

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİDE MODÜLASYON
TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Nazlıcan ÇAVLI

**TEMMUZ 2021
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİDE MODÜLASYON
TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

Elektrik-Elektronik Müh. Nazlıcan ÇAVLI

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"ELEKTRİK YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 01 / 07 / 2021

Tezin Savunma Tarihi : 28 / 07 / 2021

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Emre Özkop

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır. “Fotovoltaik Uygulamalar için Çok Seviyeli Eviricide Modülasyon Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi” adlı çalışmada tek fazlı çok seviyeli evirici topolojisi ve bu topolojide kullanılabilecek modülasyon tekniklerinin modellenmesi ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması boyunca gerek konu seçimi ve gerekse çalışmaların yürütülmesi sırasında bilgi ve deneyimlerini bana aktaran, danışman hocam Doç. Dr. Emre ÖZKOP'a ilgi, destek ve tecrübelerini esirgemediğinden dolayı teşekkür ediyorum. Son olarak hayatım boyunca varlıkları ve destekleriyle bana güç veren ve her zaman yanımda olan aileme şükranlarımı sunarım.

Nazlıcan ÇAVLI

Trabzon 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Fotovoltaik Uygulamalar için Çok Seviyeli Eviricide Modülasyon Tekniklerinin Karşılaştırmalı Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Emre ÖZKOP’un 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. 28/07/2021

Nazlıcan ÇAVLI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Taraması	2
1.3. Fotovoltaik Sistem.....	4
1.4. Çok Seviyeli Eviriciler	6
1.5. Tek Fazlı Çok Seviyeli Evirici Topolojileri	8
1.5.1. Diyot Kenetlemeli ÇSE	8
1.5.2. Kondansatör Kenetlemeli ÇSE.....	10
1.5.3. Kaskad H-Köprü ÇSE	13
1.5.4. Karşılaştırma Sonuçları	15
1.5.5. 5-Seviyeli H-Köprü Diyot Kenetlemeli Evirici	16
1.6. Çok Seviyeli Evirici Modülasyon Yöntemleri	17
1.6.1. Darbe Genişlik Modülasyon Yöntemi.....	18
1.6.2. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon Yöntemi.....	19
1.6.3. Üçüncü Harmonik Eklemeli Darbe Genişlik Modülasyonu.....	21
1.6.4. Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu	22
1.6.5. Hibrit/Modifiye Edilmiş Modülasyon	26
1.7. Filtre Tasarımı	29
1.7.1. L Filtre	29
1.7.2. LC Filtre	29
1.7.3. LCL Filtre	30
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME	32

2.1. Giriş..	32
2.2. Benzetim Çalışması	33
2.2.1. Şebekeden Bağımsız Evirici.....	33
2.2.2. Şebeke Bağlantılı Evirici	51
3. SONUÇLAR.....	69
4. ÖNERİLER	70
5. KAYNAKLAR.....	71
6. EKLER	77
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

FOTOVOLTAİK UYGULAMALAR İÇİN ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİDE
MODÜLASYON TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Nazlıcan ÇAVLI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Emre ÖZKOP
2021, 76 Sayfa, 21 Sayfa Ek

Güç elektroniği çeviricilerinden olan eviriciler iki seviyeli ve çok seviyeli olarak sınıflandırılabilirler. İki seviyeli eviriciler genellikle şebeke ve küçük ölçekli endüstri uygulamalarında, çok seviyeli eviriciler ise orta ve yüksek güç dönüşümü talebi olan yapılarda kullanılmaktadır. İki seviyeli eviricilerle karşılaştırıldığında çok seviyeli eviriciler, düşük elektromanyetik uyumluluk, yüksek gerilim kapasitesi, düşük anahtarlama kayıpları ve yüksek güç kalitesinde dalga şekilleri gibi birçok üstünlüğe sahiptir. Çok seviyeli bir eviricinin temel hedefi, daha az harmonik bozunum ve yüksek kaliteli çıkış gerilimi dalga formudur. Bir güç elektroniği çevirici sisteminin verimini artırmak, sebep olduğu harmonik bozunumları azaltmak ve standartların gereksinimlerini karşılamak için yapılabilecekler üç kategoride isimlendirilebilir: Topolojik iyileştirilme, yeni modülasyon tekniğini düşünme ve uygun kontrol stratejilerini kullanma.

