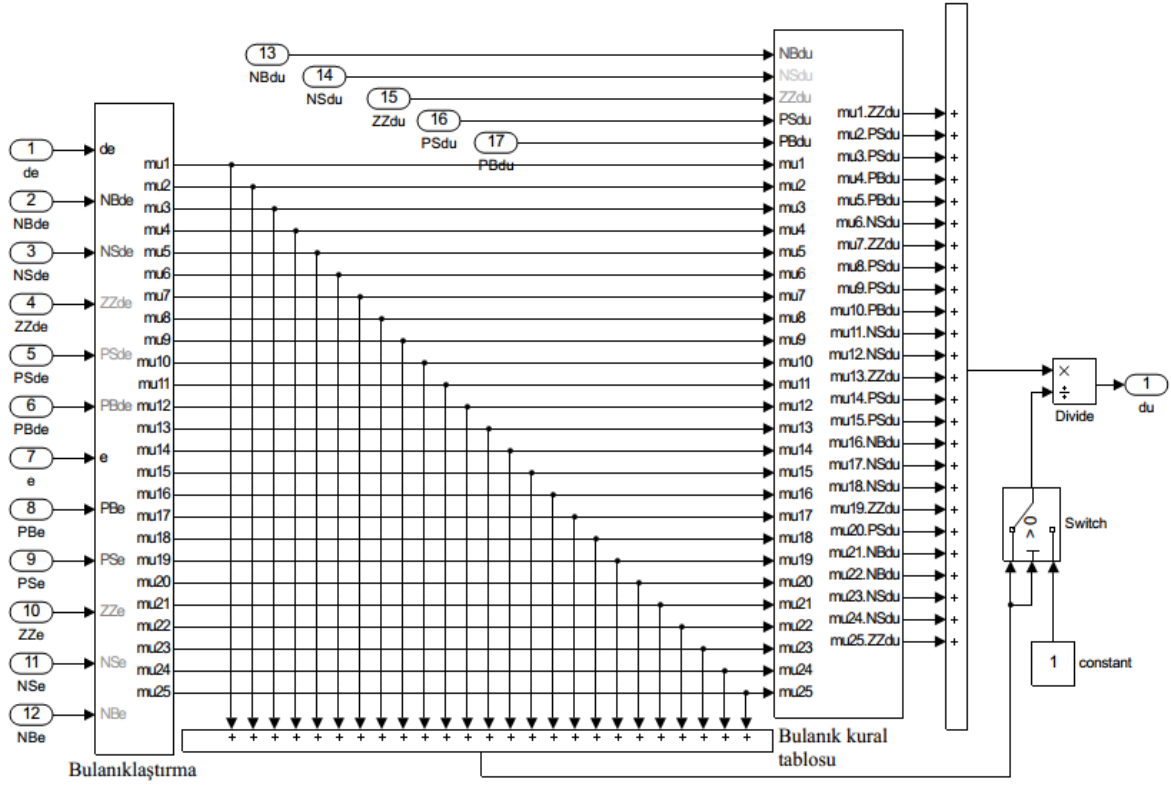


Şekil 58. Kural işleme ünitesinin çalışma yapısı

Tablo 11. 25 kurallı BMD kural tablosu

| | | Hatanın değişimi (d_e) | | | | |
|--------------|----|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | NB | NS | Z | PS | PB |
| Hata (e) | NB | NB ₁ | NB ₂ | NS ₃ | NS ₄ | Z ₅ |
| | NS | NS ₆ | NS ₇ | NS ₈ | Z ₉ | PS ₁₀ |
| | Z | NS ₁₁ | NS ₁₂ | Z ₁₃ | PS ₁₄ | PS ₁₅ |
| | PS | NS ₁₆ | Z ₁₇ | PS ₁₈ | PS ₁₉ | PB ₂₀ |
| | PB | Z ₂₁ | PS ₂₂ | PS ₂₃ | PB ₂₄ | PB ₂₅ |

Durulaştırma birimi BMD'nin son işlem basamağıdır ve bu birimde kural işleme ünitesinde elde edilen sonuçlar kesin değerlere dönüştürülür. Şekil 58'de verilen A_1 - A_2 - A_3 ve A_4 alanlarının maksimumu yani birleşim işlemi gösterimi Şekil 59'da verilmektedir.



Şekil 60. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan BMD yapısı

2.8.3. Optimizasyon Algoritması

2.8.3.1. Giriş

Son yıllarda matematik ve mühendislik alanlarında karşılaşılan birçok optimizasyon probleminin çözümünde farklı algoritma yöntemleri kullanılmaktadır. Nümerik tabanlı optimizasyon algoritmalarının ağır matematiksel işlemler içermesi, araştırmacıları sezgisel arama algoritmalarını kullanmaya yöneltmiştir [170].

Bu çalışmada PID (K_P , K_I , K_D), KDPID (K_P , K_I , K_D , λ , μ) ve BMD'ye (K_e , K_{de} , K_{du}) ait denetleyici parametrelerinin optimum değerlerini bulmak için çiçek tozlaşması algoritması (ÇTA) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır.

2.8.3.2. Çiçek Tozlaşma Algoritması

Çiçek tozlaşması algoritması (ÇTA) Yang X. S. tarafından literatüre kazandırılan ve çiçek açan bitkilerin tozlaşma sürecini konu alan popülasyon tabanlı, sezgisel ve iteratif bir

algoritmadır [171]. Güncel bir arama algoritması olmasına rağmen ÇTA güç sistemleri, parametre kestirimi, denetim sistemleri gibi bilimsel alanlarda başarıyla uygulanmıştır [172-176].

Doğada çapraz ve öz tozlaşma olmak üzere iki çeşit tozlaşma vardır. Çapraz tozlaşma aynı türde farklı tip bitkiler arasında gerçekleşirken, öz tozlaşma ise aynı bitkinin kendi kendini tozlaştırmasına denir. Aynı zamanda tozlaşma sırasında gerçekleşen polen transferi iki yol ile sağlanmaktadır. Bunlar biyotik ve abiyotik yani biyotik olmayan yollardır. Biyotik formda tozlaşma böcek ve hayvan gibi tozlaştırıcılar tarafından gerçekleştirilmektedir ve çiçekli bitkilerin tozlaşmasının %90'ı biyotik yollar ile sağlanmaktadır [171]. Abiyotik form ise herhangi canlı bir tozlaştırıcı içermeden rüzgâr ya da su difüzyonu vasıtasıyla gerçekleşen tozlaşma biçimidir. Ayrıca kuş, arı ve yarasa gibi canlılar tozlaşma süresince uzak mesafeler kat ederek çapraz tozlaşmayı gerçekleştirirler. Kuş ve arıların uçuş adımları ise Levy uçuşu karakteristiği göstermektedir.

Yukarıda yer alan bilgiler kullanılarak ortaya çıkan algoritma dört temel kural ile özetlenebilir. Bu kurallar sıra ile aşağıda verilmektedir.

1. Biyotik ve çapraz tozlaşma küresel tozlaşma süreci olarak kabul edilmektedir. Bu süreçte tozlaştırıcılar Levy uçuşu davranışı gösterirler.
2. Abiyotik ve öz tozlaşma yerel tozlaşma süreci için kullanılmaktadır.
3. Çiçek tozlaşmasının devamlılığı benzer iki tür arasındaki üreme olasılığı ile doğru orantılıdır.
4. Tozlaşmanın küresel veya yerel olacağı bir anahtarlama olasılık değeri (p) ile kontrol edilmektedir.

Yukarıda verilen ve algoritmanın temelini oluşturan bu kurallar matematiksel olarak aşağıda verilen denklemler ile ifade edilmektedir.

Yerel tozlaşmadaki çiçek tozlaşması süreci matematiksel olarak (79)'da ifade edilmiştir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \epsilon (x_j^t - x_k^t) \quad (79)$$

(79)'da verilen eşitlikte, t iterasyon sayısını, x_j^t ve x_k^t aynı tür bitkilerin farklı çiçeklerinden gelen polenleri ifade eder. Böylelikle sınırlı bir bölgedeki çiçek tozlaşma istikrarı benzetimi gerçekleştirilir. Eğer x_j^t ve x_k^t aynı popülasyondan seçilmiş aynı türler

arasından geliyorsa, bu durumda yerel rastgele yürüyüş modeli oluşmaktadır ($\in [0,1]$ düzgün dağılımlı) [171].

Küresel tozlaşmadaki çiçek tozlaşması süreci ise matematiksel olarak (80)'de verilen eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \gamma L(\lambda)(x_i^t - g_{best}) \quad (80)$$

Yukarıda verilen eşitlikte γ ölçekleme katsayısı, g_{best} güncel en iyi amaç fonksiyonu değeri ve $L(\lambda)$ Levy uçuşu temelli basamak büyüklüğünü ifade etmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılan algoritmanın akış diyagramı Şekil 61'de verilmektedir.

2.8.3.3. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Sezgisel ve olasılık tabanlı evrimsel optimizasyon yöntemlerinden biri olan parçacık sürü optimizasyon yöntemi Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiştir [177]. Bu yöntem kuş ve balık sürülerinin hareketlerinden esinlenilerek çok parametrelili, çok değişkenli ve doğrusal olmayan nümerik problemlerin çözülmesinde kullanılmaktadır. Yöntemin işleyiş süreci ve ana basamakları sırayla aşağıda verilmektedir.

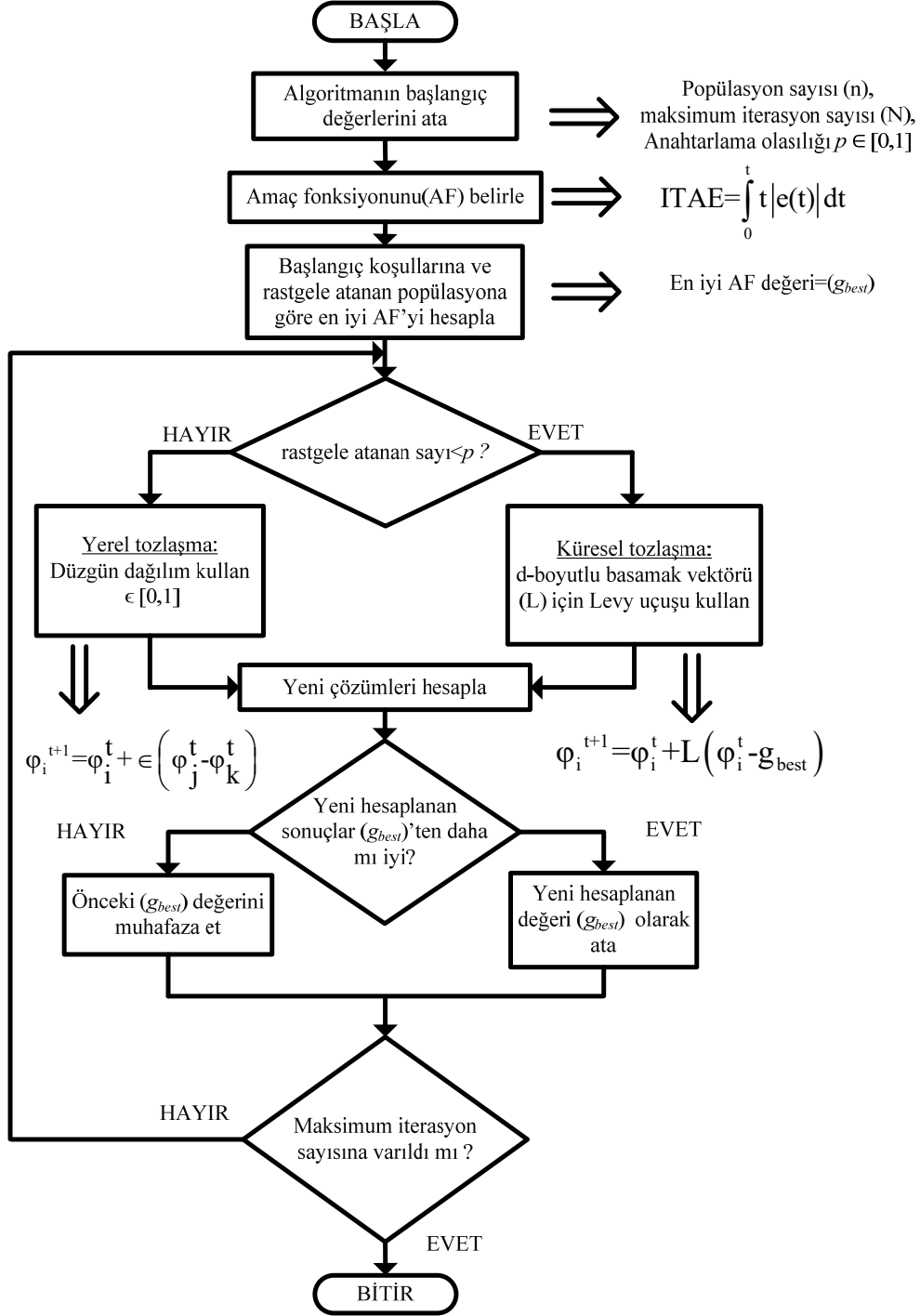
- a) Parçacık popülasyonunda bulunan her bir parçacığın pozisyonunun ve hızının rastgele belirlenmesi.
- b) Sürüde yer alan her bir parçacığın pozisyonuna ve hızına bağlı olarak amaç fonksiyonunun (ITAE) hesaplanması.
- c) Her sayımda parçacıkların en iyi amaç fonksiyon değerlerinin bir önceki değerle karşılaştırılarak P_{en_iyi} (yerel minimum) değerinin bulunması.
- d) Sürü içerisinde yer alan parçacıkların P_{en_iyi} değerlerinin karşılaştırılarak sürünün en iyi amaç fonksiyonu değeri G_{en_iyi} 'nin hesaplanması.
- e) Aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla parçacıkların hızının ve pozisyonunun güncelleştirilmesi.

$$V_{id}(k+1) = w(k)V_{id}(k) + c_1 r_1 (P_{en_iyi}(k) - X_{id}(k)) + c_2 r_2 (G_{en_iyi}(k) - X_{id}(k)) \quad (81)$$

$$X_{id}(k+1) = X_{id}(k) + V_{id}(k+1) \quad (82)$$

f) Sürecin, (a) ve (e) basamakları arasında nüfus büyüklüğüne ve iterasyon sayısına bağlı olarak tekrar etmesi.

(e) basamağında verilen eşitliklerde r_1 - r_2 rastgele atanan sayıları, w ağırlık indisini, c_1 - c_2 hızlanma sabitlerini sembolize etmektedir.



Şekil 61. ÇTA akış diyagramı

2.8.3.4. Optimizasyon Süreci ve Sonuçları

Kontrol problemlerinde sıkça kullanılan hata tabanlı klasik amaç fonksiyonları (AF) şunlardır; hatanın karesinin integrali (ISE), hatanın mutlak değerinin integrali (IAE) ve zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (ITAE). Tez kapsamında yapılan benzetim çalışmalarında ITAE amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. Bunun sebebi ise yukarıda belirtilen diğer performans indislerine göre daha düşük aşım ve salınım üretmesidir [178, 179]. Optimizasyon aşamasında ITAE kullanılmasına rağmen diğer performans indisleride daha detaylı bir karşılaştırma elde etmek için hesaplanmıştır. ITAE ve diğer indislere ait matematiksel ifadeler aşağıda verilmektedir.

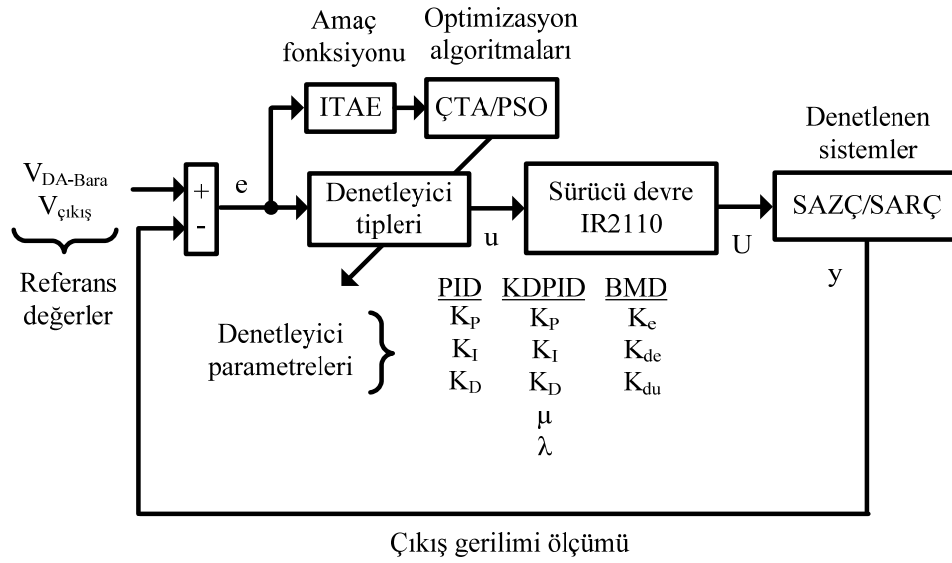
$$ITAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (83)$$

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (84)$$

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (85)$$

(83), (84) ve (85)'te verilen eşitlikler ile ifade edilen performans ölçütlerinde t zamanı, e ise hatayı sembolize etmektedir. ÇTA ve PSO yöntemlerine ait parametre değerleri Ek'te sunulmuştur. Optimizasyon sürecine ait şematik gösterim Şekil 62'de verilmektedir.

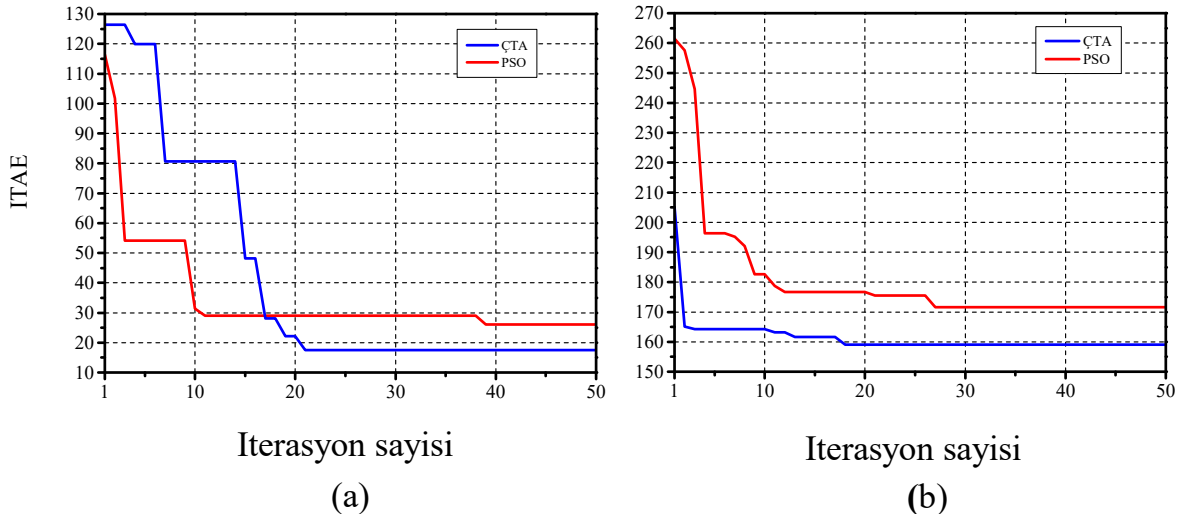
Şekil 62'den de görüldüğü üzere referans değer ile çıkış değeri karşılaştırılarak hata elde edilmektedir. Bu hataya ve benzetim süresine göre hesaplanan ITAE amaç fonksiyonu değeri optimizasyon algoritmalarında kullanılarak denetleyicilere ait parametrelerin ITAE'yi minimum yapan değerleri bulunur. Optimum parametreler kullanarak üretilen kontrol sinyali sürücü devre üzerinden gerilim denetimi yapılan SAZÇ ve SARÇ devrelerine uygulanır.



Şekil 62. Denetleyici parametrelerinin optimizasyon sürecine ait blok şeması

ÇTA ve PSO yöntemleri ile ayarlanan BMD, KDPID ve PID denetleyicileri için önerilen algoritmalar beş kez test edilmiş ve her bir testte algoritmalar beşer kez çalıştırılmıştır. Bu testler içerisinde en düşük amaç fonksiyonunu veren kontrol parametreleri seçilmiştir. Optimizasyon sürecinde yük değişimi dikkate alınmamıştır ve yük direnci sabit 12Ω olarak ayarlanmıştır. Yük değişimi gerçek zamanlı deneylerde dikkate alınarak denetleyicilerin performans analizi gerçekleştirilmiştir. Denetleyici parametrelerinin arama uzayı sınırları ile algoritmaların parametre değerleri Ek kısmında sunulmuştur. DA-bara gerilimi ve çıkış geriliminin referans değerleri 18 ve 12 V olarak ayarlanmıştır. Optimizasyon sürecinde Matlab/Simulink programıyla tasarlanan tüm sistem düzensiz dalga durumu ve UK bağlantılı olarak dikkate alınmıştır. İlk olarak SARÇ için kullanılan denetleyiciler ayarlanmakta, daha sonra ise SAZÇ için kullanılan denetleyiciler tasarlanmaktadır.

Denetim yöntemlerinden ilk olarak PID denetleyici parametreleri (K_P , K_I , K_D) optimize edilmiştir. PID için yapılan beş testte en iyi AF değerinin, iterasyon sayısına göre değişimini veren grafikler Şekil 63'te verilmektedir. SAZÇ için en iyi AF değerleri ÇTA ile 4. testte, PSO ile 2. testte elde edilmiştir. SARÇ için ise en iyi AF değerleri hem ÇTA hem de PSO ile 2. testte elde edilmiştir. Tablo 12'de PID için ÇTA ve PSO ile elde edilen en iyi teste ait parametre değerleri ve performans ölçümleri yer almaktadır.