Bu araştırma çalışmasının amacı çeşitli modülasyon teknikleri ile fotovoltaik uygulamalar için çok seviyeli eviricinin performans analizini gerçekleştirmektir. Bu çalışmada evirici çıkış akım ve gerilim dalga şekilleri, evirici verimi, aktif evirici giriş ve çıkış güçleri ve toplam harmonik bozulma miktarı gibi performans parametrelerini değerlendirmek için tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için sinüzoidal, üçüncü harmonik eklemeli, uzay vektör ve hibrit darbe genişlik modülasyonu teknikleri uygulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çok seviyeli evirici, Darbe genişlik modülasyonu (DGM), Nötr nokta kenetlemeli, Fotovoltaik güç sistemi, Harmonik bozunum

Master Thesis

SUMMARY

A COMPARATIVE ANALYSIS OF MODULATION TECHNIQUES IN MULTILEVEL INVERTER FOR PV APPLICATIONS

Nazlıcan ÇAVLI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Emre ÖZKOP
2021, 76 Pages, 21 Pages Appendix

Inverters, which are among the power electronics converters, can be classified as two-level and multilevel. Two-level inverters are generally used in grid and small-scale industry applications, and multilevel inverters are used in structures with medium and high power conversion demands. Compared to two-level inverters, multilevel inverters have many advantages such as low electromagnetic compatibility (EMC), high voltage capability, low switching losses and high power quality waveforms. The main purpose of a multilevel inverter is less harmonic distortion and a high quality output voltage waveform. It can be named in three categories that can be done to increase the efficiency of a power electronic converter system, to reduce the harmonic distortions caused and to meet the requirements of the standards: Topological improvement, considering new modulation technique and employing suitable control strategies.

The aim of this research study is to perform performance analysis of multilevel inverter for photovoltaic applications with various modulation techniques. In this study, to evaluate performance parameters such as inverter output current and voltage waveforms, inverter efficiency, active inverter input and output powers and total harmonic distortion value, sinusoidal pulse width modulation, third harmonic injected pulse width modulation, space vector pulse width modulation and hybrid pulse width modulation techniques are applied for single phase 5-level H-bridge diode clamped inverter.

Key Words: Multilevel inverter, Pulse width modulation (PWM), Neutral-point clamped (NPC), Photovoltaic power system, Harmonic distortion

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Tek diyot modeli eşdeğer devresi.....	4
Şekil 1.2. Güneş enerjisi yaklaşımı. (a) merkezi-evirici sistemi, (b) dizin-evirici sistemi, (c) DA en iyileyici ve (d) Tekil panellere yerleştirilmiş mikro eviriciler.....	5
Şekil 1.3. Çıkış gerilimi açısından iki seviyeli ve beş seviyeli eviriciler arasındaki karşılaştırma sonuçları.....	7
Şekil 1.4. Çok seviyeli evirici topolojisi sınıflandırması	7
Şekil 1.5. 5-seviyeli DK-ÇSE topolojisi bağlantı yapısı	8
Şekil 1.6. 5-seviyeli KK-ÇSE topolojisi bağlantı yapısı	11
Şekil 1.7. 5-seviyeli KHK-ÇSE topolojisi bağlantı yapısı	14
Şekil 1.8. 5-seviyeli H-köprü DK evirici temel devre şeması	16
Şekil 1.9. Çok seviyeli eviriciler için modülasyon stratejileri sınıflandırması.....	18
Şekil 1.10. Klasik darbe genişlik modülasyon tekniği	18
Şekil 1.11. SDGM tekniği	19
Şekil 1.12. 5-seviyeli KK evirici için FK-DGM modülasyon stratejisi	20
Şekil 1.13. Seviye kaydırmalı DGM modülasyon stratejisi	21
Şekil 1.14. ÜHE-DGM tekniği temel modülasyon işaretleri	22
Şekil 1.15. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için basitleştirilmiş çalışma modları	23
Şekil 1.16. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için basitleştirilmiş çalışma modları	24
Şekil 1.17. Modifiye edilmiş ve hibrit taşıyıcı işaretleri	26
Şekil 1.18. Modifiye edilmiş ve hibrit taşıyıcı işaretleri	26
Şekil 1.19. Modifiye edilmiş SK-DGM tekniği taşıyıcı işaret şekilleri	27
Şekil 1.20. Modifiye edilmiş taşıyıcılı SDGM dalga şekli.....	27
Şekil 1.21. Hibrit DGM dalga şekli	28
Şekil 1.22. Modifiye edilmiş DGM dalga şekli-I	28
Şekil 1.23. Modifiye edilmiş DGM taşıyıcı işareti-II.....	28
Şekil 1.24. Filtre türleri	29
Şekil 1.25. Temel LCL filtre devre şeması.....	30

Şekil 2.1. Evirici benzetimine ait sistem yapısı, modülasyon tekniği, ölçüm & hesaplama ve gözlem prensipleri	32
Şekil 2.2. Şebekeden bağımsız evirici sistemi temel devre blok diyagramı.....	33
Şekil 2.3. İşaret üretim bloğu temel blok diyagramı	34
Şekil 2.4. Referans İşaret (Rİ) türleri/dalga şekilleri.....	34
Şekil 2.5. Taşıyıcı İşaret (Tİ) türleri/dalga şekilleri	35
Şekil 2.6. Benzetim çalışması genelleştirilmiş blok diyagramı.....	36
Şekil 2.7. Şebekeden bağımsız evirici sistemi benzetim ara yüzü	36
Şekil 2.8. Gerilim-akım dalga şekli	42
Şekil 2.9. Gerilim-akım dalga şekli	42
Şekil 2.10. Gerilim-akım dalga şekli	42
Şekil 2.11. Gerilim-akım dalga şekli	42
Şekil 2.12. Gerilim-akım dalga şekli	43
Şekil 2.13. Gerilim-akım dalga şekli	43
Şekil 2.14. Gerilim-akım dalga şekli	43
Şekil 2.15. Gerilim-akım dalga şekli	43
Şekil 2.16. Gerilim-akım dalga şekli	43
Şekil 2.17. Verim-güç.....	44
Şekil 2.18. THB-güç.....	44
Şekil 2.19. THB- <i>mindeks</i> (Durum-I).....	46
Şekil 2.20. THB- <i>mindeks</i> (Durum-II)	46
Şekil 2.21. THB- <i>mindeks</i> (Durum-III)	47
Şekil 2.22. THB- <i>mindeks</i> (Durum-IV).....	47
Şekil 2.23. THB- <i>mindeks</i> (Durum-V)	47
Şekil 2.24. THB- <i>mindeks</i> (Durum-VI).....	47
Şekil 2.25. THB- <i>mindeks</i> (Durum-VII)	47
Şekil 2.26. THB- <i>mindeks</i> (Durum-VIII-a)	47
Şekil 2.27. THB- <i>mindeks</i> (Durum-VIII-b).....	48
Şekil 2.28. THB- <i>fsw</i> (Durum-I).....	48
Şekil 2.29. THB- <i>fsw</i> (Durum-II)	48
Şekil 2.30. THB- <i>fsw</i> (Durum-III)	49
Şekil 2.31. THB- <i>fsw</i> (Durum-IV)	49
Şekil 2.32. THB- <i>fsw</i> (Durum-V)	49