Şekil 63. PID denetleyici için ÇTA ve PSO ile elde edilen en iyi AF değerimleri ((a) SAZÇ, (b) SARÇ)

Tablo 12. ÇTA ve PSO yöntemleri ile elde edilen en iyi PID denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri

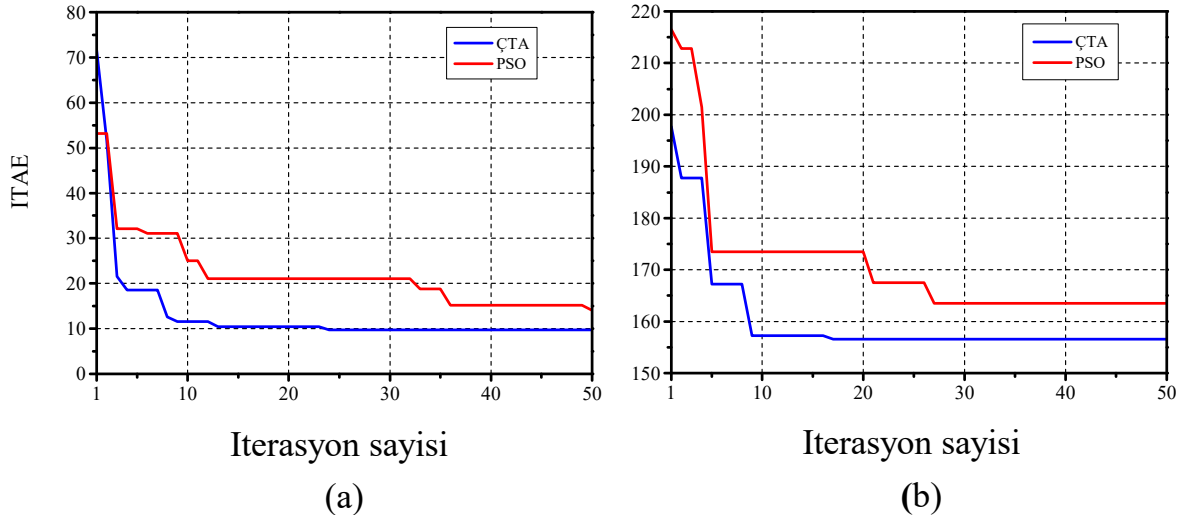
| | Çevirici tipi | Denetleyici parametreleri | | | Performans kriterleri | | |
|-----|---------------|---------------------------|-------|--------|-----------------------|--------|-------|
| | | K_P | K_I | K_D | ITAE | IAE | ISE |
| ÇTA | SARÇ | 47.65 | 22.5 | 0.7468 | 159.0 | 10.208 | 4.69 |
| | SAZÇ | 43.89 | 27.4 | 0.6213 | 17.56 | 1.775 | 0.936 |
| PSO | SARÇ | 55.06 | 30.11 | 0.9412 | 171.6 | 12.659 | 5.13 |
| | SAZÇ | 52.35 | 18.02 | 1.4220 | 26.01 | 2.018 | 1.20 |

PID denetleyici için en düşük AF (ITAE) değerleri ÇTA algoritması ile SARÇ için 159, SAZÇ için 17.56 olarak elde edilmiştir.

İkinci olarak KDPID denetleyici optimize edilmiştir. KDPID denetleyicinin optimize edilmesi gereken beş adet parametresi (K_P , K_I , λ , K_D , μ) bulunmaktadır. En iyi testte elde edilen denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri Tablo 13'te verilmektedir. Optimizasyon sürecinde elde edilen en iyi AF değişim grafikleri Şekil 64'te verilmektedir. KDPID kullanılarak SAZÇ için en iyi AF değerleri ÇTA ile 1. testte, PSO ile 2. testte elde edilmiştir. SARÇ için ise en iyi AF değerleri ÇTA ile 4. testte ve PSO ile 1. testte elde edilmiştir.

Tablo 13. ÇTA ve PSO yöntemleriyle elde edilen en iyi KDPID denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri

| | Çevirici tipi | Denetleyici parametreleri | | | | | Performans kriterleri | | |
|-----|---------------|---------------------------|-------|-----------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
| | | K_P | K_I | λ | K_D | μ | ITAE | IAE | ISE |
| ÇTA | SARÇ | 56.33 | 12.2 | 1.38 | 1.1 | 0.664 | 156.6 | 9.67 | 4.61 |
| | SAZÇ | 57.13 | 18.6 | 1.43 | 0.826 | 0.113 | 9.76 | 0.695 | 0.443 |
| PSO | SARÇ | 52.77 | 26.9 | 0.79 | 0.894 | 0.962 | 163.4 | 10.58 | 5.03 |
| | SAZÇ | 48.05 | 17.1 | 0.94 | 1.12 | 1.37 | 14.05 | 1.560 | 0.842 |



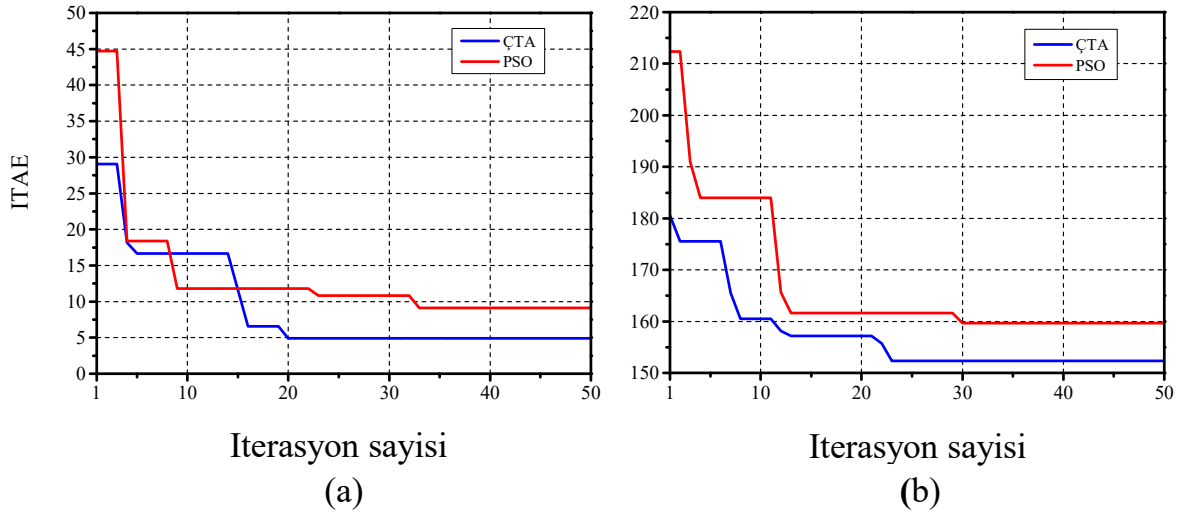
Şekil 64. KDPID denetleyici için ÇTA ve PSO ile elde edilen en iyi AF değerleri ((a) SAZÇ, (b) SARÇ)

KDPID denetleyici için en düşük amaç fonksiyonu (ITAE) değeri ÇTA algoritması ile SARÇ için 156.6, SAZÇ için 9.76 olarak elde edilmiştir. Aynı şartlar altında KDPID ile PID göre daha düşük bir AF elde edildiği görülmektedir.

Son olarak BMD parametreleri (K_e , K_{de} , K_{du}) ayarlanmıştır. Bu parametreler giriş sinyallerinin bulanıklaştırılmasında ve çıkış sinyalinin bulanık değerinin hesaplanmasında kullanılan üçgen üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerini ayarlamaktadır. Önerilen algoritmaların sağladığı en iyi denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri Tablo 14'te gösterilmektedir. Yapılan testlere ait SAZÇ ve SARÇ devresi için elde edilen en iyi AF değişim grafikleri Şekil 65'te verilmektedir. BMD kullanılarak SAZÇ için en iyi AF değerleri ÇTA ile 2. testte, PSO ile 3. testte elde edilmiştir. SARÇ için ise en iyi AF değerleri ÇTA ile 1. testte ve PSO ile 5. testte elde edilmiştir.

Tablo 14. ÇTA ve PSO yöntemleriyle elde edilen en iyi BMD denetleyici parametreleri ve performans ölçümleri

| | Çevirici tipi | Denetleyici parametreleri | | | Performans kriterleri | | |
|-----|---------------|---------------------------|-------|----------|-----------------------|-------|-------|
| | | K_{de} | K_e | K_{du} | ITAE | IAE | ISE |
| ÇTA | SARÇ | 0.069 | 1.63 | 37.010 | 152.35 | 9.433 | 4.432 |
| | SAZÇ | 0.0165 | 0.816 | 32.323 | 4.899 | 0.533 | 0.446 |
| PSO | SARÇ | 0.072 | 2.01 | 38.256 | 159.64 | 11.20 | 4.770 |
| | SAZÇ | 0.046 | 0.553 | 29.921 | 9.09 | 1.826 | 0.931 |



Şekil 65. BMD için ÇTA ve PSO ile elde edilen en iyi AF değerleri ((a) SAZÇ, (b) SARÇ)

BMD denetleyici için en düşük amaç fonksiyonu (ITAE) değeri ÇTA algoritması ile SARÇ için 152.35, SAZÇ için 4.899 olarak elde edilmiştir. BMD ile hem KDPID'ye göre hem de PID'ye göre daha düşük bir AF elde edilmiştir.

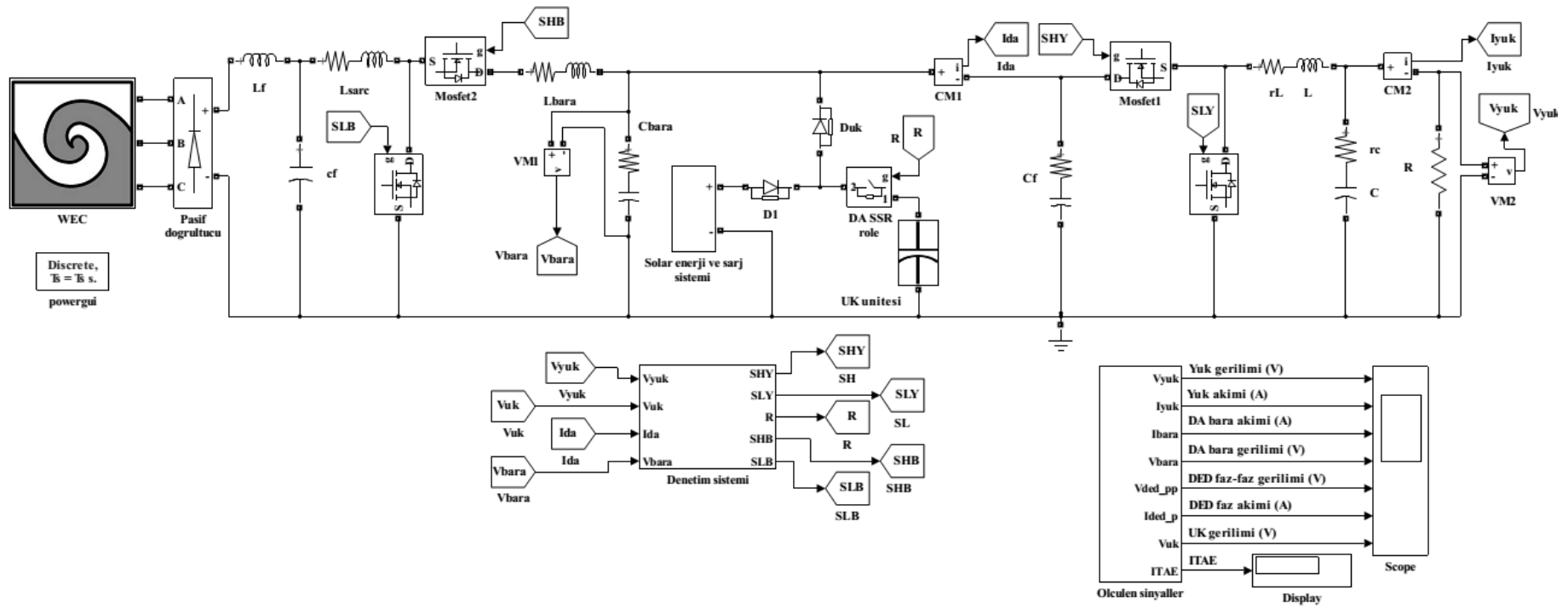
Optimizasyon sürecinde en düşük amaç fonksiyonu değerleri ÇTA ile elde edildiği için laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel testlerde ÇTA ile optimize edilen PID, KDPID ve BMD parametreleri kullanılmıştır. Denetleyici performansları ayrıca farklı deniz, yük ve referans durumlarında incelenmiş ve gösterdikleri performanslar karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

3. BULGULAR

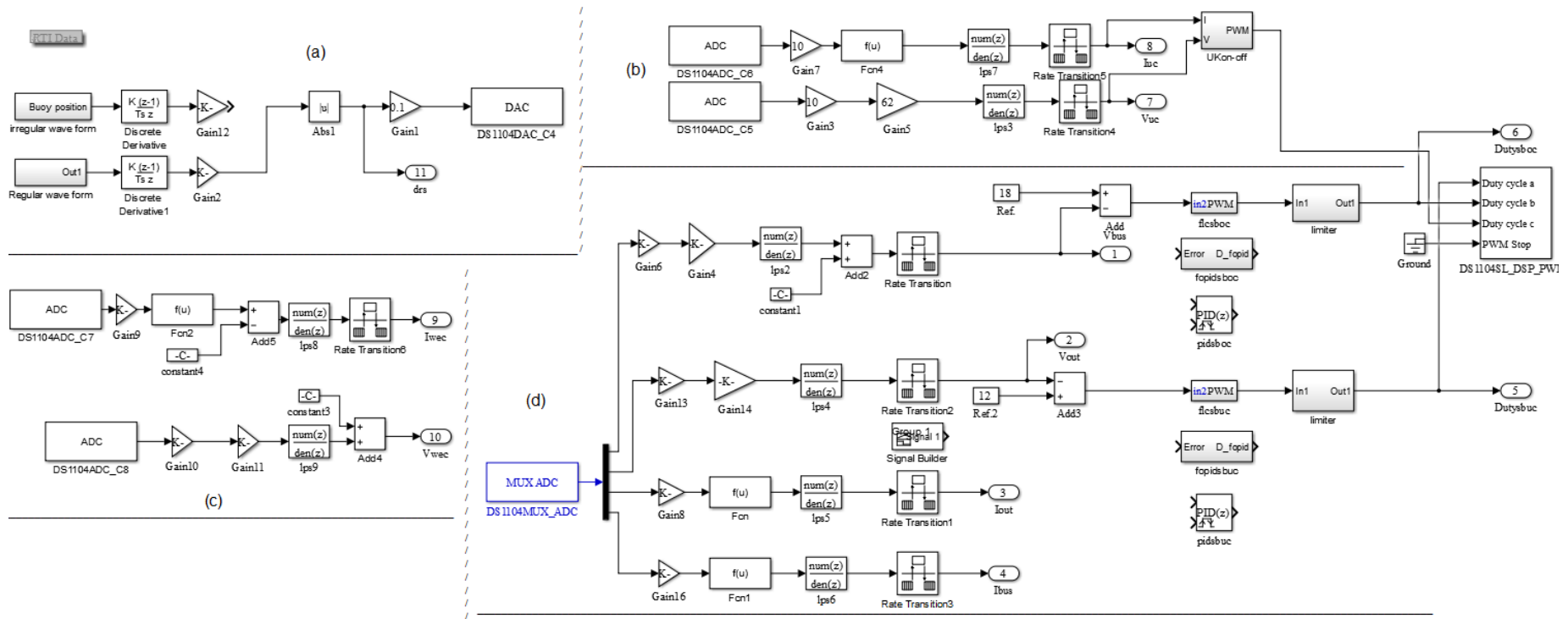
Bu bölümde optimize edilen BMD, KDPID ve PID denetleyicilerin performansları hem benzetim ortamında hem de deneysel olarak gözlenmiştir. Tasarlanan sistemlerin performansları deneysel olarak birkaç farklı durum için incelenmiştir. Düzenli-düzensiz dalga halleri, UK bağlantılı-bağlantısız DA-bara, sabit-değişken referans takibi, farklı yük ve UK şarj gerilimi gibi durumlar dikkate alınarak denetleyicilerin performansları araştırılmıştır. UK bağlantılı düzensiz dalga halinin dikkate alındığı ve sistem çıkışında sadece direnç yükünün bağlı olduğu durum için benzetim ve deney sonuçları verilerek sistem yanıtları karşılaştırılmıştır. Diğer durumlarda ise optimize edilen denetleyicilerin deneysel sonuçları incelenmiş ve performans ölçüm değerleri verilmiştir. Benzetim ortamında çeviricilerde kullanılan mosfetlerin anahtarlama frekansı 5 kHz, örnekleme frekansı ise 20 khz seçilmiştir. Matlab/Simulink programında tasarlanan dalga enerji sistemi Şekil 66'ta görülmektedir.

Gerçek zamanlı testler dSPACE 1104 denetim kartı ile gerçekleştirilmektedir. Verilerin görsel olarak anlık izlenmesi dSPACE firmasına ait Control Desk Next Generation (CDNG) ara yüz programı ile yapılmaktadır. Verilerin kayıt edilmesi için ise dSPACE XIL API.NET sunucusu üzerinden yazılan kodlar ile programın Matlab ara yüzü aktif edilmiştir. Gerçek zamanlı uygulama için anahtarlama frekansı 20 kHz olarak seçilmiş, örnekleme frekansı ise 5 kHz olarak ayarlanmıştır.

Gerçek zamanlı denetleyici algoritmalarının ve veri giriş-çıkış bloklarının yer aldığı Matlab/Simulink ortamında tasarlanan ara yüz modeli Şekil 67'de verilmektedir. Şekil 67'de görülen modelde (a) kısmı düzensiz ve düzenli dalga referans hız sinyallerinin üretildiği blokları göstermektedir. Buradan alınan dalga hız referans sinyalleri DAC (dijital-analog dönüştürücü) bloğu kullanılarak 3-faz motor sürücüyeye analog yalıtım devresi üzerinden iletilmektedir. (b) kısmı UK gerilim-akım sinyallerinin ADC (analog-dijital dönüştürücü) bloklarıyla bilgisayara aktarıldığı kısımdır. Ayrıca kısa devre durumunda veya devrede meydana gelebilecek bir problemde anlık çok yüksek akım aktarabildiği için UK'nın akımı ve aşırı alt-üst gerilim durumu kontrol altında tutulmaktadır. (c) bölümünde DED faz-faz gerilim sinyali ve tek-faz akım sinyali okunmaktadır.



Şekil 66. Matlab/Simulink ortamında tasarlanan dalga enerji sistemi modeli

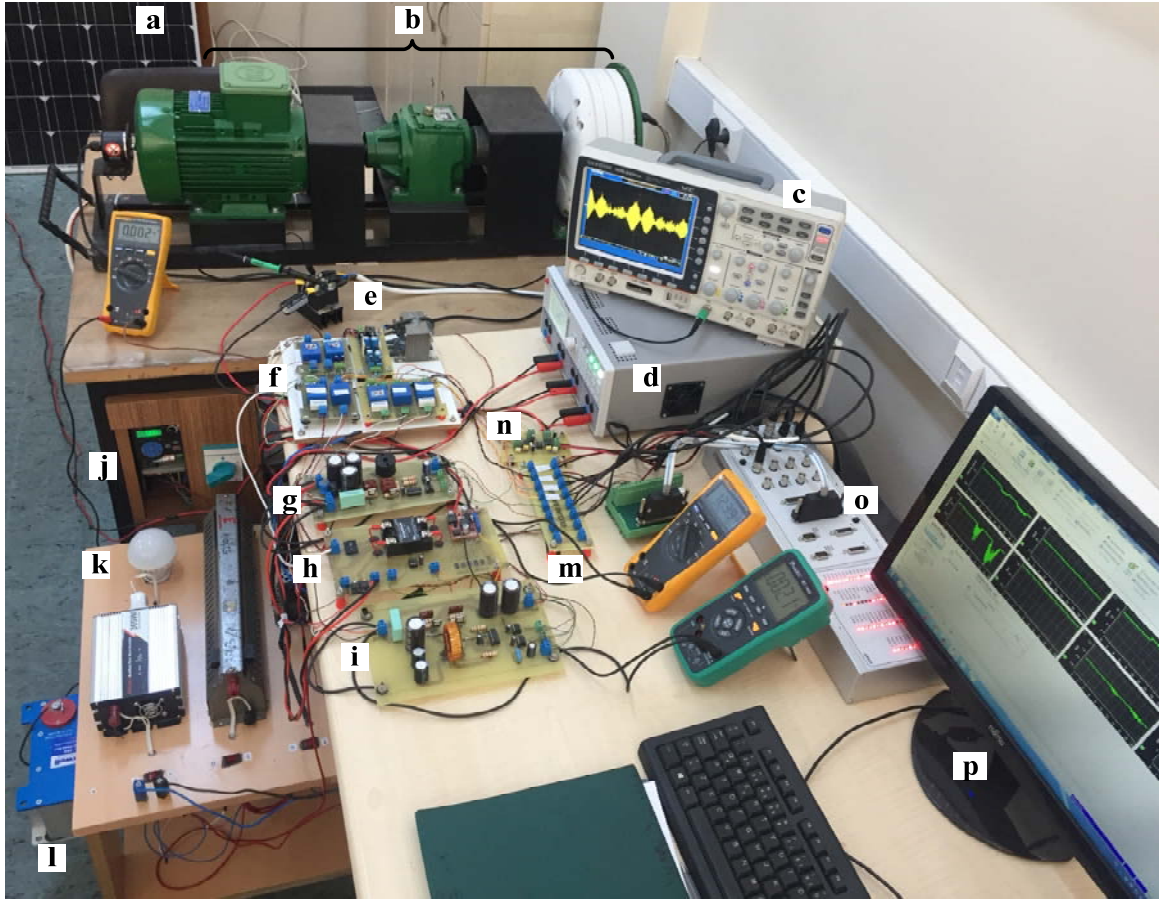


Şekil 67. Gerçek zamanlı denetleyici algoritmalarının ve veri giriş-çıkış bloklarının yer aldığı Matlab/Simulink modeli

Şekil 67’de gösterilen (d) bölümü bara-yük tarafı gerilim-akım sinyallerinin ADC bloklarıyla bilgisayara aktarıldığı ve denetleyici algoritmaların yer aldığı bölümdür. Denetleyici çıkışları (ÇO sinyalleri) ilk olarak istenilen değerler arasında sınırlandırılmış daha sonra ise PWM bloğuna iletilmiştir.

Çıkış (out) blokları verilerin dSPACE’in görsel ara yüz programına (CDNG) aktarılmasında kullanılmaktadır. Kazanç blokları deneysel ortamdan okunan gerilim-akım sinyallerinin ölçeklendirilmesi için kullanılmaktadır. Son olarak “İps” bloğu alçak geçiren filtre bloğudur ve okunan verinin filtrelenmesi amacıyla tasarlanmıştır.

Şekil 68’de şematik olarak verilen deneysel sistemin laboratuvar ortamında kurulan gösterimi verilmektedir.



Şekil 68. Dalga enerji sisteminin deneysel kurulumu, (a) güneş panelleri, (b) DED emülatörü, (c) osiloskop, (d) güç kaynağı, (e) 3-faz diyot doğrultucu, (f) gerilim-akım ölçüm kartı, (g) SARÇ devresi, (h) UK şarj ve koruma devresi, (i) SAZÇ devresi, (j) 3-faz motor sürücüsü, (k) yük masası, (l) UK ünitesi, (m) ölçüm barası, (n) analog yalıtım devresi, (o) dSPACE 1104 bağlantı kutusu, (p) masa üstü bilgisayar

Tez kapsamında elde edilen sonuçlar birkaç durum için test edilmiştir. Bunlar sıra ile aşağıda verilmektedir.

1. Durum (D1): Düzensiz Dalga Hali, UK Bağlantılı, Sadece Direnç Yüğü

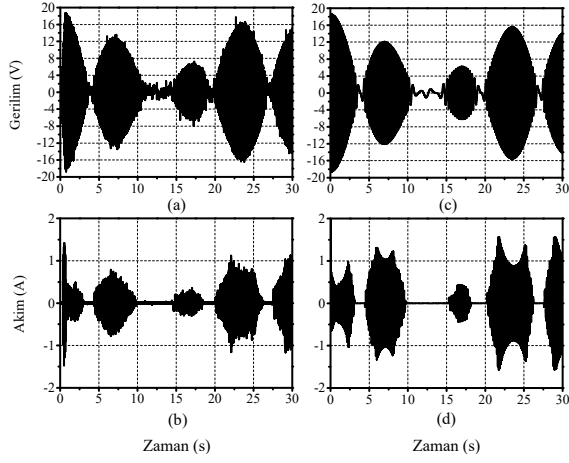
İlk olarak düzensiz dalganın dikkate alındığı UK bağlantılı sistem çıkışına sadece direnç yüğü bağı iken elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu testler ile elde edilen benzetim ve deney sonuçları 1. durum anlamına gelen “D1” ile sembolize edilmiştir. Şekil 69-71’de, tasarlanan denetleyici yöntemleriyle elde edilen deneysel ve benzetimsel DED faz-faz gerilim ve tek faz akım çıkışları verilmektedir. Benzetim ortamında elde edilen sonuçlar ile deneysel olarak elde edilen sonuçların benzer oldukları görülmektedir. Çeviricilerin anahtarlama süresince her denetleyici tipi için gerilim sinyallerinde pek bir değişiklik olmadığı, fakat akım sinyallerinde anahtarlama etkisiyle küçük sıçramaların olduğu gözlemlenmektedir.

D1 için DA bara gerilim ve akım değerlerine bakacak olursak deneysel olarak en fazla aşımın KDPID ile benzetim ortamında ise en yüksek aşımın PID denetleyici ile elde edildiği görülmektedir (Şekil 72-74). Optimize edilen denetleyicilerin DA baraya ait benzetim ölçüm performansları algoritmaların anlatıldığı bölümde sunulmuştur. Denetleyicilerin DA bara deneysel performans karşılaştırılması ise Tablo 15’te verilmektedir. Hata tabanlı performans ölçümleri karşılaştırılmasında BMD’nin sağladığı değerlerin diğer denetleyicilere göre daha az olduğu açıkça görülmektedir.

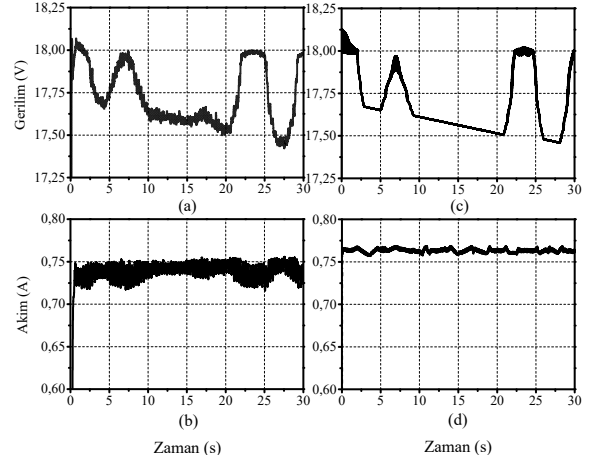
Ayrıca, DA baraya ait deneysel gerilim grafiklerinin 10-20 saniyeleri arası incelendiğinde UK’nın şarjının en çok korunduğu denetleyici yöntemi olarak BMD görülmektedir. Bu açıdan denetleyiciler değerlendirildiğinde en kötü performansa sahip denetleyici ise PID denetleyicidir. Bu grafiklerden tasarlanan sistemin diğer denetleyici tiplerine kıyasla BMD ile daha da sürdürülebilir olduğu yorumu çıkartılabilir.

Tablo 15. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D1)

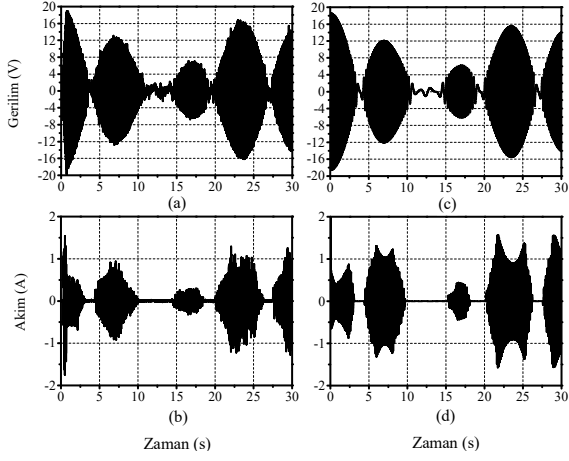
| Çıkış | Denetleyiciler | Performans kriterleri | | |
|---------|----------------|-----------------------|--------|--------|
| | | ITAE | IAE | ISE |
| DA-bara | BMD | 135.43 | 9.067 | 13.329 |
| | KDPID | 163.96 | 10.977 | 15.072 |
| | PID | 198.37 | 13.657 | 17.414 |
| Yük | BMD | 13.840 | 2.5410 | 12.106 |
| | KDPID | 21.924 | 3.0281 | 14.034 |
| | PID | 51.858 | 5.2315 | 16.299 |



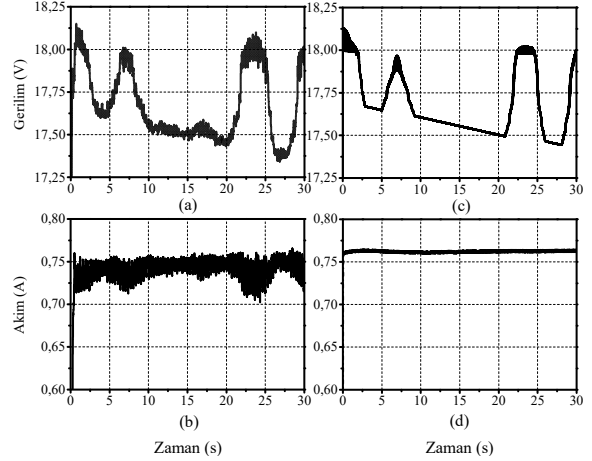
Şekil 69. BMD ile UK'lı DED çıkışı (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



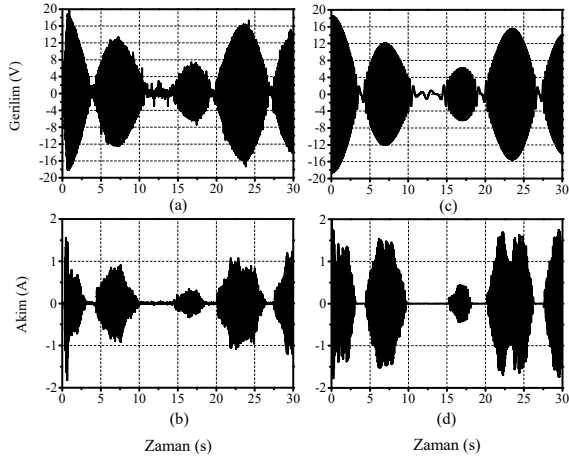
Şekil 72. BMD ile UK'lı DA bara değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



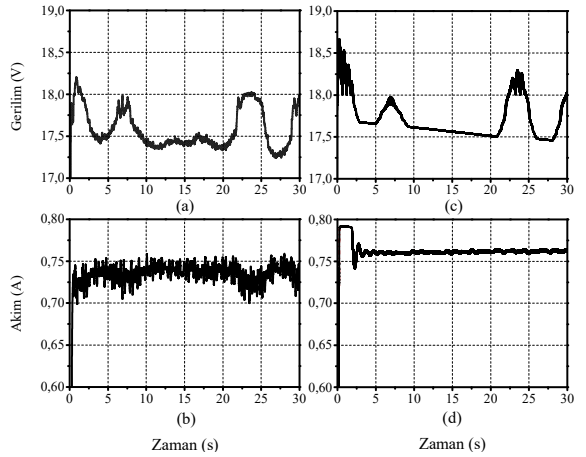
Şekil 70. KDPID ile UK'lı DED çıkışı (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



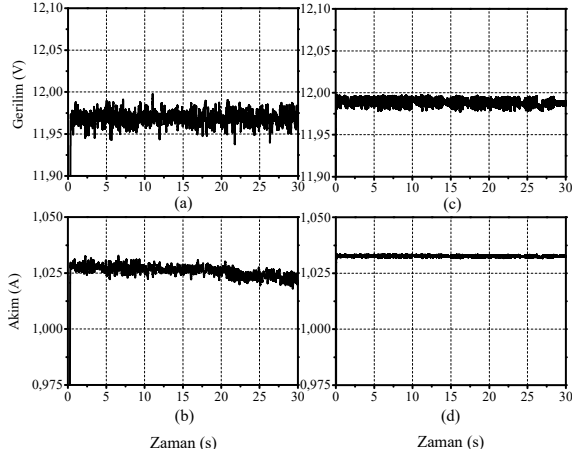
Şekil 73. KDPID ile UK'lı DA bara değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



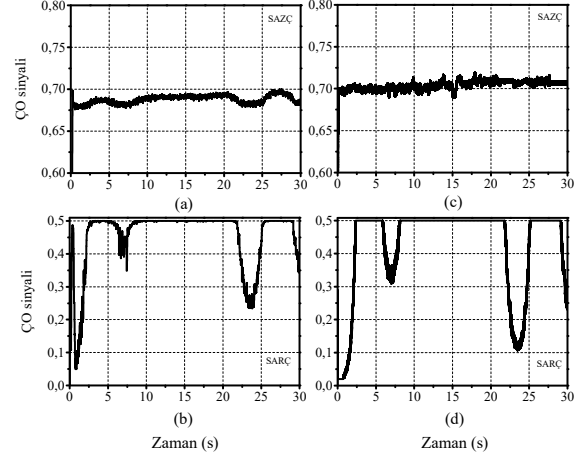
Şekil 71. PID ile UK'lı DED çıkışı (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



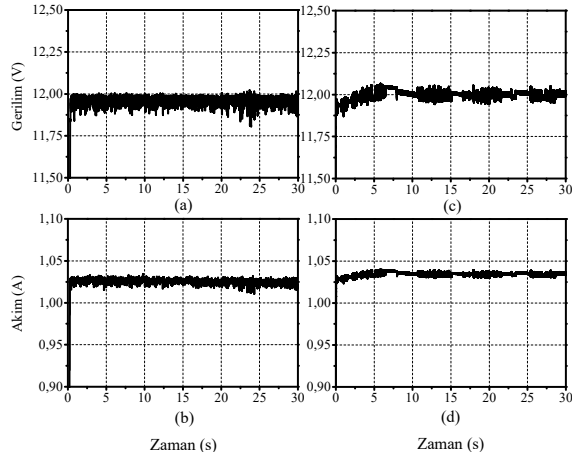
Şekil 74. PID ile UK'lı DA bara değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



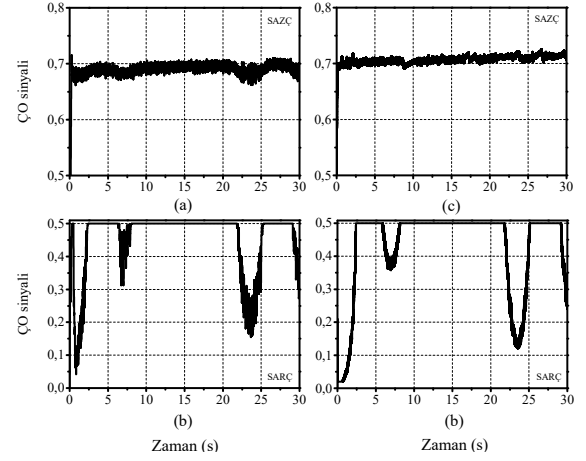
Şekil 75. BMD ile UK'lı yük çıkışı değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



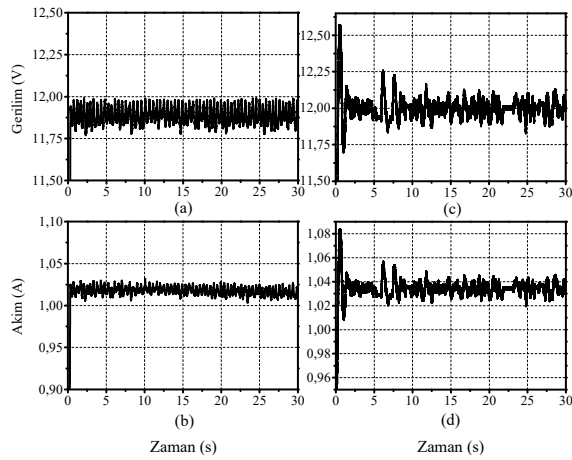
Şekil 78. BMD ile UK'lı ÇO sinyalleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



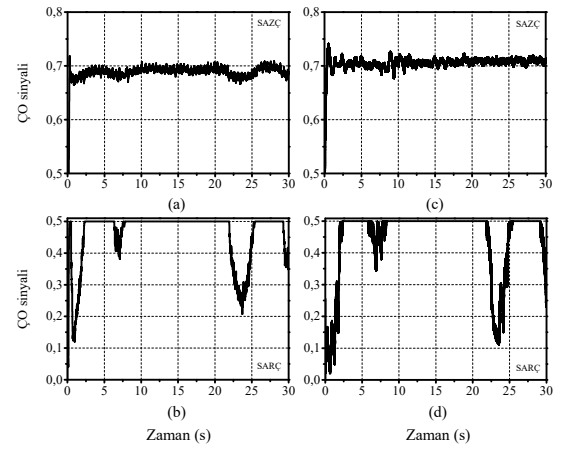
Şekil 76. KDPID ile UK'lı yük çıkışı değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



Şekil 79. KDPID ile UK'lı ÇO sinyalleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)

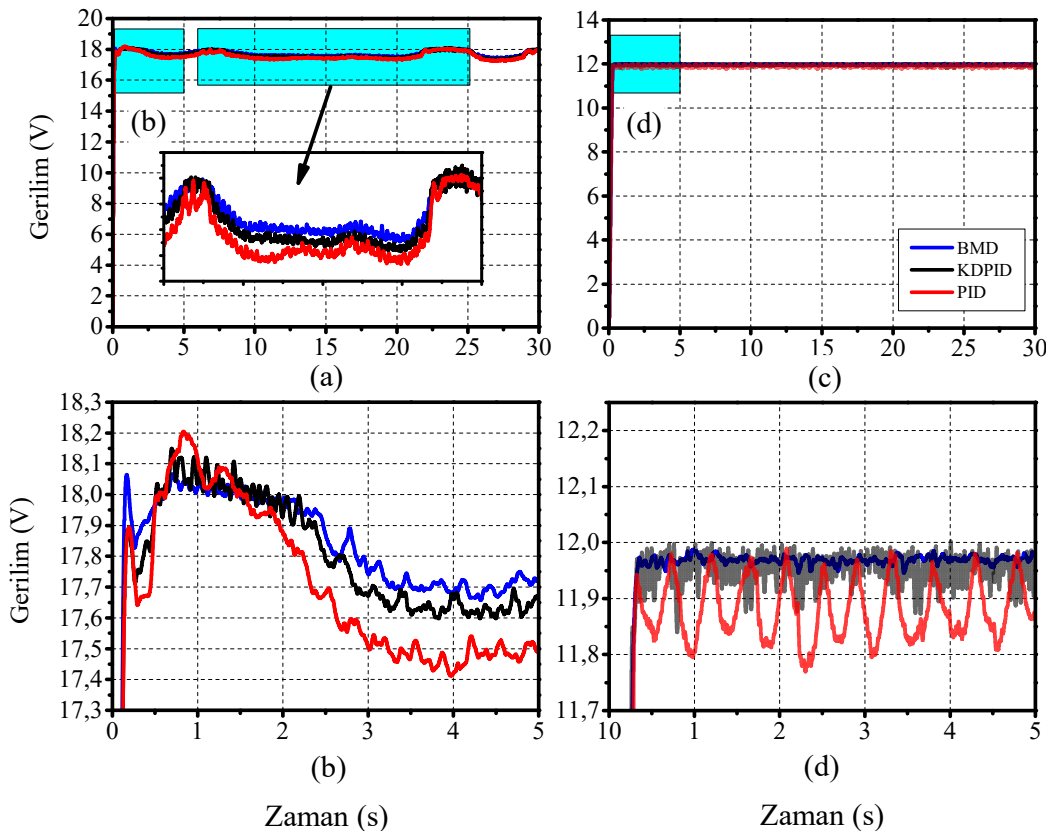


Şekil 77. PID ile UK'lı yük çıkışı değerleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)



Şekil 80. PID ile UK'lı ÇO sinyalleri (a,b) deneysel, (c,d) benzetim (D1)

Şekil 75-77’te denetleyici çeşitleriyle elde edilen çıkış gerilimlerinin deneysel ve benzetimsel sonuçları verilmektedir. Ayrıca Tablo 15’te yük gerilimi deneysel performans ölçümlerine ait sonuçlar verilmektedir. Şekil 78-80’de ise SAZÇ ve SARÇ devrelerini denetleyen denetleyicilere ait çalışma oranı (ÇO) grafikleri hem benzetim hem de deneysel olarak verilmektedir. Grafikler incelendiğinde benzetim ortamında elde edilen grafiklere yakın deneysel sonuçların elde edildiği gözlenmiştir. BMD, KDPID ve PID denetleyicilerinin detaylı karşılaştırıldığı sonuçlar Şekil 81’de verilmektedir.



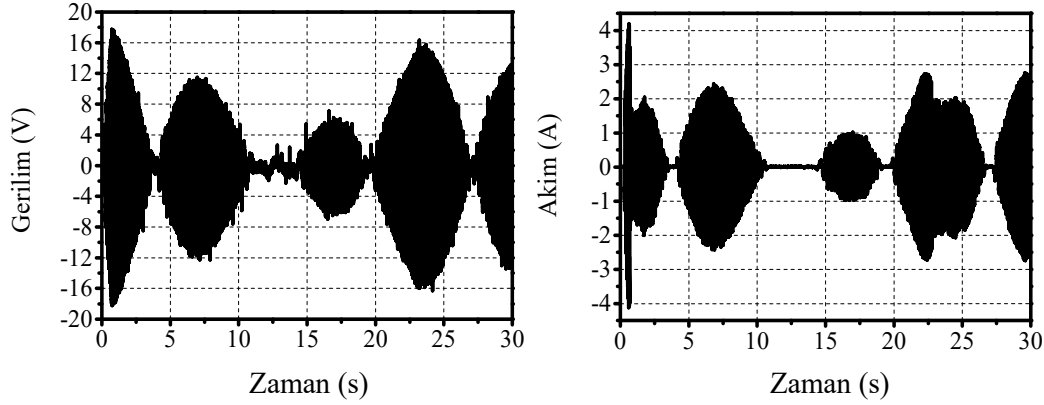
Şekil 81. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilim karşılaştırılması (D1)

Şekil 81’de ve Tablo 15’te görüldüğü üzere BMD denetleyici hem performans ölçüm değerlerinde hem de gerilim salınımları ve referansı takibi açısından düzensiz dalga hali, UK bağlantılı ve sadece direnç yükü durumunda en iyi sonucu veren denetleyici tipidir.

2. Durum: Düzensiz Dalga Hali, UK Bağlantısız, Sadece Direnç Yükü

Bu durumda sistemde UK bağlantısı yokken elde edilen deneysel sonuçlar gösterilmektedir. Burada gösterilen DED çıkış ve akım grafikleri 1. Durumda en iyi yanıtları

sağlayan BMD ile elde edilmiştir. Ayrıca gerilim denetimi yapıldığı için DA bara ve çıkış gerilimlerinin performans karşılaştırılması da verilmektedir. İlk olarak sisteme UK entegre değilken DED’de indüklenen faz-faz gerilim ve tek-faz akım değerleri Şekil 82’de verilmektedir.

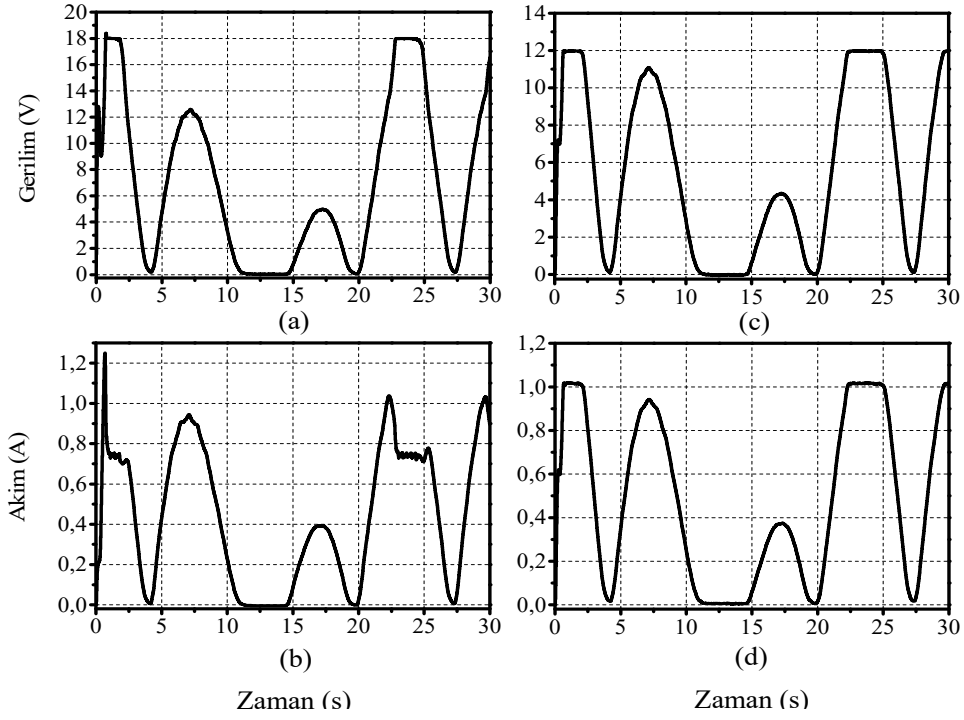


Şekil 82. BMD ile UK'sız DED çıkışı (D2)

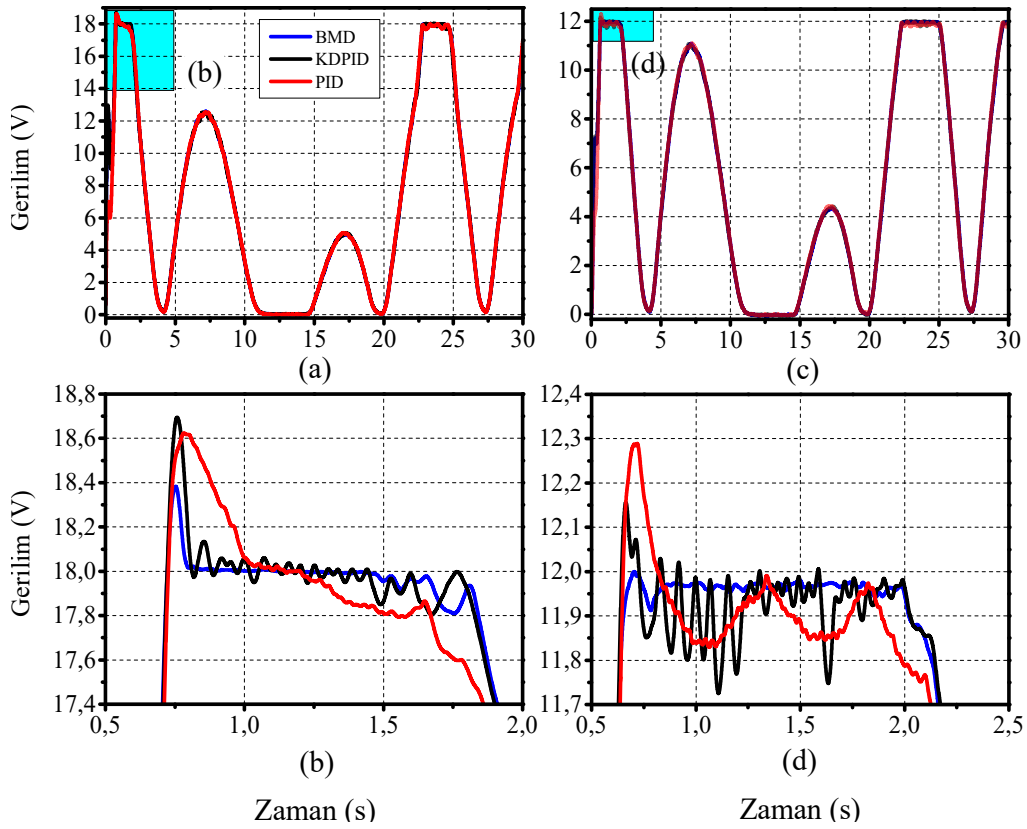
Şekil 82’te görüldüğü üzere UK bağlantısız sistemde tüm elektriksel yük DED tarafından karşılandığı için DED’de üretilen gerilimde düşüşün, DED’den çekilen akımda ise artışın olduğu gözlenmiştir.