Şekil 2.33. THB- f_{sw} (Durum-VI)	49
Şekil 2.34. THB- f_{sw} (Durum-VII).....	49
Şekil 2.35. THB- f_{sw} (Durum-VIII-a)	49
Şekil 2.36. THB- f_{sw} (Durum-VIII-b)	50
Şekil 2.37. THB- $mindeks$ ($f_{sw} = 20$ kHz)	50
Şekil 2.38. Vçıkış- $mindeks$ ($f_{sw} = 20$ kHz)	50
Şekil 2.39. THB- f_{sw} ($mindeks = 0.9$)	51
Şekil 2.40. Şebeke bağlantılı evirici sistemi temel devre blok diyagramı.....	52
Şekil 2.41. Kontrol bloğu temel blok diyagramı	53
Şekil 2.42. Benzetim çalışması genelleştirilmiş blok diyagramı	54
Şekil 2.43. Şebeke bağlantılı evirici sistemi benzetim ara yüzü	55
Şekil 2.44. Gerilim-akım dalga şekli	60
Şekil 2.45. Gerilim-akım dalga şekli	60
Şekil 2.46. Gerilim-akım dalga şekli	60
Şekil 2.47. Gerilim-akım dalga şekli	60
Şekil 2.48. Gerilim-akım dalga şekli	60
Şekil 2.49. Gerilim-akım dalga şekli	60
Şekil 2.50. Verim-güç.....	61
Şekil 2.51. THB-güç	61
Şekil 2.52. PI denetleyicili temel kontrol blok diyagramı	63
Şekil 2.53. Bulanık PI denetleyici blok diyagramı	64
Şekil 2.54. Kayan kipli denetleyici blok diyagramı	65
Şekil 2.55. Çıkış ve referans akım dalga şekli (PI)	66
Şekil 2.56. Çıkış ve referans akım dalga şekli (Bulanık PI).....	66
Şekil 2.57. Çıkış ve referans akım dalga şekli (Kayan kipli)	66
Şekil 2.58. Gerilim-akım dalga şekli (PI).....	67
Şekil 2.59. Gerilim-akım dalga şekli (Bulanık PI)	67
Şekil 2.60. Gerilim-akım dalga şekli (Kayan kipli).....	67

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Tek fazlı 5-seviyeli DK-ÇSE'nin anahtarlama durumu	10
Tablo 1.2. Tek fazlı 5-seviyeli KK-ÇSE anahtarlama durumu	13
Tablo 1.3. Diyot kenetlemeli (DK), kondansatör kenetlemeli (KK) ve kaskad H-köprü (KHK) tipi 5-seviyeli eviriciler için karşılaştırma sonuçları.	15
Tablo 1.4. Çok seviyeli evirici topolojilerin eleman bakımından karşılaştırılması.....	16
Tablo 1.5. Tek fazlı 5-seviyeli eviriciler için eleman sayıları	17
Tablo 1.6. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü DK evirici anahtarlama durumu	17
Tablo 1.7. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için çalışma durumları .	24
Tablo 1.8. Çıkış gerilim vektörleri çalışma zaman dilimi	25
Tablo 2.1. Durum, Modülasyon tekniği, Rİ ve Tİ tür matrisi	35
Tablo 2.2. Benzetim çalışması modülasyon teknikleri ve taşıyıcı işaret türleri	38
Tablo 2.3. Sistem benzetim parametreleri	38
Tablo 2.4. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-I).....	39
Tablo 2.5. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-II).....	39
Tablo 2.6. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-III)	39
Tablo 2.7. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-IV)	40
Tablo 2.8. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-V)	40
Tablo 2.9. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI).....	40
Tablo 2.10. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII)	41
Tablo 2.11. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a).....	41
Tablo 2.12. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b).....	41
Tablo 2.13. SDGM, ÜHE-DGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin farklı durumları için benzetim karşılaştırılması.....	45
Tablo 2.14. Durum, Modülasyon tekniği, Rİ ve Tİ tür matrisi	54
Tablo 2.15. Benzetim çalışması modülasyon teknikleri ve taşıyıcı işaret türleri	57
Tablo 2.16. Sistem benzetim parametreleri	57
Tablo 2.17. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-I).....	57
Tablo 2.18. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-II).....	58
Tablo 2.19. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-III)	58
Tablo 2.20. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII)	58