BMD ile elde edilen DA bara ve yük gerilim-akım grafikleri Şekil 83’te verilmektedir. UK bağlantısız sistemde dalga enerjisinin sıfır geçiş noktaları nedeniyle ciddi gerilim düşümleri ve süreksizlikleri karşımıza çıkmaktadır. SARÇ devresi DED’den gelen enerjinin bir bölümünü düzgün şekilde DA baraya aktarabilirken, SAZÇ devresi de yüke sadece yeterli tepe anlarında üretilen enerjiyi aktarmaktadır.

Şekil 84’te D2 durumu için BMD, KDPID ve PID denetleyicilerin deneysel DA-bara ve yük gerilimleri karşılaştırılmaları verilmektedir. Buna göre DA-bara için en az aşım BMD ile elde edilmiştir. KDPID ve PID denetleyiciler benzer aşım değerleri göstermektedir. Yük tarafında ise PID denetleyici yanıtıyla en yüksek aşım değeri elde edilmiş ve çıkış geriliminde ciddi salınımların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum için BMD en az aşımı sağlayan denetleyici olarak görülmektedir.



Şekil 83. BMD ile elde edilen DA-bara (a, b) , yük (c, d) gerilim-akım sonuçları (D2)



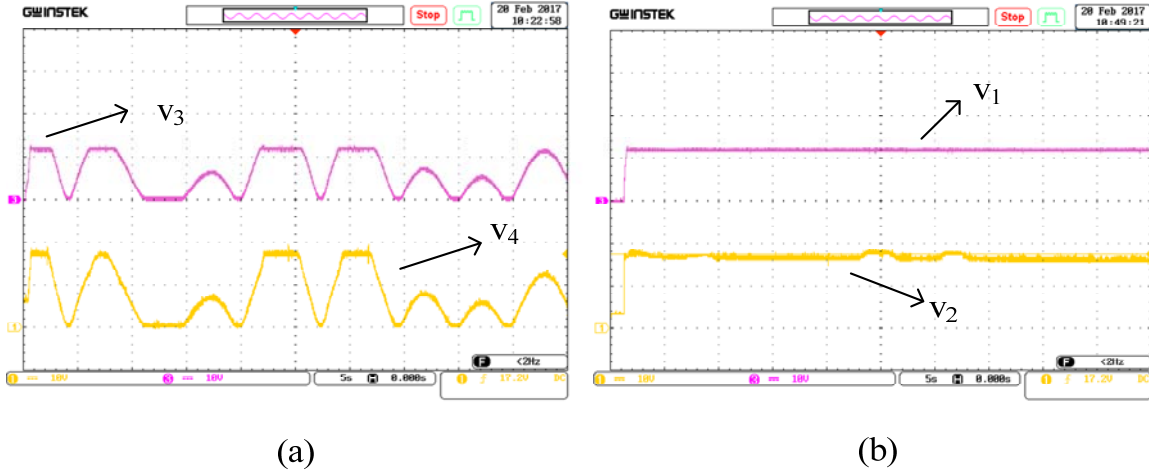
Şekil 84. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D2)

Şekil 84'te verilen gerilim sonuçlarına ait performans ölçümleri Tablo 16'da verilmektedir. Görüldüğü üzere performans ölçümleri oldukça yüksek değerler gelmektedir. Bunun nedeni ise sistem yanıtlarında karşılaşılan derin gerilim çöküntüleri ve düşümleridir. Performans ölçümleri sonuçları da BMD'nin en iyi çıkışı verdiğini göstermektedir.

D1 ve D2 durumları için DA-bara ve yük çıkışı gerilimlerinin UK bağlantılı-bağlantısız osiloskop görüntüleri de Şekil 85'te gösterilmektedir.

Tablo 16. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D2)

| Çıkış | Denetleyiciler | Performans kriterleri | | |
|---------|----------------|-----------------------|-------|--------|
| | | ITAE | IAE | ISE |
| DA-bara | BMD | 5117.6 | 343.8 | 5109.2 |
| | KDPID | 5120.0 | 344.4 | 5116.7 |
| | PID | 5137.8 | 345.4 | 5134.3 |
| Yük | BMD | 2879.6 | 193.2 | 1862.5 |
| | KDPID | 2883.1 | 194.7 | 1868.8 |
| | PID | 2889.0 | 195.3 | 1872.5 |

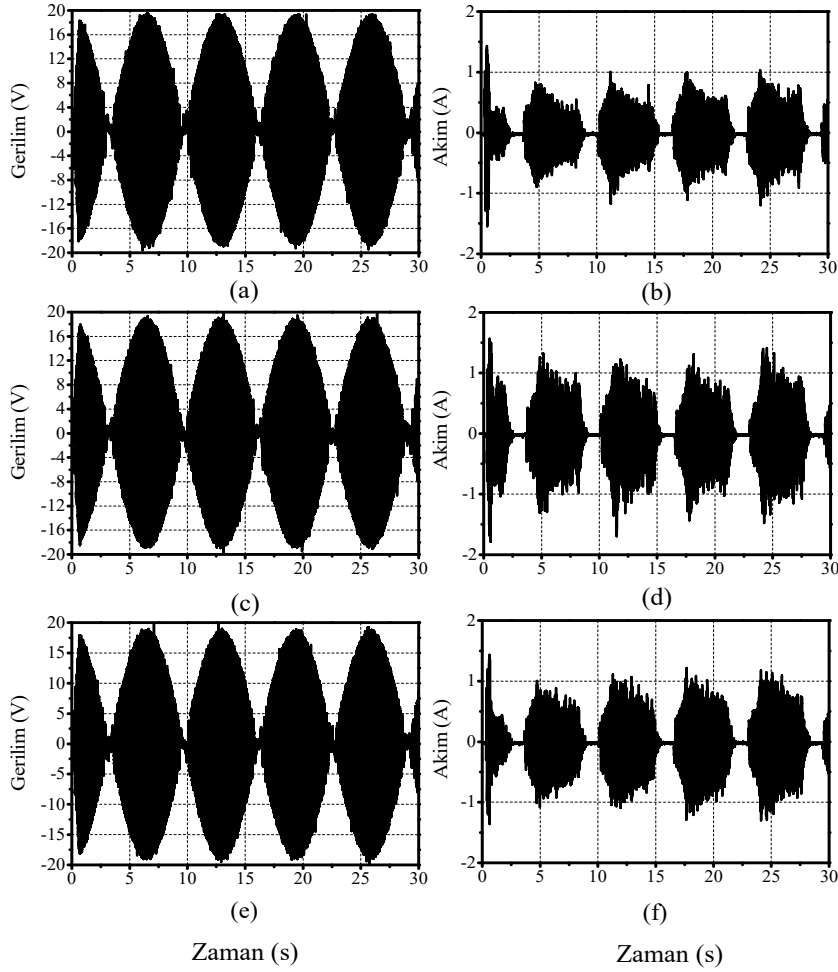


Şekil 85. UK bağlantısız (a) ve UK bağlantılı (b) DA-bara ve yük çıkışı gerilim sinyallerinin osiloskop görüntüleri (D1-D2) (V2-V4: DA-bara, V1-V3: yük çıkışı)

3. Durum: Düzenli Dalga Hali, UK Bağlantılı, Sadece Direnç Yükü (D3)

Bu durumda düzenli dalga hali, UK bağlantılı ve sadece direnç yüklü DES dikkate alınmaktadır. Kullanılan denetleyici çeşitleri ile güç elektroniği ara yüzünün denetimine ait performans ölçümleri ve karşılaştırmalı DA-bara ve yük çıkışı gerilim-akım sinyalleri verilmektedir. İlk olarak Şekil 86'da güç elektroniği devreleri BMD, KDPID ve PID denetleyiciler ile denetlenirken DED'de indüklenen gerilim-akım sinyalleri verilmektedir. Düzenli dalga durumunda üretilen enerji belirli bir periyodu olan, sıfır geçiş noktaları içeren ve uzun süreli süreksizliklerin olmadığı bir enerjidir. Denetim esnasında DED akımında meydana gelen bozulmaların en çok KDPID denetleyici ile elde edildiği gözlemlenmiştir.

Şekil 87'de önerilen denetleyici algoritmaları ile DA-bara ve yük çıkış gerilim-akım sinyalleri verilmektedir. DA-bara grafikleri incelendiğinde salınımlı gerilim sinyalleri görülmektedir.



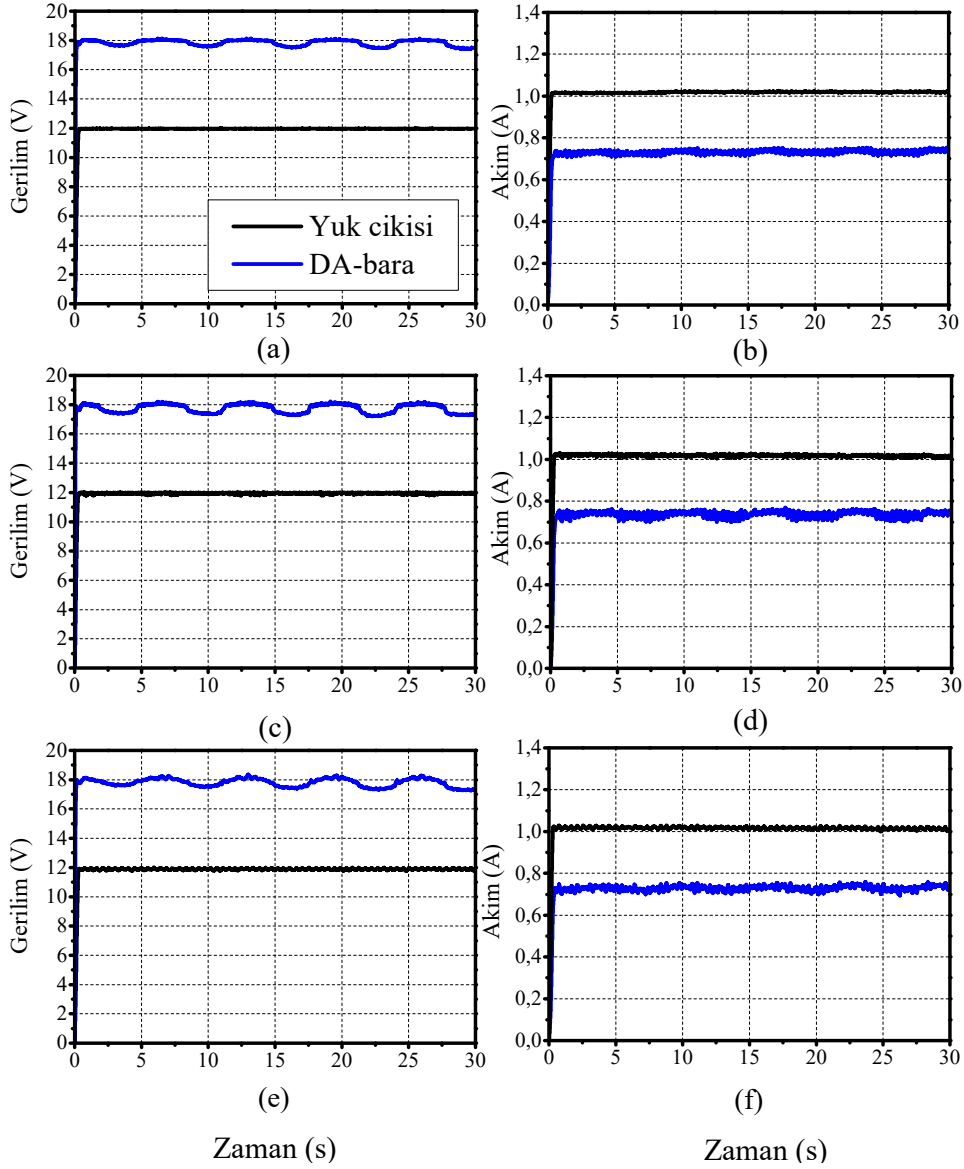
Şekil 86. DED'de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D3)

DA-bara gerilim grafiklerinde 18 V'u gösteren değerler DED tarafından sağlanmakta, bu değerin altında kalan (17.5 V-17.8 V) değerler ise UK tarafından sağlanmaktadır. UK Şarj durumunda değilken 17.5 V seviyesinde olan gerilim değeri UK deşarj olacağı için daha da artacaktır. Farklı Şarj değerinde olan UK bağlantılı sistem sonuçları gelecek durumlarda incelenmektedir. D3 durumu için denetleyicilerin DA-bara ve yk çıkışı gerilimleri kullanılarak hesaplanan performans lmleri Tablo 17'de verilmektedir.

Tablo 17. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D3)

| ıkıŐ | Denetleyiciler | Performans kriterleri | | |
|---------|----------------|-----------------------|------|-------|
| | | ITAE | IAE | ISE |
| DA-bara | BMD | 91.570 | 6.23 | 12.55 |
| | KDPID | 139.16 | 8.90 | 14.05 |
| | PID | 144.31 | 9.80 | 15.37 |
| Yük | BMD | 13.72 | 2.55 | 14.11 |
| | KDPID | 24.82 | 3.26 | 14.24 |
| | PID | 50.98 | 5.20 | 16.36 |

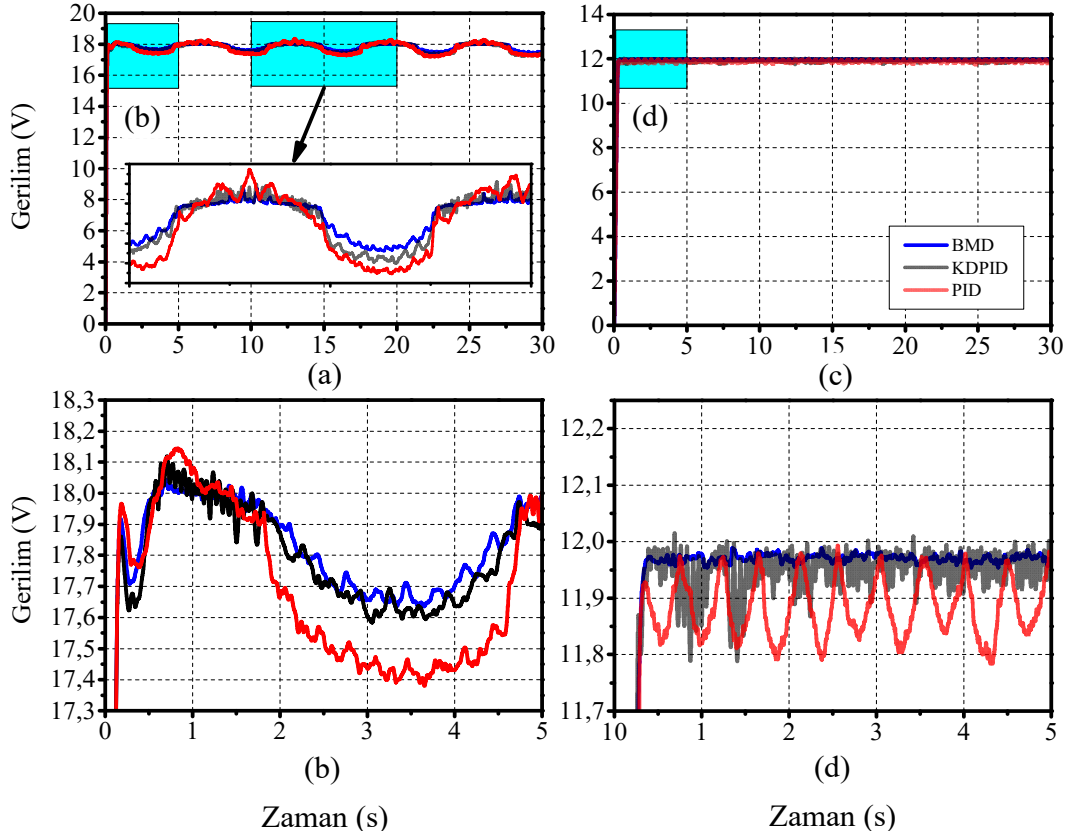
Şekil 87'de gösterilen BMD, KDPID ve PID denetimli DA-bara ve yk çıkışı gerilimlerinin belirli zaman aralıklarında verilen karŐılaŐtırılmalı görüntüleri Şekil 88'de verilmektedir. Tüm denetleyiciler istenilen referans takibini sağlamaktadır. Fakat diğer denetleyici tipleri ile karşılaştırıldığında aynı düzensiz dalga durumunda olduğu gibi yine en fazla gerilim düşümü ve bozulması PID denetleyici ile elde edilmiştir.



Şekil 87. DA-bara ve yük çıkışı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D3)

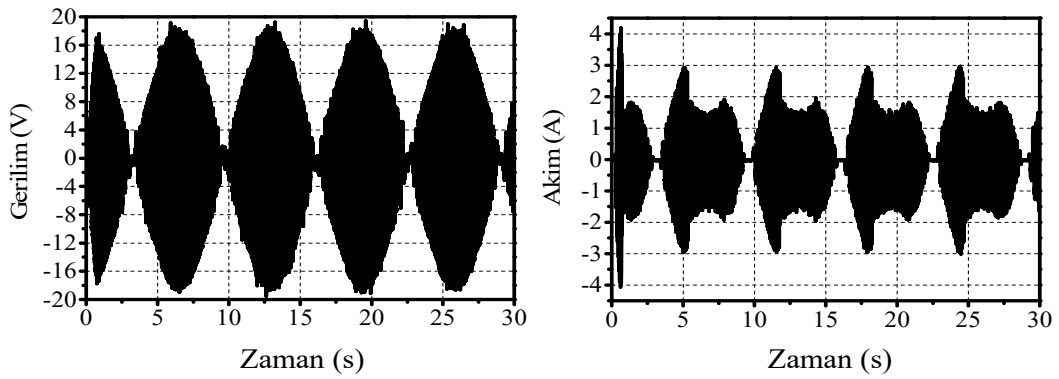
4. Durum: Düzenli Dalga Hali, UK Bağlantısız, Sadece Direnç Yüğü (D4)

Bu durumda düzenli dalga halinde UK bağlantısız sistem dikkate alınmıştır. Elektriksel yük olarak sadece direnç yükünün bağlı olduğu sistemde gösterilen DED çıkışları ve akım grafikleri 3. Durumda en iyi sonucu veren BMD elde edilmiştir. Ayrıca DA bara ve çıkış gerilimlerinin performans karşılaştırılması da sunulmaktadır.



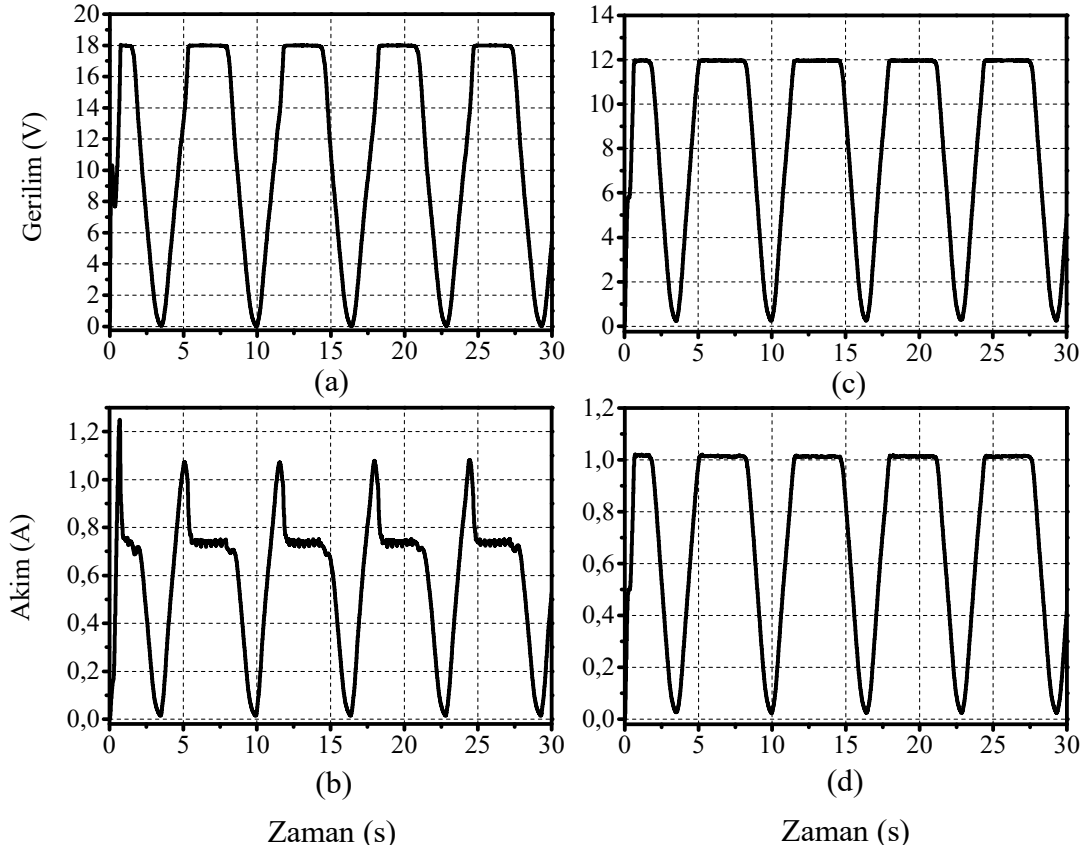
Şekil 88. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D3)

İlk olarak sistem de UK bağlantısı yokken DED’de indüklenen deneysel faz-faz gerilim ve tek-faz akım değerleri Şekil 89’da verilmektedir. Sistemde enerji kaynağı olarak sadece DED olduğu için beklendiği üzere DED’den çekilen akımda artış gözlenmiştir.



Şekil 89. BMD ile UK’sız DED çıkışı (D4)

Şekil 90'da BMD ile denetlenen güç elektroniği ara yüzüne ait DA-bara ve yük çıkışı gerilim-akım sonuçları verilmektedir.



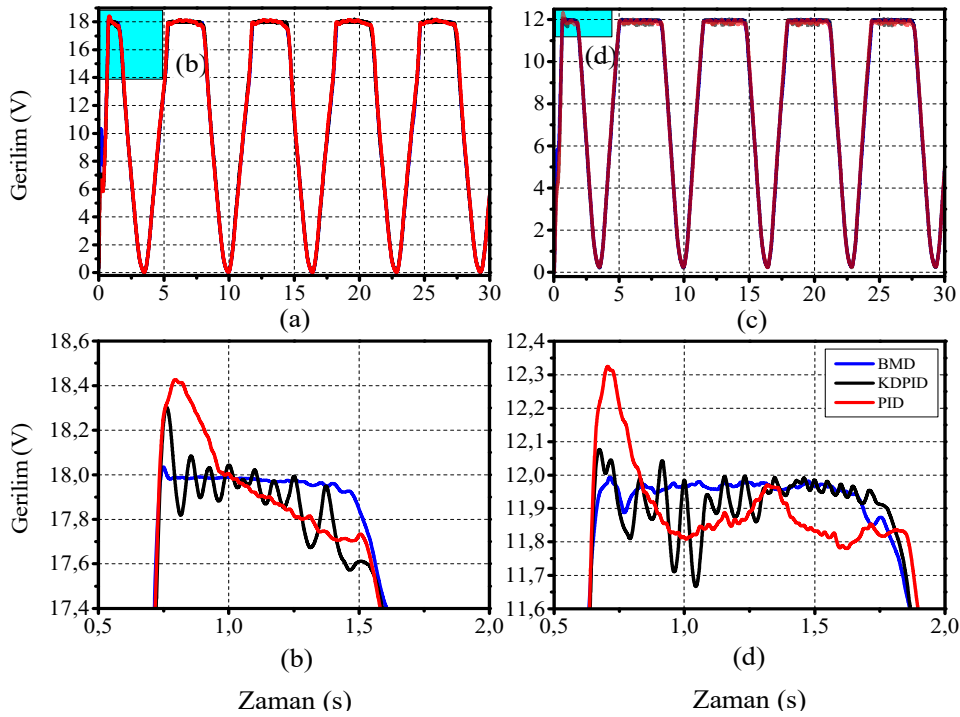
Şekil 90. BMD ile elde edilen DA-bara (a, b) , yük (c, d) gerilim-akım sonuçları (D4)

Sistemde UK bağlantısı olmadığı için DA-bara geriliminin sıfıra indiği görülmektedir. SAZÇ bu gerilimi azaltarak yüke aktardığı için yük geriliminde de büyük düşümler olmaktadır. DED'de üretilen enerji her ne kadar düzenli olsa da dalga enerjisinin sıfır geçişleri nedeniyle DES ek bir enerji kaynağına veya mekanik kısımlar ile sıfır noktalarının giderilmesine ihtiyaç duymaktadır.

Bu bölüme ait son şekil ise denetleyicilerin DA-bara ve yük gerilimleri karşılaştırılmasının verildiği Şekil 91'dir. Görüldüğü üzere DA-bara ve yük tarafı için en yüksek aşım PID denetleyici ile elde edilmiştir.

Tablo 18. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D4)

| Çıkış | Denetleyiciler | Performans kriterleri | | |
|---------|----------------|-----------------------|--------|--------|
| | | ITAE | IAE | ISE |
| DA-bara | BMD | 3064.0 | 201.57 | 2744.3 |
| | KDPID | 3079.5 | 201.61 | 2745.5 |
| | PID | 3090.4 | 202.23 | 2757.5 |
| Yük | BMD | 1665.8 | 108.52 | 950.07 |
| | KDPID | 1669.6 | 109.03 | 950.74 |
| | PID | 1669.7 | 109.29 | 954.90 |



Şekil 91. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D4)

KDPID denetleyici PID'ye göre referansa daha yakın bir sistem yanıtı sağlamaktadır. En az salınımlı sistem yanıtı ise BMD ile elde edilmiş ve BMD çok az bir kalıcı hal hatası sağlamıştır. Ayrıca bu durum için denetleyicilere ait deneysel performans ölçümleri Tablo 18'de verilmektedir.

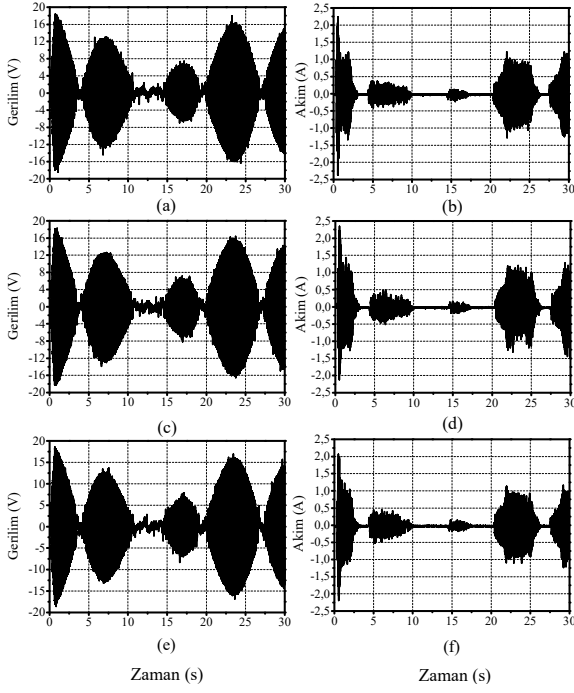
5. Durum: Düzensiz Dalga Hali, UK Bağlantılı, Değişken Çıkış Gerilimi Referansı, DA Direnç-Motor-Lamba Yükleri (D5)

Bu durumda DA-bara referans sinyali yine sabit (18 V) alınmış, çıkış yük gerilimi ise değişken bir referansa sahiptir. Bu testin temel amacı denetleyicilerin değişken referanslı gerilim takibi becerilerinin incelenmesidir. Düzensiz dalga durumunun dikkate alındığı bu testte yük olarak bir adet 12 Ω 'luk direnç, DA lambalar (12 V, 0.5 A) ve DA motorlar (12 V, 0.34 A) kullanılmaktadır. Şekil 92-95'te sıra ile bu durum için elde edilen DED gerilim-akım değerleri, DA-bara gerilim-akım sinyalleri, yük tarafı gerilim-akım sinyalleri ve son olarak çalışma oranları verilmektedir. Tüm denetleyici tiplerinin istenilen referans sinyali takip edebildiği görülmektedir. DA motor nedeniyle DA-bara ve yük tarafı akımında akım sıçramaları görülmektedir.

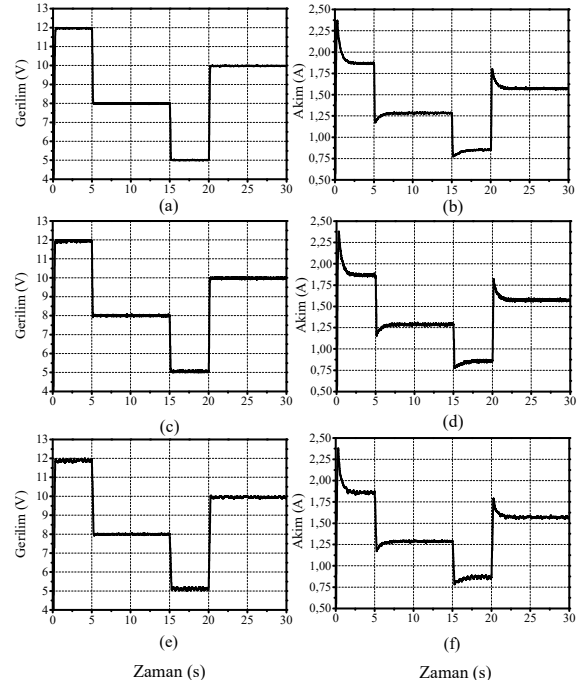
Şekil 96'da denetleyicilerin DA-bara ve yük gerilimlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Yakınlaştırılmış grafiklerde DA-bara tarafı için en yüksek aşımı PID denetleyici vermektedir. Yük tarafında ise PID ve KDPID denetleyiciler ile elde edilen yanıtlarda anlık salınımlar görülürken, BMD ile oldukça az salınımlı ve düzgün bir gerilim çıkışı elde edilmektedir. Bu duruma ait denetleyicilerin performans ölçümleri karşılaştırılması ise Tablo 19'da sunulmaktadır.

Tablo 19. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D5)

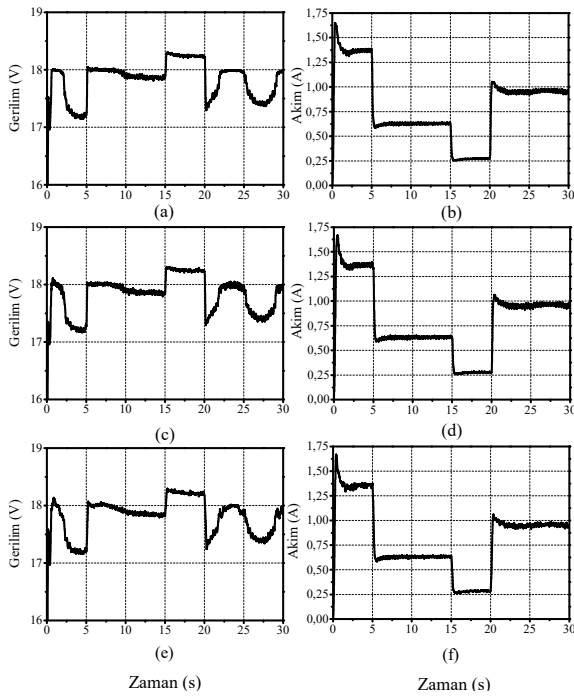
| Çıkış | Denetleyiciler | Performans kriterleri | | |
|---------|----------------|-----------------------|------|-------|
| | | ITAE | IAE | ISE |
| DA-bara | BMD | 113.26 | 8.35 | 14.29 |
| | KDPID | 115.58 | 8.50 | 14.45 |
| | PID | 119.95 | 8.78 | 14.54 |
| Yük | BMD | 22.74 | 3.34 | 18.29 |
| | KDPID | 28.17 | 3.71 | 18.45 |
| | PID | 48.11 | 5.24 | 21.25 |



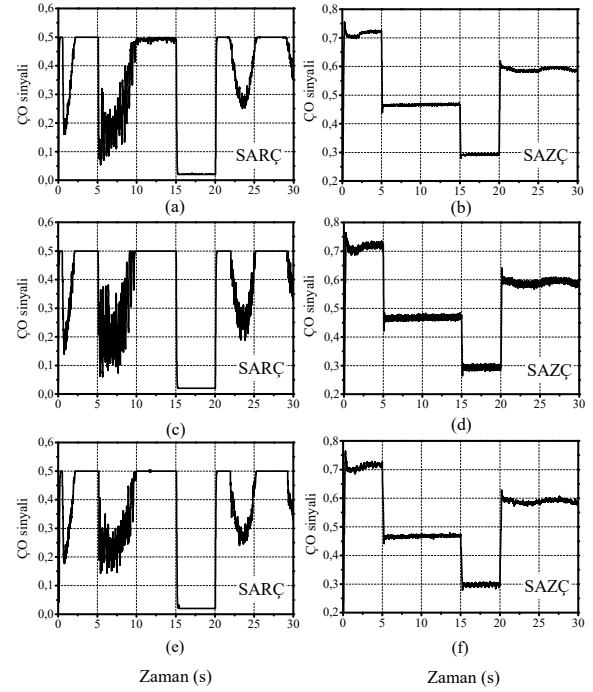
Şekil 92. DED'de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5)



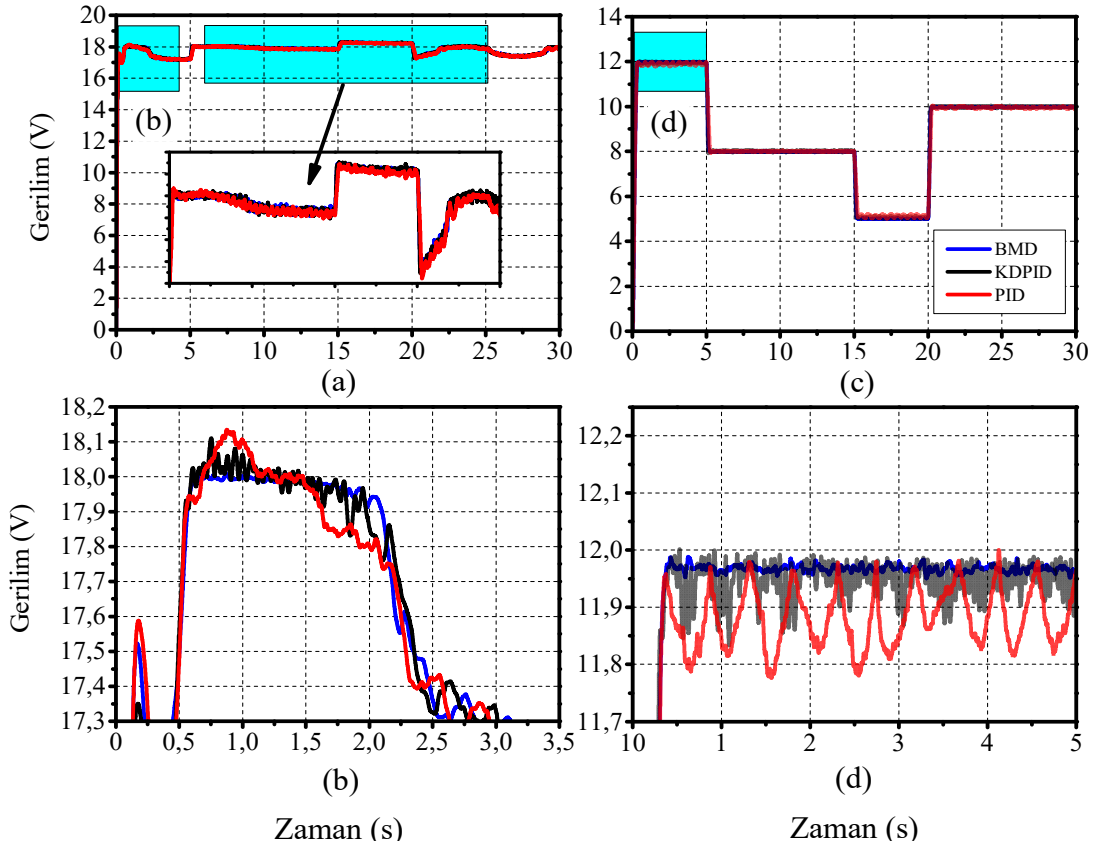
Şekil 94. Yük tarafı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5)



Şekil 93. DA-bara gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5)



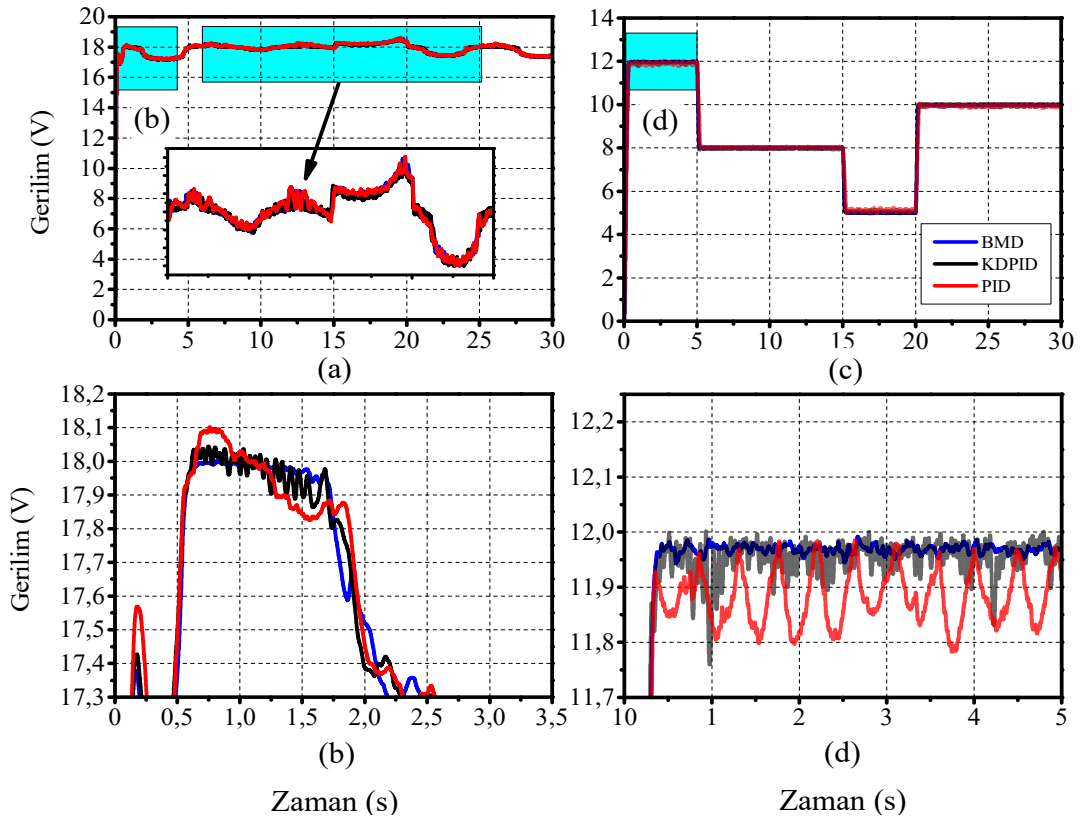
Şekil 95. ÇO sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D5)



Şekil 96. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D5)

6. Durum: Düzenli Dalga Hali, UK Bağlantılı, Değişken Çıkış Gerilimi Referansı, DA Direnç-Motor-Lamba Yükleri (D6)

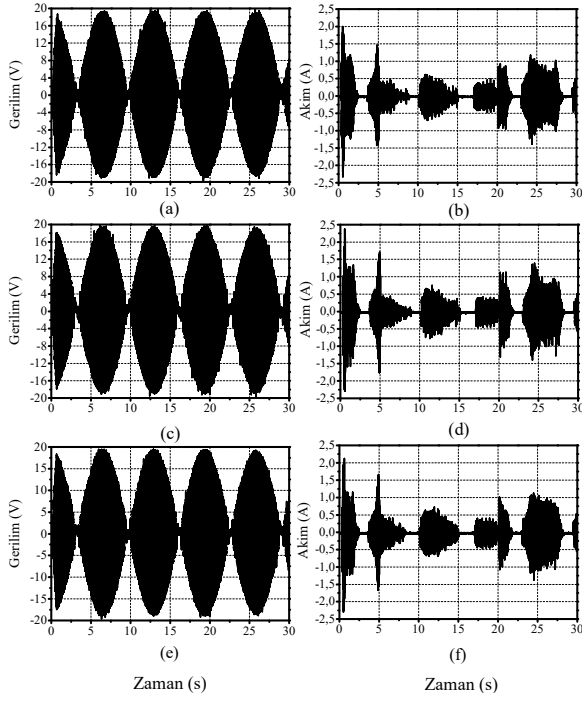
Bu durumun (D6) 5. Durumda yapılan testten tek farkı düzenli dalga halinin dikkate alınmasıdır. Yine DA-bara referans sinyali 18 V sabit alınmış, yük tarafı referans sinyali ise değişken olarak sisteme uygulanmıştır. Denetleyicilerin DA-bara ve yük tarafı gerilim sinyallerinin grafikleri Şekil 97’de verilmektedir. Kullanılan denetleyiciler çıkış referans sinyalini izlemeyi başarmaktadır. En yüksek aşım PID denetleyici elde edilmiş, en az performans ölçümünü de BMD sağlamıştır (Tablo 20).