Tablo 2.21. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a).....	59
Tablo 2.22. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b).....	59
Tablo 2.23. SDGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin farklı durumları için benzetim karşılaştırılması	62
Tablo 2.24. Evirici sistem denetimi benzetim sonuçları	68
Ek Tablo 6.1. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 1$ kHz)	77
Ek Tablo 6.2. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 2$ kHz)	77
Ek Tablo 6.3. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 5$ kHz)	77
Ek Tablo 6.4. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 10$ kHz).....	78
Ek Tablo 6.5. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 15$ kHz).....	78
Ek Tablo 6.6. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 20$ kHz).....	78
Ek Tablo 6.7. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 25$ kHz).....	79
Ek Tablo 6.8. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 1$ kHz).....	79
Ek Tablo 6.9. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 2$ kHz).....	79
Ek Tablo 6.10. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 5$ kHz).....	80
Ek Tablo 6.11. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 10$ kHz)	80
Ek Tablo 6.12. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 15$ kHz)	80
Ek Tablo 6.13. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 20$ kHz)	81
Ek Tablo 6.14. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 25$ kHz)	81
Ek Tablo 6.15. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 1$ kHz)	81
Ek Tablo 6.16. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 2$ kHz)	82
Ek Tablo 6.17. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 5$ kHz)	82
Ek Tablo 6.18. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 10$ kHz)	82
Ek Tablo 6.19. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 15$ kHz)	83
Ek Tablo 6.20. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 20$ kHz)	83
Ek Tablo 6.21. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 25$ kHz)	83
Ek Tablo 6.22. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 1$ kHz)	84
Ek Tablo 6.23. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 2$ kHz)	84
Ek Tablo 6.24. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 5$ kHz)	84
Ek Tablo 6.25. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 10$ kHz).....	85
Ek Tablo 6.26. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 15$ kHz).....	85
Ek Tablo 6.27. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 20$ kHz).....	85
Ek Tablo 6.28. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 25$ kHz).....	86

Ek Tablo 6.29. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 1$ kHz)	86
Ek Tablo 6.30. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 2$ kHz)	86
Ek Tablo 6.31. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 5$ kHz)	87
Ek Tablo 6.32. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 10$ kHz)	87
Ek Tablo 6.33. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 15$ kHz)	87
Ek Tablo 6.34. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 20$ kHz)	88
Ek Tablo 6.35. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 25$ kHz)	88
Ek Tablo 6.36. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 1$ kHz)	88
Ek Tablo 6.37. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 2$ kHz)	89
Ek Tablo 6.38. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 5$ kHz)	89
Ek Tablo 6.39. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 10$ kHz)	89
Ek Tablo 6.40. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 15$ kHz)	90
Ek Tablo 6.41. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 20$ kHz)	90
Ek Tablo 6.42. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 25$ kHz)	90
Ek Tablo 6.43. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 1$ kHz)	91
Ek Tablo 6.44. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 2$ kHz)	91
Ek Tablo 6.45. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 5$ kHz)	91
Ek Tablo 6.46. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 10$ kHz)	92
Ek Tablo 6.47. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 15$ kHz)	92
Ek Tablo 6.48. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 20$ kHz)	92
Ek Tablo 6.49. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 25$ kHz)	93
Ek Tablo 6.50. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 1$ kHz)	93
Ek Tablo 6.51. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 2$ kHz)	93
Ek Tablo 6.52. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 5$ kHz)	94
Ek Tablo 6.53. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 10$ kHz)	94
Ek Tablo 6.54. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 15$ kHz)	94
Ek Tablo 6.55. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 20$ kHz)	95
Ek Tablo 6.56. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 25$ kHz)	95
Ek Tablo 6.57. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 1$ kHz)	95
Ek Tablo 6.58. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 2$ kHz)	96
Ek Tablo 6.59. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 5$ kHz)	96
Ek Tablo 6.60. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 10$ kHz)	96

Ek Tablo 6.61. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 15$ kHz).....	97
Ek Tablo 6.62. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 20$ kHz).....	97
Ek Tablo 6.63. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 25$ kHz).....	97