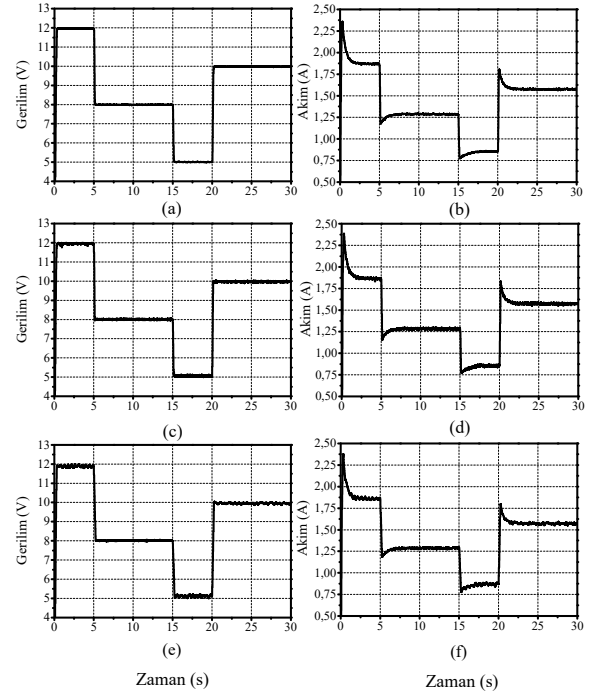
Şekil 97. Denetleyicilerin DA bara (a, b) ve yük (c, d) gerilimleri karşılaştırılması (D6)

Tablo 20. Denetleyicilerin deneysel performanslarının karşılaştırılması (D6)

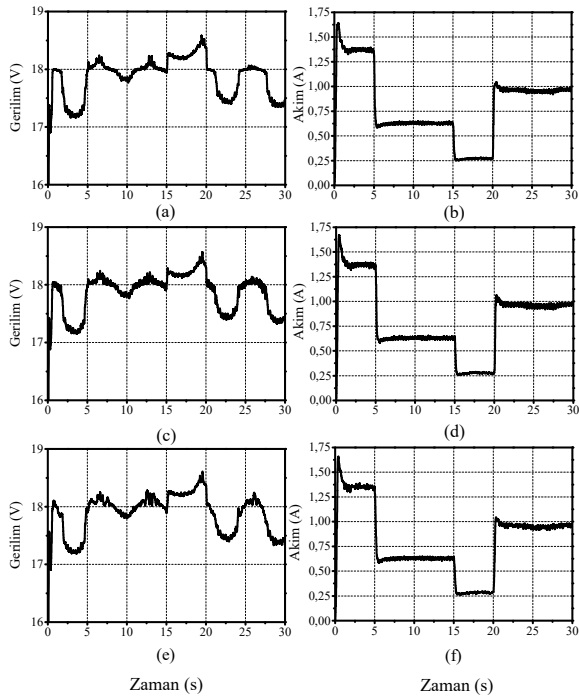
| Çıkış | Denetleyiciler | Performans kriterleri | | |
|---------|----------------|-----------------------|------|-------|
| | | ITAE | IAE | ISE |
| DA-bara | BMD | 110.95 | 8.32 | 14.28 |
| | KDPID | 111.71 | 8.34 | 14.33 |
| | PID | 120.69 | 8.79 | 14.39 |
| Yük | BMD | 22.68 | 3.34 | 18.38 |
| | KDPID | 29.10 | 3.75 | 18.55 |
| | PID | 48.21 | 5.25 | 21.49 |



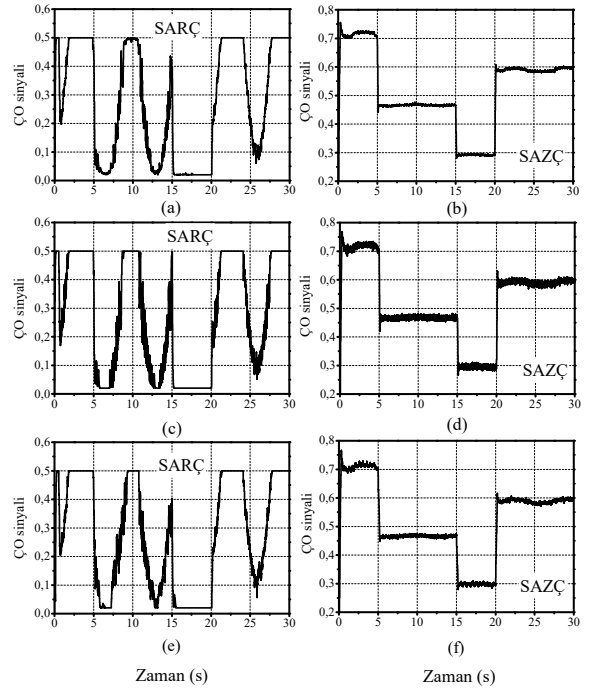
Şekil 98. DED'de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6)



Şekil 100. Yük tarafı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6)



Şekil 99. DA-bara gerilim-akım sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6)

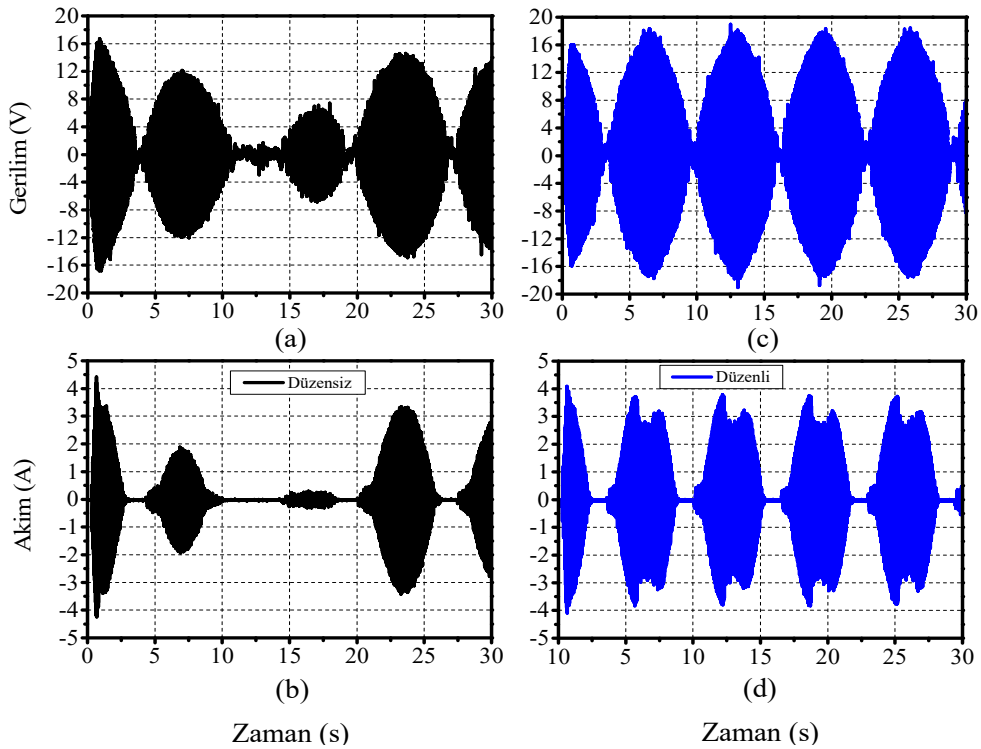


Şekil 101. ÇO sinyalleri, (a, b) BMD, (c, d) KDPID, (e, f) PID (D6)

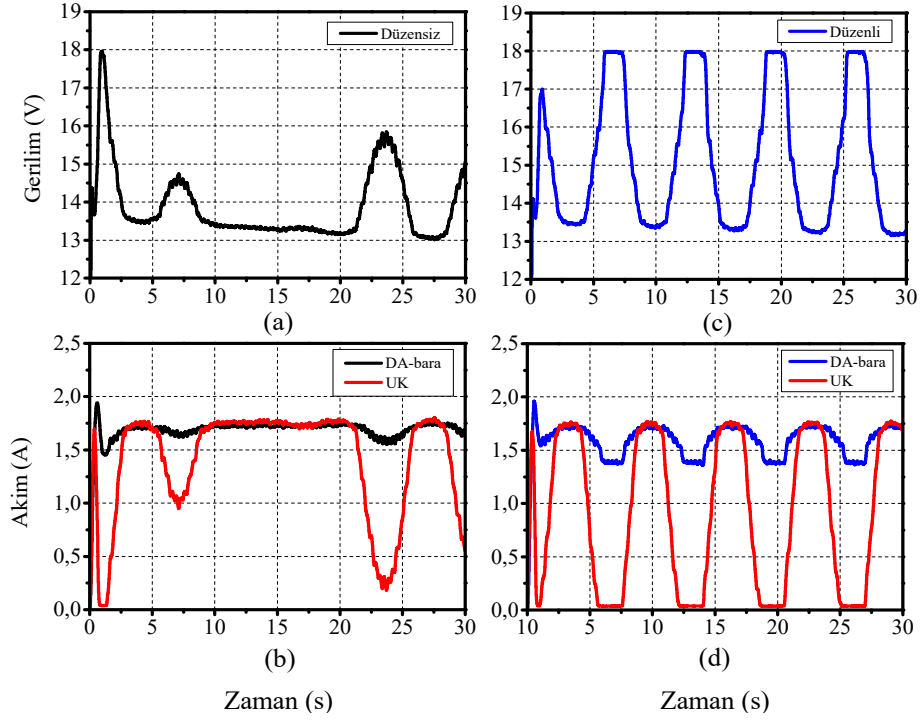
Bu duruma ait denetleyici çeşitleriyle elde edilen DED, DA-bara ve yük tarafı gerilim-akım sinyalleri ile DA-DA çeviricilerin denetimi için üretilen ÇO oranı grafikleri sıra ile Şekil 98-101'de verilmektedir. Yük tarafında verilen çıkış gerilimi referans değerindeki değişimlerin ve motor yükünün, DA-bara gerilimini etkilediği şekillerden açıkça görülmektedir.

7. Durum: Düzenli-Düzensiz Dalga Hali, Farklı Gerilim Değerinde UK Bağlantılı, DA Direnç-Motor-Lamba Yükleri (D7)

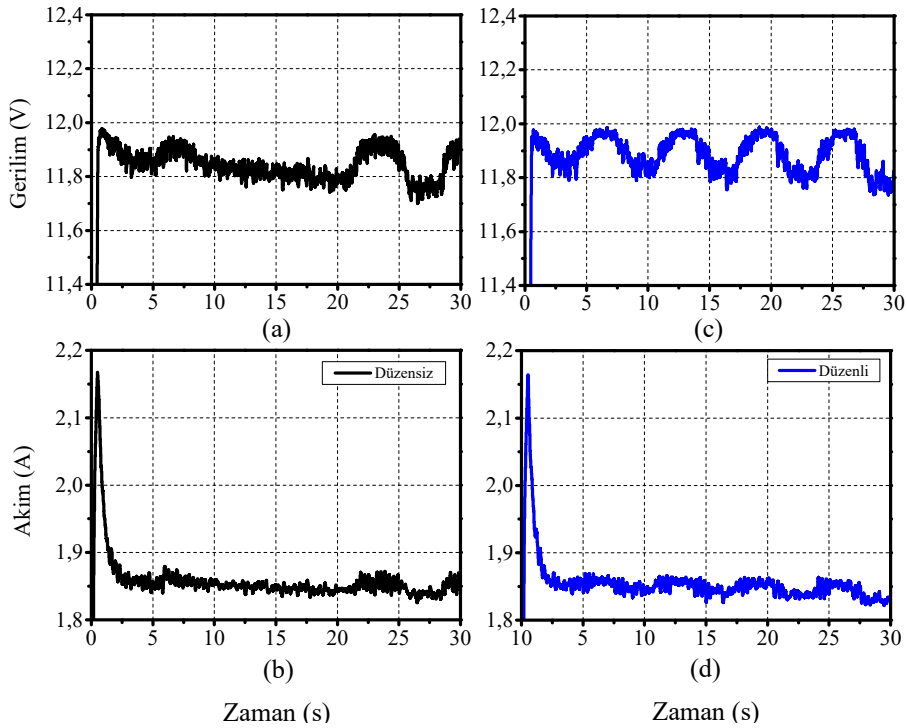
Bu durum da (D7) hem düzenli hem de düzensiz dalga hali için farklı UK şarj durumunda tasarlanan sistemin performansı incelenmektedir. Diğer durumlarda en iyi sistem yanıtları BMD ile elde edildiği için bu durumda sadece BMD ile denetlenen güç elektroniği ara yüzüne ait grafikler sunulmaktadır. Yük olarak DA motor-direnç-lamba yük üçlüsü kullanılmaktadır. DA-bara ve yük tarafı gerilim referans değerleri ise sabit alınmaktadır. İlk olarak bu durumda DED'de indüklenen gerilim ve DED'den çekilen akım grafikleri Şekil 102'te verilmektedir. DED'den çekilen akım fazla olduğu için aynı referans dalga hızında üretilen gerilimin daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 102. DED'de üretilen gerilim-akım sinyalleri, (a, b) düzensiz dalga hali, (c, d) düzenli dalga hali (D7)



Şekil 103. DA-bara gerilim-akım sinyalleri, (a, b) düzensiz dalga hali, (c, d) düzenli dalga hali (D7)



Şekil 104. Yük tarafı gerilim-akım sinyalleri, (a, b) düzensiz dalga hali, (c, d) düzenli dalga hali (D7)

İkinci olarak DA-bara gerilim-akım sinyalleri Şekil 103'te verilmektedir. Görüldüğü üzere DA-baraya paralel bağlı UK'nın şarjı 13.5V civarındadır. Bu durum güneş enerjisinin olmadığı yani istenilen UK şarj geriliminin sağlanmadığı durumu ifade etmektedir. DA-baranın geriliminde görülen gerilim tepecikleri DED'den baraya aktarılan enerjidir. Eğimli bir biçimde git gide azalan düzgün gerilim ise UK'nın DA baraya aktardığı gerilimdir. Bu durum için DA-bara geriliminin ciddi salınımlar içerdiği görülmektedir.

Şekil 103'te verilen DA-bara akım sinyalleri incelenecek olursa düzensiz dalga halinde görülen uzun süreksizlik durumunda UK'dan çekilen akım kırmızı renkli sinyal ile gösterilmektedir. Düzenli dalga halinde ise dalga sıfır geçişleri anında UK devreye girmektedir. Her iki dalga durumunda da DA-bara sinyalinden UK akımı çıkarılırsa DED'in sisteme aktardığı akım bulunabilir.

Son olarak yük tarafına ait gerilim akım-sinyalleri Şekil 104'te verilmektedir. DA-baranın salınımlar içermesi nedeniyle çıkış geriliminde de küçük salınımlar görülmektedir. BMD ile çıkış geriliminde salınımların bu kadar artmasının bir diğer nedeni de UK şarjının kritik bir seviyede olmasından kaynaklanmaktadır. UK devrede iken 13,5 V civarında olan DA-bara gerilimi anahtar kayıpları ve seri parazit dirençler nedeniyle daha da azalarak SAZÇ üzerinden yüke aktarılmaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kıyı konumlu, küçük enerji ölçekli bir doğrudan sürürlü DED’de düzensiz dalga karakteristiği nedeniyle ortaya çıkan enerji düşümlerinin ve süreksizliklerinin giderilerek, sistem çıkışında yer alan yüklere kullanılabilir ve sürekliliği artırılmış bir enerji transferinin sağlanması hedeflenmiştir. Bu bağlamda UK enerji ünitesi ve güç elektroniği devrelerinden oluşan bir dalga enerji sistemi tasarlanmış, güç elektroniği devrelerinin denetiminde ise optimize edilmiş farklı tip denetleyici yöntemlerinin performans analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan DES’in etkinliğini test etmek için farklı yük, deniz ve UK bağlantı durumları dikkate alınmıştır. Deniz durumunda düzenli ve düzensiz dalgaların ürettiği enerji ile test edilen DES çıkışı aynı zamanda UK bağlantısının var olduğu ve olmadığı durumlar içinde irdelenmiştir. Ayrıca yük olarak farklı karakteristiğe sahip DA yükler ile hazır bir evirici üzerinden AA yük beslemesi de gerçekleştirilmiştir.

Bu bağlamda ilk olarak düzenli ve düzensiz dalga enerjisi karakteristiğini yansıtabilen bir DED emülatörü laboratuvar ortamında kurulmuştur. Dalga hız referans sinyali ile 3-faz motor sürücü üzerinden sürülen DED emülatöründe üretilen gerilim-akım sinyalleri benzetim ortamında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve modelleme başarımı incelenmiştir.

Güç elektroniği ara yüzü olarak seri bağlı senkron artıran-azaltan çeviriciler analiz edilerek tasarlanmış, bu çeviricilerin arasına dalga sıfır geçişlerinin yol açtığı gerilim düşümlerini gidermek için güneş enerjisi ile şarj edilen bir UK ünitesi entegre edilmiştir. UK, DA-baraya çevirici ara yüzü olmadan direkt bağlanmıştır. Böylelikle çeviri maliyetinden ve verim kayıplarından kazanç sağlanmıştır. Ayrıca UK’nın direkt bağlantı durumunda ortaya çıkabilecek kısa devre ve alt-üst şarj gerilimi gibi problemler için koruma devresi tasarımı da gerçekleştirilmiştir. SARÇ, SAZÇ ve UK ünitesinin deneysel sonuçları ile bilgisayar ortamında elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak elde edilen modelleme başarımı tartışılmıştır. DA-DA çeviriciler için optimize edilmiş BMD, KDPID ve PID denetleyicilerin performansları analiz edilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak son yıllarda dikkat çeken ve diğer sezgisel arama algoritmaları ile karşılaştırıldığında optimal sonuca daha iyi ve hızlı yakınsayan ÇTA ile denetleyici parametrelerinin optimum ayarlanmasında sıkça kullanılan

PSO algoritması kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarında ÇTA, PSO'ya göre daha iyi performans ölçütü değerleri sağlamıştır.

Denetleyicilerin performansları incelendiğinde ise BMD'nin her koşulda KDPID ve PID denetleyicilere göre hem performans ölçütü hem de sistem yanıtları karşılaştırılmasında bariz bir üstünlüğünün olduğu görülmektedir. KDPID denetleyici ise kesir dereceli türev ve integral işlemleri sayesinde PID denetleyiciye göre daha iyi bir performans ölçütü değeri sağlamaktadır.

DeneySEL sistemlerin denetiminde ve verilerin toplanmasında dSPACE firmasına ait DS 1104 denetleyici kartı ve bağlantı kutusu kullanılmaktadır. Denetleyici ve optimizasyon algoritmaları ile sistemlerin bilgisayar ortamında modellenmesi Matlab programında gerçekleştirilmiştir.

5. ÖNERİLER VE TARTIŞMA

Laboratuvar ortamında kurulan DED sistemi küçük güçlü kıyı dalgalarından elektrik enerjisi üretimine yönelik bir araştırma için tasarlanmıştır. Bu tarz sistemlerin seri-paralel kombinasyonlu bağlantılarıyla güç sistemi kapasitesi oldukça artırılabilir. Üretilen enerji tek veya çift yönlü eviriciler kullanılarak şebekeye aktarılabilir.

UK'nın modellenmesinde elde edilen hata literatürde yer alan farklı tip UK modelleme yöntemleriyle veya kesir dereceli modelleme ile daha da az elde edilebilir. Bu durumda UK gerilim-akım dinamiklerinin daha iyi bir şekilde yansıtılmasına imkân sağlayacaktır. Tez kapsamında solar şarjlı UK ünitesi direkt olarak çevirici kullanılmadan enerji sistemine entegre edilmiştir. UK çıkışına çevirici eklenerek farklı değerlerde istenilen DA-bara gerilimi sağlanabilir. UK'nın kısa zamanda yüksek güç sağlama kabiliyeti ile akü grubunun uzun süreli enerji sağlama avantajı birleştirilerek, paralel bağlı bir enerji depo ünitesi sistemin sürdürülebilirliğini daha da artıracaktır.

SAZÇ ve SARÇ güç elektroniği devrelerinin de modelleme başarımları sinüs fonksiyonu bir ÇO sinyalinin devrelere giriş olarak uygulanmasıyla sabit yük altında çıkış gerilimlerinin karşılaştırılması sonucunda elde edilmiştir. SAZÇ ile oldukça başarılı değerler elde edilmesine rağmen, SARÇ'ta daha fazla modelleme hatası ortaya çıkmıştır. Her iki çevirici içinde kesir dereceli modelleme yöntemi ile daha iyi bir modelleme başarımları elde edilebilir.

Güç elektroniği devreleri ile istenilen DA-bara ve yük tarafı gerilim değerlerinin elde edilebilmesi için BMD, KDPID ve PID denetleyiciler kullanılarak, performans karşılaştırılması yapıldı. Farklı tip denetleyicilerin veya çevrimiçi uyarlamalı denetim sistemlerinin tasarımı ile toplam sistem verimi daha da artırılabilir.

Denetleyicilerin tasarımında amaç fonksiyonu olarak bilindik bir denetleyici performans ölçütü ITAE kullanılmaktadır. ITAE'nin yerine aşım, artış zamanı, oturma zamanı gibi sistemin geçici durum parametrelerini ve kalıcı hal hatası gibi kalıcı durum parametrelerini içeren bir amaç fonksiyonu da tasarlanıp, sistem yanıtları tekrar irdelenebilir.

6. KAYNAKLAR

1. ExxonMobil, Outlook for energy: a view to 2040, Technical Report, 2017.
2. <https://teias.gov.tr/tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri/2015>. 1 Mart 2017.
3. Wang L. ve Chen Z.J., Stability analysis of a wave-energy conversion system containing a grid-connected induction generator driven by a wells turbine, IEEE Transactions on Energy Conversion, 25, 2 (2010) 555-563.
4. Vining J.G. ve Muetze A.M., Economic factors and incentives for ocean wave energy conversion, IEEE Transactions on Industry Applications, 45, 2 (2009) 547-554.
5. REN21, Renewables 2015 Global Status Report, 2015
6. Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Seyboth K., Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlomer S., Von Stechow C. ve Matschoss P., Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, 2012.
7. McCormick M., Ocean Wave Energy Conversion, Wiley, New York, 1981.
8. Ringwood J.V., Bacelli G. ve Fusco F., Energy-maximizing control of wave-energy converters: the development of control system technology to optimize their operation, IEEE Control Systems, 34, 5 (2014) 30-55.
9. Pelc R. ve Fujita R.M., Renewable energy from the ocean, Marine Policy, 26, 6 (2002) 471-479.
10. López I., Andreu J., Ceballos S., De Alegría I.M. ve Kortabarria I., Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27 (2013) 413-34.
11. World Energy Council, World energy perspective, cost of energy technologies, Bloomberg New Energy Finance, 2013.
12. Delucchi M. A. ve Mark Z. J., Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs and policies, Energy policy, 39, 3 (2011) 1170-1190.
13. Mork G., Barstow S., Kabuth A. ve Pontes M.T., Assessing the global wave energy potential, ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Ocak 2010, Shanghai, Bildiriler Kitabı: 447-454.

14. Vicinanza D., Contestabile P. ve Ferrante V., Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy), Renewable Energy, 50 (2013) 506-521.
15. Hepbasli A., Ozdamar A. ve Ozalp N., Present Status and Potential of Renewable Energy Sources in Turkey, Energy Sources, 23, 7 (2001) 631-648.
16. Sağlam M., Sulukan E. ve Uyar T. S., Wave energy and technical potential of Turkey, Journal of Naval Science and Engineering, 6, 2 (2010) 34-50.
17. Rusu E., Wave energy assessments in the Black Sea, Journal of marine science and technology, 14, 3 (2009) 359-372.
18. Akpınar A. ve Kömürcü M. İ., Assessment of wave energy resource of the Black Sea based on 15-year numerical hindcast data, Applied Energy, 101, (2013) 502-512.
19. Aydoğan B., Ayat B. ve Yüksel Y., Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data, Renewable energy, 57, (2013) 436-447.
20. Akpınar A. ve Kömürcü M. İ., Wave energy potential along the south-east coasts of the Black Sea, Energy, 42, 1 (2012) 289-302.
21. Kapluhan E., Enerji Coğrafyası Açısından Bir İnceleme: Dalga Enerjisinin Dünyada'ki ve Türkiye'deki Kullanım Durumu, Uluslararası Avrasya Sosyal Bilimler Dergisi, 5, 17 (2014) 65-86.
22. <http://www.bakka.gov.tr/site/haber/951/>. 27 Mart 2017.
23. Antonio F. D., Wave energy utilization: A review of the Technologies, Renewable and sustainable energy reviews, 14, 3 (2010) 899-918.
24. Clément A., McCullen P., Falcão A., Fiorentino A., Gardner F., Hammarlund K., Lemonis G., Lewis T., Nielsen K., Petroncini S. ve Pontes M.T., Wave energy in Europe: current status and perspectives, Renewable and sustainable energy reviews, 6, 5 (2002) 405-431.
25. Drew B., Plummer A. R. ve Sahinkaya M. N., A review of wave energy converter technology, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 223, 8 (2009) 887-902.
26. Ozkop E. ve Altas I. H., Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the Technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, (2017) 106-115.
27. Hong Y., Waters R., Boström C., Eriksson M., Engström J. ve Leijon M., Review on electrical control strategies for wave energy converting systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31, (2014) 329-342.

28. Kofoed J.P., Frigaard P., Friis-Madsen E. ve Sørensen H.C., Prototype testing of the wave energy converter wave dragon, Renewable Energy, 31, (2006) 181–189.
29. Yemm R., Pizer D. ve Retzler C., Floating apparatus and method for extracting power from sea waves, U.S. Patent No: 6,476,511, 5 Kasım 2002.
30. Henderson R., Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power takeoff system for the Pelamis wave energy converter, Renewable Energy, 31, 2 (2006) 271–283.
31. Costa J. S. D., Pinto P., Sarmiento A. ve Gardner F., Modeling of an ocean waves power device AWS, IEEE Control Applications Conference, Haziran 2003, İstanbul, Bildiriler Kitabı : 618–623.
32. Beirdol P., Valério D. ve Costa J. S. D., Linear model identification of the Archimedes wave swing, International conference on power engineering, energy and electrical drives, Nisan 2007, Portekiz, Bildiriler Kitabı: 660–665.
33. Leijon M., Boström C., Danielsson O., Gustafsson S., Haikonen K., Langhamer O., Strömstedt E., Stålberg M., Sundberg J., Svensson O. ve Tyrberg S., Wave energy from the North Sea: Experiences from the Lysekil research site, Surveys in geophysics, 29, 3 (2008) 221-240.
34. Brekken T.K., Von Jouanne A. ve Han H.Y., Ocean wave energy overview and research at Oregon State University, Power Electronics and Machines in Wind Applications Conference, Haziran 2009, USA, 1-7.
35. Boström C. ve Leijon M., Operation analysis of a wave energy converter under different load conditions, IET renewable power generation, 5, 3 (2011) 245-250.
36. Thorburn K. ve Leijon M., Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters, Ocean Engineering, 34, 5 (2007) 908-916.
37. Nie Z., Xiao X., Yi H. ve Kang Q., Direct drive wave energy converters integrated with a composite energy storage system, IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, Ağustos 2011, Çin, 1-5.
38. Luan H., Onar O.C. ve Khaligh A., Dynamic modeling and optimum load control of a PM linear generator for ocean wave energy harvesting application, In Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Şubat 2009, Washington, Bildiriler Kitabı: 739-743.
39. Gargov N.P. ve Zobaa A.F., Multi-phase air-cored tubular permanent magnet linear generator for wave energy converters, IET Renewable Power Generation, 6, 3 (2012) 171-176.
40. Barnes M., El-Feres R., Kromlides S. ve Arulampalam A., Power quality improvement for wave energy converters using a D-STATCOM with real energy

storage, IEEE First International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Kasım 2004, Hong Kong, Bildiriler Kitabı: 72-77.

41. Murray D.B., Hayes J.G., O'Sullivan D.L. ve Egan M.G., Supercapacitor testing for power smoothing in a variable speed offshore wave energy converter, Journal of Oceanic Engineering, 37, 2 (2012) 301-308.
42. Tedeschi E., Carraro M., Molinas M. ve Mattavelli P., Effect of control strategies and power take-off efficiency on the power capture from sea waves, IEEE Transactions on Energy Conversion, 26, 4 (2011) 1088-1098.
43. Colak I. ve Kocabas A.D., Space vector modulation controlled three-level converter for ocean wave energy conversion, 18th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Nisan 2016, Lemesos, Bildiriler Kitabı: 1-5.
44. Andersen P., Pedersen T.S., Nielsen K.M. ve Vidal E., Model predictive control of a wave energy converter, IEEE Conference on Control Applications, Eylül 2015, Sydney, Bildiriler Kitabı: 1540-1545.
45. Mendonça H. ve Martinez S., Energy conversion efficiency assessment of a direct drive wave energy converter with different current controllers, IEEE International Energy Conference, Nisan 2016, Leuven, 1-6.
46. Farrok O., Islam M.R. ve Sheikh M.R.I., Fuzzy logic based an improved controller for wave energy conversion systems, International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology, Mayıs 2015, Dhaka, Bildiriler Kitabı: 1-6.
47. Gruosso G., Zhou Q. ve Bizzozero F., Comparison among passive and active rectifier for seawave energy production, International IEEE Conference on Clean Electrical Power, Haziran 2015, Taormina, Bildiriler Kitabı: 493-498.
48. Ozkop E., Altas I.H. ve Sharaf A.M., A novel fuzzy logic tansigmoid controller for wave energy converter-grid interface dc energy utilization farm, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Mayıs 2009, Canada, Bildiriler Kitabı: 1184-1187.
49. Jama M. ve Wahyudie A., Online Damping Strategy for Controlling Heaving Wave Energy Converters Using Three-Phase Bridge Boost Rectifier, IEEE Access , 14 8 (2015) 1-9.
50. Ahmad S., Uddin M.J., Nisu I.H., Ahsan M.M.U., Rahman I. ve Samrat N.H., Modeling of grid connected battery storage wave energy and PV hybrid renewable power generation, IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering, Şubat 2017, Bangladesh, Bildiriler Kitabı: 375-380.
51. Al-Mhana T., Zahawi B. ve Pickert V., Symmetrical duty cycle control for FCSC converter for wave energy applications, IEEE 9th International Symposium on

Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing, Temmuz 2014, Manchester, Bildiriler Kitabı: 56-60.

52. Muller N., Kouro S., Malinowski M., Rivera S. ve Wu B., Cascaded H-bridge multilevel converter interface for Wave Dragon energy conversion system, IEEE 39th Annual Conference in Industrial Electronics Society, Kasım 2013, Vienna, Bildiriler Kitabı: 6201-6206.
53. Cantarellas A.M. Rakhshani E., Remon D. ve Rodriguez P., Grid connection control of VSC-based high power converters for wave energy applications, IEEE 39th Annual Conference in Industrial Electronics Society, Kasım 2013, Vienna, Bildiriler Kitabı: 5092-5097.
54. Wu F., Zhang X.P. ve Ju P., Application of the battery energy storage in wave energy conversion system, International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nisan 2009, Nanjing, Bildiriler Kitabı: 1-4.
55. Ozkop E., Altas I.H. ve Sharaf A.M., A novel switched power filter-green plug (SPF-GP) scheme for wave energy systems, Renewable energy, 44 (2012) 340-358.
56. Ozkop E., Sharaf A. and Altas I.H., An adaptive fuzzy PI controlled bus quantity enhancer for wave energy systems, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 24, 4 (2016) 2454-2468.
57. Nie Z., Xiao X., McMahon R., Clifton P., Wu Y. ve Shao S., Emulation and control methods for direct drive linear wave energy converters. IEEE Transactions on Industrial informatics, 9, 2 (2013) 790-798.
58. Lu S.Y., Wang L., Lo T.M. ve Prokhorov A.V., Integration of wind power and wave power generation systems using a DC microgrid, IEEE Transactions on Industry Applications, 51, 4 (2015) 2753-2761.
59. Blanco M., Navarro G. ve Lafoz M., Control of power electronics driving a switched reluctance linear generator in wave energy applications, IEEE 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Eylül 2009, Barcelona, Bildiriler Kitabı: 1-9.
60. Vermaak R. ve Kamper M.J., Experimental evaluation and predictive control of an air-cored linear generator for direct-drive wave energy converters, IEEE Transactions on Industry Applications, 48, 6 (2012) 1817-1826.
61. Kazmierkowski M.P. ve Jasinski M., Power electronics for renewable sea wave energy, IEEE 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Mayıs 2010, Brasov, Bildiriler Kitabı: 4-9.
62. Hazra S. ve Bhattacharya S., Short time power smoothing of a low power wave energy system, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Ekim 2012, Montreal, Bildiriler Kitabı: 5846-5851.

63. Hazra S. ve Bhattacharya S., Hybrid energy storage system comprising of battery and ultra-capacitor for smoothing of oscillating wave energy, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Eylül 2016, Milwaukee, Bildiriler Kitabı: 1-8.
64. Boström C., Ekegård B., Waters R., Eriksson M. ve Leijon M., Linear generator connected to a resonance-rectifier circuit, IEEE Journal of oceanic engineering, 38, 2 (2013) 255-262.
65. Cantarellas A.M., Rodriguez D.R. ve Rodriguez P., Adaptive Vector Control of Wave Energy Converters, IEEE Transactions on Industry Applications, 52, 3 (2017) 2382-2391.
66. Boström C., Lejerskog E., Stålberg M., Thorburn K. ve Leijon M., Experimental results of rectification and filtration from an offshore wave energy system, Renewable Energy, 34, 5 (2009) 1381-1387.
67. Rahm M., Boström C., Svensson O., Grabbe M., Bülow F. ve Leijon, M., Offshore underwater substation for wave energy converter arrays, IET Renewable Power Generation, 4, 6 (2010) 602-612.
68. Ringwood, J., Control techniques for ocean energy applications, IET, 2013.
69. Godfrey B., Renewable energy; power for sustainable future, Oxford University Press 2nd edition, 2004.
70. Sorensen R.M., Basic coastal engineering, Springer Science & Business Media; 2005.
71. Jacobson P.T., Hagerman G. ve Scott G., Mapping and assessment of the United States ocean wave energy resource, Electric Power Research Institute Report; 1 Aralık 2011.
72. Moeini M.H. ve Etemad-Shahidi A., Application of two numerical models for wave hindcasting in Lake Erie, Applied Ocean Research, 29, (2007) 137–145.
73. Pierson W.J. ve Moskowitz L., A proposed spectral form for fully developed seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii, Journal of Geophysical Research, 69, (1964) 5181–5191.
74. Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.A., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meerburg A., Miller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W. ve Walden H., Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe. Deutsches Hydrographisches Institute, Hamburg, Germany, 1973.

75. Yin Yeo N. ve Soo-Hong P., Analysis and Realization of Ocean Wave Surface by Utilizing Matlab, Journal of the Korea institute of electronic communication sciences, 5, 3 (2010) 281-287.
76. Akpınar A., Van Vledder G.P., Kömürçü M.İ. ve Özger M., Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea, Continental Shelf Research, 50 (2012) 80-99.
77. Warren I.R. ve Bach H., MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas, Environmental Software, 7, 4 (1992) 229-240.
78. Tolman H.L., A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents, Journal of Physical Oceanography, 21 (1991) 782–797.
79. Booij N., Holthuijsen L.H. ve Ris R.C., A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation, Journal of Geophysical Research, 104, C4 (1999) 7649–7666.
80. Ris R.C., Holthuijsen L.H. ve Booij N., A third-generation wave model for coastal regions: 2. verification, Journal of Geophysical Research: Oceans, 104, C4 (1999) 7667-7681.
81. Salter S.H., Wave power, Nature, 249, 5459 (1974) 720-724.
82. Akpınar A., Kömürçü M.İ., Özger M. ve Kankal M., Dalga Simülasyonu için Karadeniz’de Swan Uygulaması, 7. Kıyı Mühendisliği Sempozyumu, Kasım 2011, Trabzon, Bildiriler Kitabı: 269-279.
83. Hong Y., Eriksson M., Castellucci V., Boström C. ve Waters R., Linear generator-based wave energy converter model with experimental verification and three loading strategies, IET Renewable Power Generation, 10, 3 (2016.) 349-359.
84. Krishna R., Svensson O., Rahm M., Kottayil S.K., Waters R. ve Leijon M., Analysis of linear wave power generator model with real sea experimental results, IET Renewable Power Generation, 7, 5 (2013) 574-581.
85. Vander Meulen A.H., Novel control of a permanent magnet linear generator for ocean wave energy applications, Yüksek Lisans Tezi, Oregon State Üniversitesi, 2007.
86. Mohan N., Advanced electric drives: analysis, control, and modeling using MATLAB/Simulink, John wiley & sons Ltd. publication, 2014.
87. Mohan, N., First course on power electronics, Minnesota Power Electronics Research & Education, 2003.
88. Al Sakka M., Van Mierlo J. ve Gualous H., DC/DC converters for electric vehicles, Electric vehicles–modelling and simulations, 309 (2011) 311-332.

89. Schupbach R. M. ve Balda J. C., Comparing DC-DC converters for power management in hybrid electric vehicles, *Electric Machines and Drives Conference*, Haziran 2003, Madison, Bildiriler Kitabı: 1369-1374.
90. Baroudi J. A., Dinavahi V. ve Knight A. M., A review of power converter topologies for wind generators, *Renewable energy*, 32, 14 (2007) 2369-2385.
91. López I., Andreu J., Ceballos S., De Alegría I.M. ve Kortabarria I., Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, (2013) 413-434.
92. Carrasco J.M., Franquelo L.G., Bialasiewicz J.T., Galván E., Portillo Guisado R.C., Prats M.M., León J.I. ve Moreno-Alfonso N., Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey, *IEEE Transactions on industrial electronics*, 53, 4 (2006) 1002-1016.
93. Koutroulis E., Kalaitzakis K. ve Voulgaris N.C., Development of a microcontroller-based photovoltaic maximum power point tracking control system, *IEEE Transactions on power electronics*, 16, 1 (2001) 46-54.
94. Jain M., Daniele M. ve Jain P. K., A bidirectional DC-DC converter topology for low power application, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15, 4 (2000) 595-606.
95. Bekiarov S.B. ve Emadi A., Uninterruptible power supplies: classification, operation, dynamics, and control, 77th Applied Power Electronics Conference and Exposition, Mart 2002, Dallas, Bildiriler Kitabı: 597-604.
96. Karpelson M., Wei G.Y. ve Wood R.J., A review of actuation and power electronics options for flapping-wing robotic insects, *Robotics and Automation Conference*, Mayıs 2008, Pasadena, Bildiriler Kitabı: 779-786.
97. Pressman A., Keith B. ve Morey T., *Switching power supply design*, McGraw-Hill, Inc., 2009.
98. Van Dijk E., Spruijt J.N., O'sullivan D.M. ve Klaassens J.B., PWM-switch modeling of DC-DC converters, *IEEE Transactions on Power electronics*, 10, 6 (1995) 659-65.
99. Duran E., Sidrach-de-Cardona M., Galan J. ve Andujar J.M., Comparative analysis of buck-boost converters used to obtain I-V characteristic curves of photovoltaic modules, *Power Electronics Specialists Conference*, Haziran 2008, Rhodes, Bildiriler Kitabı: 2036-2042.
100. Hernandez M., Aguilar C., Arau J., Sebastian J. ve Uceda J., Comparative analysis of boost and buck-boost derived topologies used as power factor correctors, 21st International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Kasım 1995, Orlando, Bildiriler Kitabı: 335-340.

101. Sesli E., Giriş Gerilimi ve Yüğü Değişken DA/DA Yukarı Dönüştürücü Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
102. Mohammad N., Muhammad Q., Mohammad R. T. H. ve Mohammad R. A., Parasitic Effects on the Performance of DC-DC SEPIC in Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Application, Smart Grid and Renewable Energy, 4, (2013) 113-121.
103. Jain, A. ve Marketing D.S., Synchronous vs. Asynchronous Buck Regulators, Semtech Corp., Camarillo, 2013, 1-5.
104. Kazimierzczuk M.K., Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters, A John Wiley and Sons Ltd. Publication, Dayton, Ohio, USA, 2008.
105. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/0f/01/44/fd/9b/26/46/68/CD00272622.pdf/files/CD00272622.pdf/jcr:content/translations/en.CD00272622.pdf>. 11 Mart 2016.
106. Lee S., Jung S., Park C., Rim C. T. ve Cho G. H., Accurate dead-time control for synchronous buck converter with fast error sensing circuits. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 60, 11 (2013) 3080–3089.
107. <https://www.infineon.com/dgdl/ir2110.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e>. 22 Şubat 2016.
108. <http://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1550469.pdf>. 10 Şubat 2016.
109. Conway B. E., Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications, Springer Science and Business Media, New York, 2013.
110. Maxwell Technologies, Gateway to a new thinking in energy management - ultracapacitors, San Diego, 2005.
111. Kötz R., ve Carlen M., Principles and applications of electrochemical capacitors, Electrochimica Acta, 45, 15 (2000) 2483-2498.
112. Kocaman B., Akıllı Şebekeler ve Mikro Şebekelerde Enerji Depolama Teknolojileri, Akıllı Şebekeler ve Türkiye Elektrik Şebekesinin Geleceği Sempozyumu, Nisan 2013, Ankara, Bildiriler Kitabı: 1-5.
113. Zubieta L. ve Boner R., Characterization of double-layercapacitors for power electronics applications, IEEE Transactions on Industry Applications, 36, 1 (2000) 199-205.

114. De Levie R., On porous electrodes in electrolyte solutions, Electrochimica Acta, 8, (1963) 751-780.
115. Buller S. K., Kok D. ve De Doncker R. W., Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy, IEEE Transactions on Industry Applications, 38, 6 (2002) 1622-1626.
116. Spyker R. L. ve Nelm R. M., Classical Equivalent Circuit Parameters for a Double-Layer Capacitor, IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems, 36, (2000) 829–836.
117. Shi, L. ve Crow M., Comparison of ultracapacitor electric circuit models, Power and energy society general meeting-conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, Temmuz 2008, Pittsburgh, Bildiriler Kitabı: 1–6.
118. Nelms R. M., Cahela D. R. ve Bruce J. T., Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 39, 2 (2003) 430-438.
119. http://www.maxwell.com/images/documents/hq_48v_ds10162013.pdf. 8 Şubat 2016.
120. Altas I.H. ve Sharaf A.M., A fuzzy logic power tracking controller for a photovoltaic energy conversion scheme, Electrical Power System Research Journal, 25, 3 (1992) 227–238.
121. https://www.dspace.com/shared/data/pdf/2017/dSPACE_DS1104_Catalog2017_E.pdf, DS1104 R&D controller board specifications. 5 Mart 2016.
122. Ang K. H., Chong G., ve Yun L., PID control system analysis, design, and technology, IEEE transactions on control systems technology, 13, 4 (2005) 559-576.
123. Åström K. J., ve Hägglund T., The future of PID control, Control engineering practice, 9, 11 (2001) 1163-1175.
124. Wang Q.G, Lee T.H., Fung H.W., Bi Q. ve Zhang Y., PID tuning for improved performance, IEEE Transactions on control systems technology, 7, 4 (1999) 457-465.
125. Åström K. J. ve Hägglund T., Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins, Automatica, 20, 5 (1984) 645-651.
126. Skogestad S., Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning, Journal of process control, 13, 4 (2003) 291-309.
127. Knospe C., PID control, IEEE Control Systems Magazine, 26, 1 (2006) 30-31.

128. Gutiérrez R.E., Rosário J.M. ve Tenreiro Machado J., Fractional order calculus: basic concepts and engineering applications, Mathematical Problems in Engineering, (2010) 1-19.
129. Krishna B. T. ve Reddy K. V. V. S., Active and passive realization of fractance device of order $\frac{1}{2}$, Active and Passive Electronic Components, (2008) 1-5.
130. Lima M.F., Machado J.A. ve Crisóstomo M.M., Experimental Signal Analysis of Robot Impacts in a Fractional Calculus Perspective, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 11, 9 (2007) 1079-1085.
131. Rosario J.M., Dumur D. ve Machado J. T., Analysis of fractional-order robot axis dynamics, IFAC Proceedings Volumes, 39, 11 (2006) 367-72.
132. Ding-Y. X. ve Chun-na Z., Fractional order PID controller design for fractional order system., Control Theory & Applications, 5 (2007) 771-776.
133. Hamamci S. E., An algorithm for stabilization of fractional-order time delay systems using fractional-order PID controllers, IEEE Transactions on Automatic Control, 52, 10 (2007) 1964-1969.
134. Tao R., Bing D. ve Yue W., Research progress of the fractional Fourier transform in signal processing, Science in China Series F: Information Sciences, 49, 1 (2006) 1-25.
135. Sheng H., Yang Q. C. ve Tian S. Q., Fractional processes and fractional-order signal processing: techniques and applications, Springer Science & Business Media, 2011.
136. Li C. ve Weihua D., Remarks on fractional derivatives, Applied Mathematics and Computation, 187, 2 (2007) 777-784.
137. Podlubny I., Fractional Differential Equations, Academic Press, San Diego, 1999.
138. Itik M., Sahin E. ve Ayas M. S., Fractional order control of conducting polymer artificial muscles, Expert Systems with Applications, 42, 21 (2015) 8212-8220.
139. Ayas M. S., Altas I. H. ve Sahin E., Fractional order based trajectory tracking control of an ankle rehabilitation robot, Transactions of the Institute of Measurement and Control, (2016) 1-15.
140. Tepljakov A., Petlenkov E. ve Belikov J., FOMCON: Fractional-order modeling and control toolbox for MATLAB, International Conference in Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Haziran 2011, Poland, Bildiriler Kitabı: 684-689.
141. Zadeh L. A., Fuzzy sets, Information and Control, 8, 3 (1965) 338–353.