SEMBOLLER DİZİNİ

AKFYD	Alternatif Karşılıklı Faz Yer Değiştirmeli
ASDDGM	Aktif Sıfır Durum Darbe Genişlik Modülasyonu
ÇSE	Çok Seviyeli Evirici
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
DK	Diyot Kenetlemeli
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
FK	Faz Kaydırmalı
FOPID	Kesirli Mertebeden Oransal-İntegral-Türev
FYD	Faz Yer Değiştirmeli
KFYD	Karşılıklı Faz Yer Değiştirmeli
KK	Kondansatör Kenetlemeli
KHK	Kaskad H-Köprü
HDGM	Hibrit Darbe Genişlik Modülasyonu
HK	Hibrit Kenetlemeli
MÇHÇ	Modüler Çok Hücreli Çevirici
MGNİ	Maksimum Güç Noktası İzleyicisi
NNK	Nötr Nokta Kenetlemeli
PI	Oransal İntegral
PID	Oransal İntegral Türevsel
SDGM	Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon
SK	Seviye Kaydırmalı
SHE	Seçmeli Harmonik Elemeli
S-ANNK	Seviyeli-Aktif Nötr Nokta Kenetlemeli
S-NNK	Seviyeli-Nötr Nokta Kenetlemeli
TAD	Tepe Akımı Denetleyicisi
THB	Toplam Harmonik Bozulma
UV	Uzay Vektör
UVM	Uzay Vektör Modülasyonu
ÜHE	Üçüncü Harmonik Eklemeli
YÇHÇ	Yığılmış Çok Hücreli Çevirici

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Enerji ihtiyacında oluşan artış dünya genelinde fosil yakıtların hızla tükenmesine sebep olmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların doğaya verdiği zararların gün geçtikçe daha belirgin hale gelmesi ile güneş, rüzgâr, jeotermal, dalga gibi temiz ve doğa dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

Güneş enerjisi sistemleri, güneşten alınan enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve sonrasında bu enerjinin tüketiciye ulaştırılmasında köprü görevi görmektedir. Sistemin temel elemanlarından biri güç elektroniği çeviricileri olup kullanım yeri ve amacına bağlı olarak DA-DA çevirici ve DA-AA evirici formunda uygulaması yaygındır.

Evirici, alternatif dalga şekillerin üretiminde, üretilen enerjinin verimliliğinin artırılmasında ve alternatif kaynakların güç kalitesinin iyileştirilmesinde önemli bir role sahiptir. Farklı yapı, işlev ve özelliklerine sahip olan eviriciler, çeşitli açılardan ele alınıp sınıflandırılabilir. Seviye açısından eviriciler, iki seviyeli ve çok seviyeli olarak gruplandırılabilir.

İki seviyeli eviriciler genellikle şebeke ve küçük ölçekli endüstri uygulamalarında kullanılmakta olup yüksek güç talebi olan yapılar için tercih edilmemektedir. Yüksek güç talebi olan uygulamalar için çok seviyeli eviriciler daha uygun seçenek olarak görülmektedir. İki seviyeli eviricilerle karşılaştırıldığında çok seviyeli eviriciler, düşük elektromanyetik uyumluluk (EMC), yüksek gerilim kapasitesi, düşük anahtarlama kayıpları ve yüksek güç kalitesinde dalga şekilleri gibi birçok üstünlüğe sahiptir. Çok seviyeli bir eviricinin temel hedefi, daha az harmonik bozunum ve yüksek kaliteli çıkış gerilimi dalga formudur.

Bu tez çalışmasında tek fazlı çok seviyeli evirici topolojileri üzerinde durulmuştur. Tek fazlı 5-seviyeli nötr noktası bağlı (diyot kenetlemeli) evirici topolojisinin farklı modülasyon teknikleri için benzetim çalışması gerçekleştirilecek ve sistem çıktıları gözlemlenecektir. Modülasyon tekniklerinin farklı olmasına bağlı olarak evirici verimi (Normal verim, Avrupa verimi ve Kaliforniya verimi), evirici çıkış akım ve gerilim dalga

şekilleri ve toplam harmonik bozulma (THB) miktarı somut bir şekilde ortaya koyulacaktır.

1.2. Literatür Taraması

1970 yılların ortasında patent ile koruma altına alınan elektrik güç çevirici türü olan çok seviyeli evirici, ortaya koymuş olduğu avantajlar sebebiyle günümüze kadar birçok çalışmada farklı açılardan ele alınmıştır [1].

Panda vd. tek DA kaynaklı kaskad bağlı çok seviyeli evirici üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada geleneksel modele göre daha az kaynak içeren bir model önermişler ve önerilen modelin avantajlarını evirici boyutunun küçültülmesi ve verimliliğinin artırılması olarak ifade etmişlerdir [2].

Sotoodeh vd. modüler çok seviyeli evirici topolojisinden yararlanarak rüzgâr türbinleri için tek fazlı beş seviyeli bir evirici yapısı oluşturmuşlardır. Bu evirici ile şebekeye aktif güç enjekte etme ve yerel şebekenin güç faktörünü belirlenen değerde tutma işlemlerini gerçekleştirmişlerdir [3].

Prabaharan vd. fotovoltaik güç sistemleri için tek fazlı çok seviyeli hibrit bir evirici topolojisi önermişlerdir. Azaltılmış anahtar topolojisi ve kaskad bağlı H köprü topolojilerini birleşimi olan bu evirici topolojisi, evirici çıkışında %8.12'lik bir toplam harmonik bozunuma sahip on beş seviyeli bir çıkış gerilimi üretimini sunmaktadır [4].

Prabaharan vd. toplam harmonik bozunumu azaltma ve daha çok seviyeli çıkış gerilimi üretme amacıyla şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler için anahtarlama elemanları azaltılmış tek fazlı çok seviyeli bir evirici topolojisini önermişlerdir. Bu topolojide ayrıca maksimum güç noktası izleyicisinde artan iletkenlik algoritması test edilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda daha az anahtarlama elemanı kullanılarak daha kaliteli çıkış gerilimi üretildiği ve üretilen çıkış geriliminin şebeke bağlantılı sistemler için uygun olduğu görülmüştür [5].

Kabalıcı vd. çalışmasında şebeke bağlantılı tek fazlı çok seviyeli bir evirici tasarlanması konusunu ele almışlardır. Üçlü giriş gerilimine sahip asimetrik H-köprü eviricinin anahtarları Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) işareti ile tetiklenmiş topoloji yapısından toplam harmonik bozunumun düştüğü gözlemlenmiştir [6].

Jun vd. tek fazlı nötr noktası bağlı üç seviyeli evirici için model tahmin kontrolü üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneysel ve benzetimsel çalışmalar

sonucunda anahtarlama elemanı sayısının ve evirici anahtarlama kayıplarının azaldığı görülmüştür. Önerilen model tahmin kontrol yönteminin klasik yöntemle göre evirici verimini artırma açısından daha etkili olduğu ortaya koyulmuştur [7].

Syed vd. çalışmasında azaltılmış ortak mod akımı için tek fazlı çok seviyeli transformatörsüz bir fotovoltaiik evirici önerilmiştir. Bu eviricinin avantajları; düşük harmonik bozunum, yüksek verimlilik ve düşük toprak kaçak akımı olarak ifade edilmiştir [8].

Saketi vd. hataya dayanıklı tek fazlı beş seviyeli bir evirici topolojisi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Normal çalışma şartlarında beş seviyeli çıkış gerilimi üreten evirici topolojisinde, çift taraflı anahtarlarında bir açık devre hatası gerçekleştiğinde ise çıkış gerilimi seviyesi üçe düşmekte ama tepe gerilimi ve gücü aynı seviyede kalmaktadır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda önerilen topolojinin hata durumları boyunca verimlilik, güvenilirlik ve maliyet açısından daha iyi performans gösterdiği görülmüştür [9].