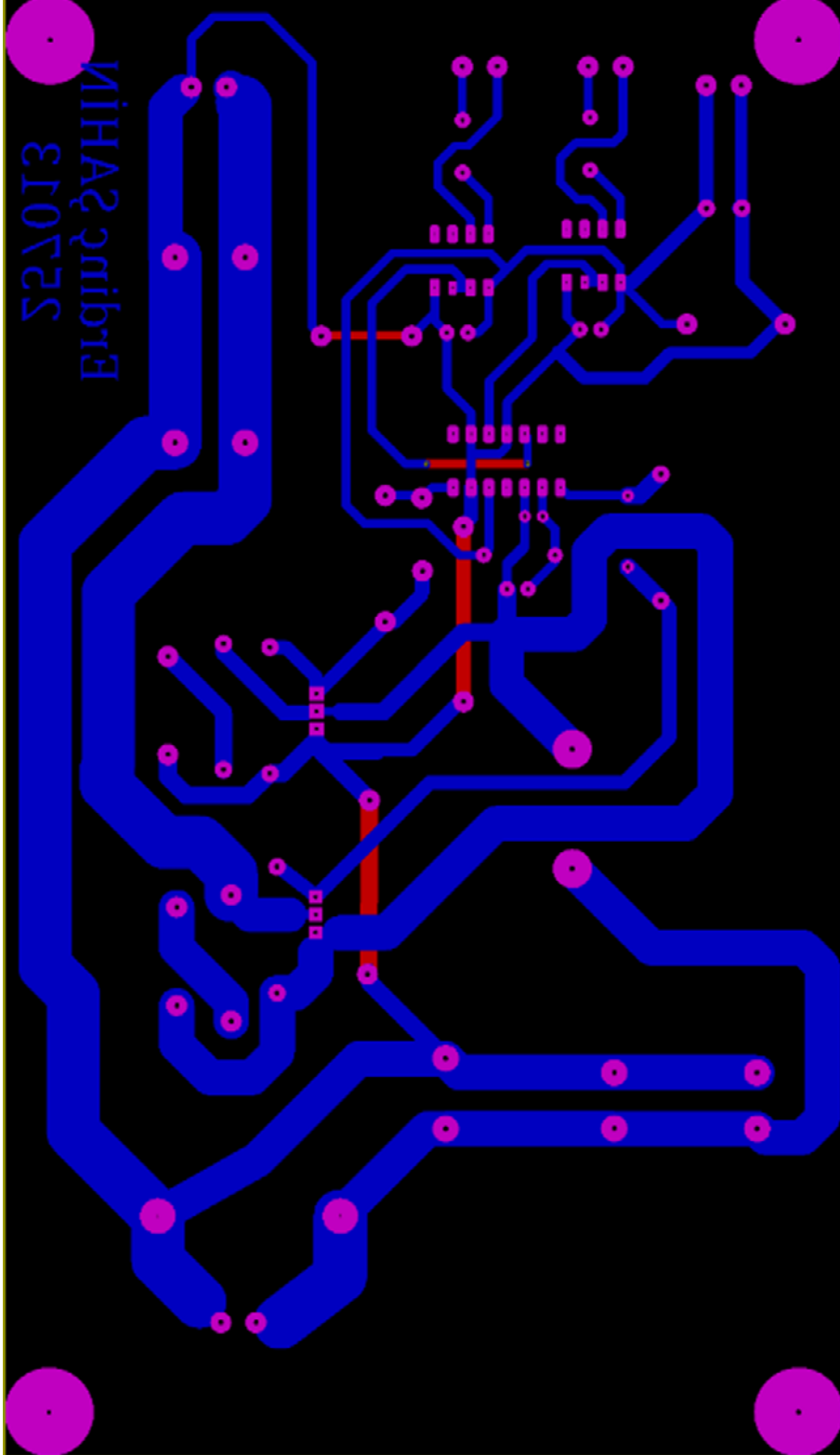
142. Mamdani E. H. ve Assilian S., An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, International Journal of Man-Machine Studies, 7, 1 (1975) 1-13.
143. Mamdani E. H., Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 121, 12 (1974) 1585-1588.
144. Mamdani E. H., Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, International Journal of Man-Machine Studies, 8, 6 (1976) 669-678.
145. Saffiotti A., The uses of fuzzy logic in autonomous robot navigation, Soft Computing-A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 1, 4 (1997) 180-97.
146. Das T. ve Kar I.N., Design and implementation of an adaptive fuzzy logic-based controller for wheeled mobile robots, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 14, 3 (2006) 501-510.
147. Hagra S.A., A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots, IEEE Transactions on Fuzzy systems, 12, 4 (2004) 524-539.
148. Raviraj V. S. C. ve Pares C. S., Comparative study of proportional-integral, sliding mode and fuzzy logic controllers for power converters, IEEE Transactions on Industry Applications, 33, 2 (1997) 518-524.
149. So W. C., Chi K. T. ve Yim-Shu L., Development of a fuzzy logic controller for DC/DC converters: design, computer simulation, and experimental evaluation, IEEE Transactions on Power Electronics, 11, 1 (1996) 24-32.
150. King P. J. ve Mamdani E. H., The application of fuzzy control systems to industrial processes, Automatica, 13, 3 (1977) 235-242.
151. Yen J., Langari R. ve Zadeh L. A., Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, IEEE press, 1995.
152. Kocaarslan I. ve Çam E., Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 27, 8 (2005) 542-549.
153. El-Hawary M.E., Electric power applications of fuzzy systems, Wiley-IEEE Press, 1998.
154. Ferreira A.A., Pomilio J.A., Spiazzi G. ve De Araujo Silva L., Energy management fuzzy logic supervisory for electric vehicle power supplies system, IEEE Transactions on Power Electronics, 23, 1 (2008) 107-115.

155. Mengi O. O. ve Altas I. H., A fuzzy decision making energy management system for a PV/Wind renewable energy system, Innovations in Intelligent Systems and Applications Symposium, Haziran 2011, İstanbul, Bildiriler Kitabı: 436-440.
156. Mengi O. O. ve Altas I.H., A Different Fuzzy Decision Making Mppt Method For a Micro Power Wind Turbine, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30, 2 (2015) 197-206.
157. Tabatabaei S. M. ve Vahidi B., Bacterial foraging solution based fuzzy logic decision for optimal capacitor allocation in radial distribution system, Electric Power Systems Research, 81, 4 (2011) 1045-1050.
158. Wang L. ve Langari R., Complex systems modeling via fuzzy logic, IEEE Conference on Decision and Control, Aralık 1994, USA, Bildiriler Kitabı: 4136-4141.
159. Altunkaynak A., Özger M. ve Çakmancı M., Fuzzy logic modeling of the dissolved oxygen fluctuations in Golden Horn, Ecological Modelling, 189, 3 (2005) 436-446.
160. Cheung W. W., Pitcher T. J. ve Pauly D., A fuzzy logic expert system to estimate intrinsic extinction vulnerabilities of marine fishes to fishing, Biological conservation, 124, 1 (2005) 97-111.
161. Junhong L. ve Lampinen J., A fuzzy adaptive differential evolution algorithm, Soft Computing, 9, 6 (2005) 448-462.
162. Li-Xin W., A course in fuzzy systems and control, Prentice Hall, 1997.
163. Klir G. ve Yuan B., Fuzzy sets and fuzzy logic, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
164. Zhao J. ve Bose B. K., Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive, IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, Kasım 2002, Sevilla, Bildiriler Kitabı: 229-234.
165. Monicka J., Gayathri N., Sekhar G. ve Kumar K. R., Performance evaluation of membership functions on fuzzy logic controlled ac voltage controller for speed control of induction motor drive, International Journal of Computer Applications, 13, 5 (2011) 8-12.
166. Lee C. C., Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller –I, IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, 20, 2 (1990) 404-418.
167. Mamdani E. H., Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, International symposium on Multiple-valued logic, Mayıs 1976, Utah, Bildiriler Kitabı: 196-202.

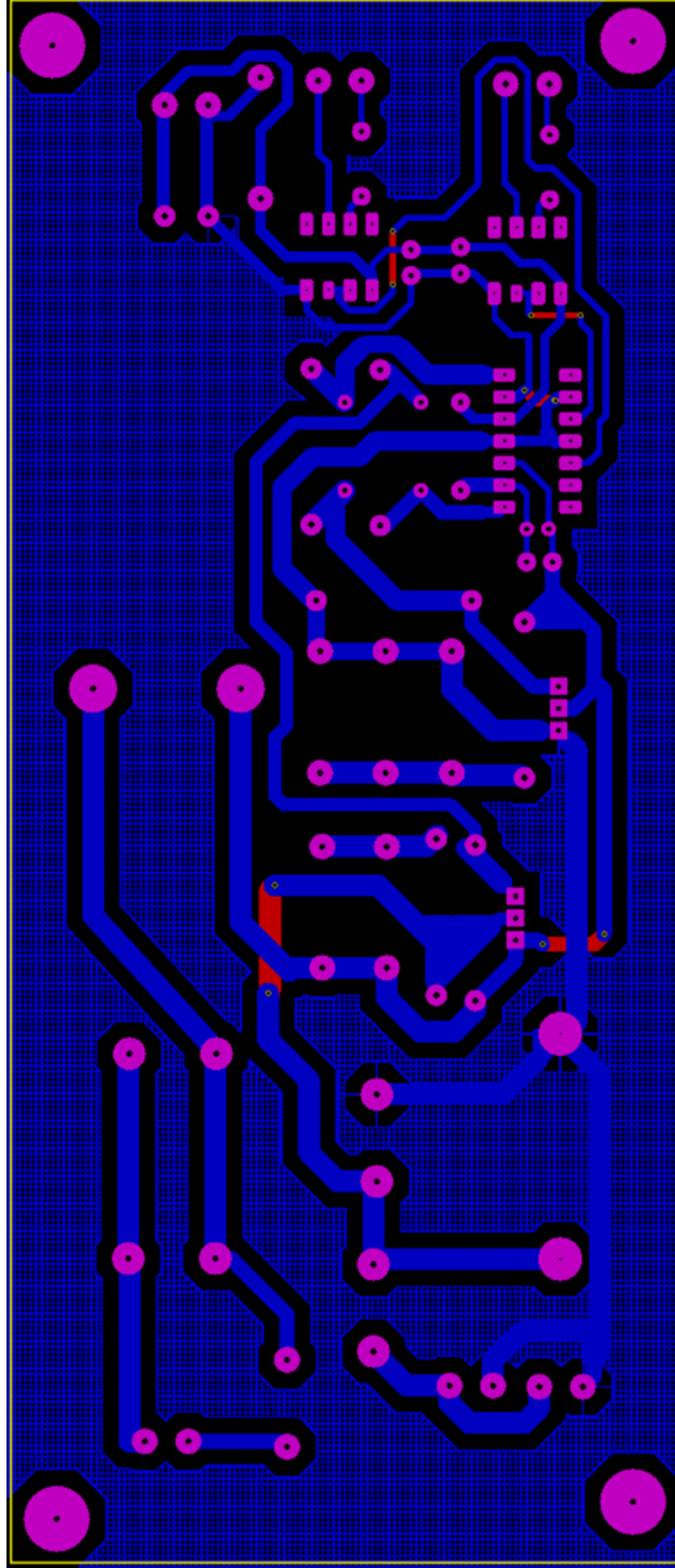
168. Altaş İ. H. ve Sharaf A. M., A Generalized Direct Approach for Designing Fuzzy Logic Controllers in Matlab/Simulink GUI Environment, International Journal of Information Technology and Intelligent Computing, 1 (2007).
169. Altaş İ.H., Bulanık Mantık: Bulanık Denetim, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e dergisi, 64, (1999) 76-81.
170. Lee K. S. ve Geem Z. W., A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice, Computer methods in applied mechanics and engineering, 194, 36 (2005) 3902-3933.
171. Yang X. S., Flower pollination algorithm for global optimization, International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation, Eylül 2012, Fransa, Bildiriler Kitabı: 240-249.
172. Abdelaziz A. Y., Ali E. S. ve Elazim S. A., Flower pollination algorithm and loss sensitivity factors for optimal sizing and placement of capacitors in radial distribution systems, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 78, (2016) 207-214.
173. Alam D. F., Yousri D. A. ve Eteiba M. B., Flower pollination algorithm based solar PV parameter estimation, Energy Conversion and Management, 101, (2015) 410-422.
174. Dash P., Saikia L. C. ve Sinha N., Flower pollination algorithm optimized PI-PD cascade controller in automatic generation control of a multi-area power system, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 82, (2016) 19-28.
175. Lakshmi D., Fathima A. P. ve Muthu R., A novel flower pollination algorithm to solve load frequency control for a hydro-thermal deregulated power system, Circuits and Systems, 7, 4 (2016) 166-178.
176. Sahin E. ve Altas I. H., FPA Tuned Fuzzy Logic Controlled Synchronous Buck Converter for a Wave/SC Energy System, Advances in Electrical and Computer Engineering, 17, 1 (2017) 39-48.
177. Eberhart R. ve Kennedy J., A new optimizer using particle swarm theory, International symposium on micro machine and human science, Ekim 1995, Nagoya, Bildiriler Kitabı: 39-43.
178. Schultz W. C. ve Rideout V. C., Control system performance measures: Past, present and future, IRE Transactions on Automatic Control, 1, (1961) 22-35.
179. Nagrath I. J., Control systems engineering, New Age International, 2006.

7. EKLER

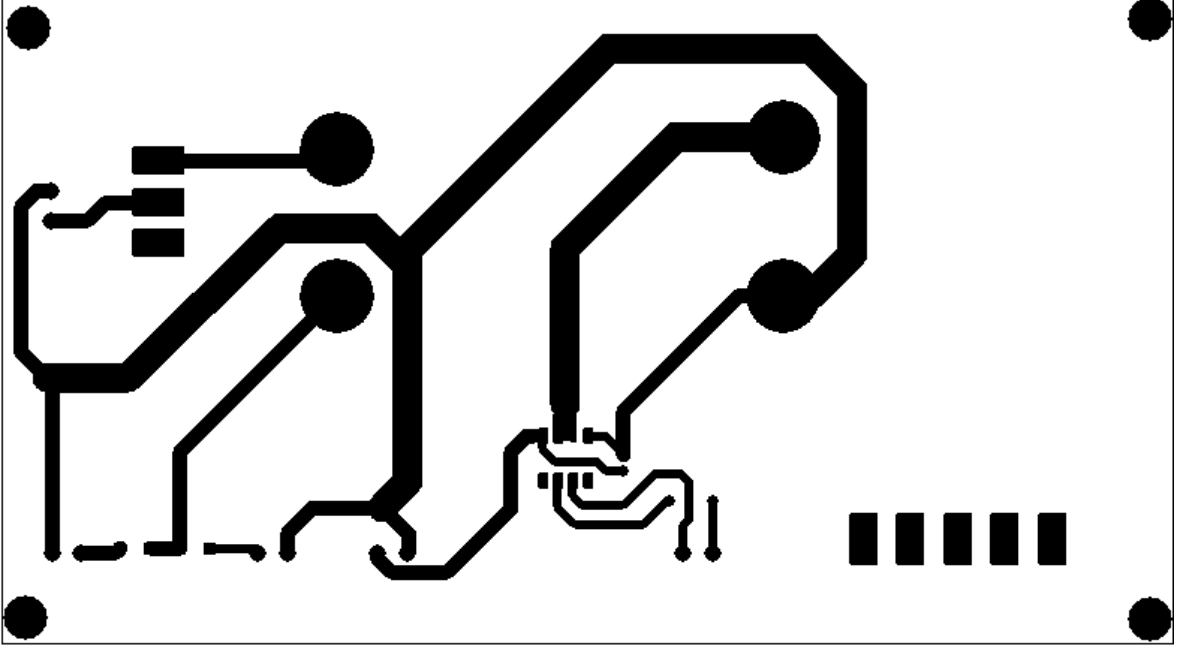
Ek 1. SAZÇ devresi baskı devre şeması



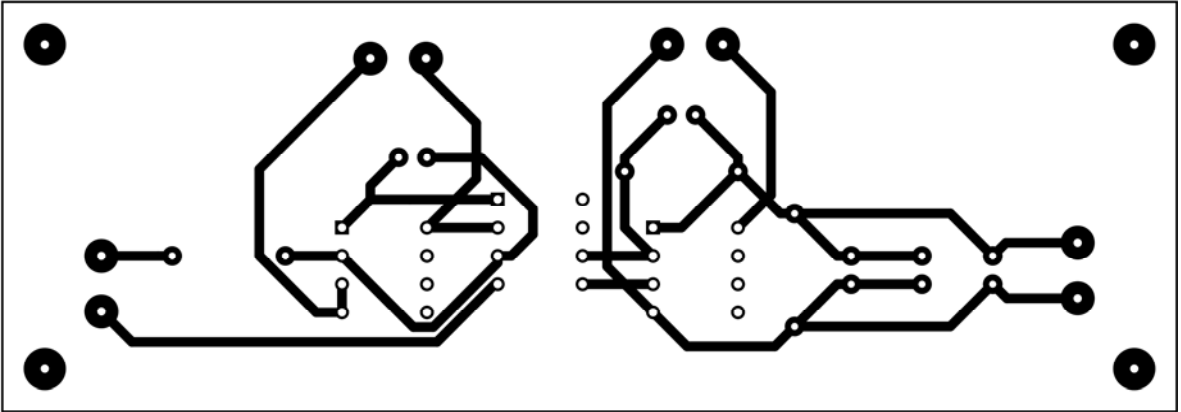
Ek 2. SARÇ devresi baskı devre şeması



Ek 3. UK şarj ve koruma devresinin baskı devre şeması



Ek 4. Analog yalıtım devresi baskı devre şeması



Tablo Ek 1. ÇTA parametreleri

| | |
|--------------------------------|------|
| Popülasyon büyüklüğü (n) | 10 |
| İterasyon sayısı (N) | 50 |
| Anahtarlama olasılığı (p) | 0.65 |
| Ölçek faktörü (γ) | 1 |
| Tozlaşma direnci (λ) | 1.25 |

Tablo Ek 2. PSO parametreleri

| | |
|--|--------|
| Popülasyon büyüklüğü (n) | 10 |
| İterasyon sayısı (N) | 50 |
| Hızlanma sabitleri (C ₁ -C ₂) | 2-2 |
| Ağırlık indisi (w) | 0.7 |
| Rasgele üretilen sayılar (r ₁ -r ₂) | (0, 1) |

Tablo Ek 3. Denetleyici parametrelerinin arama uzayı

| | |
|-----------------|---------------|
| K _P | [0.001, 60] |
| K _I | [0.001, 30] |
| K _D | [0.001, 2] |
| λ | [0.0001, 1.5] |
| μ | [0.0001, 1] |
| K _{de} | [0.001, 1] |
| K _e | [0.001, 5] |
| K _{du} | [0.001, 40] |

Tablo Ek 4. SMG özellikleri

| | |
|-----------------------------------|-------|
| Nominal güç (W) | 1500 |
| Nominal hız (d/d) | 550 |
| Faz direnci (Ohm) | 5 |
| Faz endüktansı (mH) | 18.2 |
| Kutup sayısı | 8 |
| Tork sabiti (Nm/A) | 1.1 |
| Hız sabiti (rpm/V) | 11.5 |
| Rotor ataleti (kgm ²) | 0.011 |
| Başlangıç torku (Nm) | <0.7 |
| Mıknatıs tipi | NdFeB |

Tablo Ek 5. Dişli çark özellikleri

| | |
|-------------------|-----|
| Hız düşürme oranı | 4 |
| Çıkış hızı (r/m) | 359 |

Tablo Ek 6. 3-faz motor özellikleri

| | |
|--------------------|-------|
| Nominal hız (d/d) | 1440 |
| Nominal akım (A) | 3.4 |
| Moment (Nm) | 9.98 |
| Kutup sayısı | 4 |
| Ağırlık (kg) | 18 |
| Ses seviyesi (dBA) | 55 |
| Koruma sınıfı | IP 55 |

ÖZGEÇMİŞ

Erdoğan ŞAHİN 06.10.1986 tarihinde Giresun'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Giresun'da tamamladıktan sonra 2004 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde başladığı eğitiminden 2009 yılında mezun oldu. 2009 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı ve 2011 yılında bu bölümden de mezun olarak aynı yılın güz döneminde Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. 2005-2010 yılları arasında ikinci üniversite olarak Anadolu Üniversitesi AÖF İşletme bölümünü bitirdi. 2011 yılı güz döneminde KTÜ Abdullah Kanca MYO Elektronik Teknolojisi Programı'nda öğretim görevlisi olarak göreve başladı ve aynı görevde çalışmaya devam etmektedir. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

SCI/SCI-E indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. Sahin E. ve Altas I.H., Optimized fractional order control of a cascaded synchronous buck-boost converter for a wave-UC hybrid energy system, Electrical Engineering, (2017) 1-13.
2. Sahin E. ve Altas I.H., FPA Tuned Fuzzy Logic Controlled Synchronous Buck Converter for a Wave/SC Energy System, Advances in Electrical and Computer Engineering, 17, 1 (2017) 39-48.
3. Ayas M. S., Altas, I. H. ve Sahin E., Fractional order based trajectory tracking control of an ankle rehabilitation robot, Transactions of the Institute of Measurement and Control, doi:0142331216667810, (2016)
4. Itik M., Sahin E. ve Ayas M. S., Fractional Order Control of Conducting Polymer Artificial Muscles, Expert Systems with Applications, 42, 21 (2015), 8212-8220.

Diğer indekslere giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. Sahin E. ve Altas I. H., A PSO Tuned Fractional-Order PID Controlled Noninverting Buck-Boost Converter for a Wave/UC Energy System, International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering (IJISAE), 4, 1 (2016) 32-37.
2. Danayiyen Y., Altaş İ.H. ve Şahin E., Model Predictive Control of a DC-DC Buck Converter, Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 8, 2 (2017) 91-97.

Yerli/Yabancı hakemli sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

1. Şahin E., Altaş İ. H. ve Danayıyen Y., Dalga/Ultra Kondansatör Enerji Sistemi için Bir DA-DA Artıran Çeviricinin Bulanık Mantık ile Denetimi, Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu 2016 (ASYU16), 29 Eylül-1 Ekim 2016 Düzce, 158-163.
2. Şahin E., Altaş İ. H. ve E. Özkop, Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemi için Anahtarlama Güç Filtresi ve Denetleyici Tasarımı, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi 2015 Ulusal Toplantısı (TOK 2015), 10-12 Eylül, Denizli, Türkiye.
3. Ayas M. Ş., Altaş İ. H. ve Şahin E., Ayak Bileği Rehabilitasyonu için Geliştirilen Bir Paralel Robotun Yörünge Kontrolü, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK 2015), 10-12 Eylül 2015, Denizli, Türkiye.
4. Ayas M. Ş., Şahin E. ve Altaş İ. H., An Optimized Fuzzy Logic Controller for a Parallel Mechanism Rehabilitation Robot, IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2015), 2-5 Ağustos, 2015 İstanbul, 1-6.
5. Sahin E., Ayas M. S., Altas I. H., A PSO Optimized Fractional-Order PID Controller for a PV System with DC-DC Boost Converter, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 21-24 Eylül 2014, Antalya, 477-481.
6. Ayas M. S., Sahin E. ve Altas I. H., Optimized Control of a Parallel Mechanism Rehabilitation Robot, 17th International Conference on Robotics Applications, 23-25 Haziran 2014, Zurich,
7. Ayas M. S., Sahin E. ve Altas I. H., Trajectory Tracking Control of a Stewart Platform, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, 21-24 Eylül 2014, Antalya, 720-724.
8. Şahin E., Özkop E. ve Altaş İ. H., Dalga Enerji Sisteminden Beslenen Bir DA Motorunun Hız Kontrolü İçin Denetleyici Parametrelerinin PSO İle Optimizasyonu”, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı, 26-28 Eylül 2013, Malatya, Türkiye.
9. Şahin E., Güzelkaya M. ve Eksin İ., Model Taban Öngörülü Tepe Gözleyicisi Yöntemi ile PI Kontrolör Tasarımı, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı, 26-28 Eylül 2013, Malatya, Türkiye.
10. Sahin E., Güzelkaya M. ve Eksin İ., Model Based Predictive Peak Observer Method in Parameter Tuning of PI Controllers, XXIV International Conference on Information, Communication & Automation Technologies, 30 Ekim- 1 Kasım 2013, Sarajevo, Bosnia & Herzegovina, 1-5.

11. Okumus H. İ., Sahin E. ve Akyazi O., "Antenna Azimuth Position Control with Fuzzy Logic and Self-Tuning Fuzzy Logic Controllers", 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 28-30 Kasım 2013, Bursa, Türkiye, 477-481.
12. Okumus H. İ., Sahin E. ve Akyazi O., "Antenna Azimuth Position Control with Classical PID and Fuzzy Logic Controllers, International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, 2-4 Temmuz 2012, Trabzon, Türkiye, 1-5.