Tarassodi vd. hem simetrik hem de asimetrik fotovoltaiik sistemler ile uyumlu tek fazlı çok seviyeli evirici topolojisi önermişlerdir. Bu kaskad bağlı tam köprü yedi seviyeli eviricide anahtarlama modülasyon tekniği olarak SDGM ve harmonikleri azaltmak için simetrik ve asimetrik uygulamaların her ikisinde de kapasitans gerilim kontrolü ve genetik algoritma kullanılmıştır. Çalışmanın amacı harmonikleri ve toplam harmonik bozunumu azaltmaktır. Bu amaç doğrultusunda hem benzetim çalışması yapılmış hem de sistemin çalışması bir prototip ile doğrulanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda harmoniklerde azalma görülmüştür [10].

Sreekanth vd. tek fazlı fotovoltaiik sistem uygulamaları için dokuz seviyeli bir evirici topolojisi üzerine çalışma yapmıştır. Önerilen evirici topolojisi, birleştirilmiş bobin içeren tek fazlı dokuz seviyeli yapıda olup daha az anahtar ve kapasitör içermekte ve böylece sistem güvenilirlik seviyesi artırılmaktadır. Yapılan benzetim çalışması sonucunda sistemin çalışması doğrulanmış ve yüksek güç yoğunluklu fotovoltaiik uygulamalar için uygun olduğu görülmüştür [11].

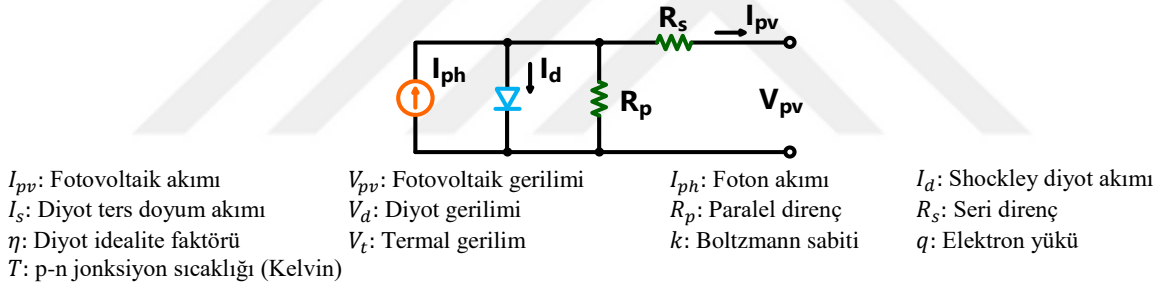
Selvaperumal vd. kaskad bağlı H köprü beş seviyeli evirici topoloji üzerinden deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada anahtarlama modülasyon tekniği olarak harmonik enjekteli darbe genişlik modülasyonu yöntemi kullanılmış ve sonucunda üçüncü harmonik bileşenin küçüldüğü/azaldığı gözlemlenmiştir [12].

Khan vd. fotovoltaik sistemler tek fazlı transformatörsüz evirici topolojileri için karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Her topoloji için benzetim sonuçları sunulmuştur. Yapılan incelemelerin sonucu ileride yapılacak çalışmalarda yararlanılması amacıyla bir tabloda özetlenmiştir [13].

1.3. Fotovoltaik Sistem

Temiz, güvenilir ve sıfır emisyon özellikleri sebebiyle fotovoltaik kaynak, en umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir. Kaynağın sağladığı güneş enerjisini faydalı elektrik enerjisi dönüştürmek için temelde fotovoltaik panel ve güç elektroniği çeviricisine (DA-DA tipi ve/veya DA/AA tipi) gerek duyulmaktadır.

Bir fotovoltaik panelin temelini oluşturan fotovoltaik hücrenin tek diyot modeline ait eşdeğer devre şeması Şekil 1.1’de gösterilmiştir [14].



Şekil 1.1. Tek diyot modeli eşdeğer devresi

Bu modele göre akım-gerilim karakteristiği ve bununla ilişkili değişkenler ve sabitler aşağıdaki denklemlerdeki gibi ifade edilebilir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - \frac{V_d}{R_p} \quad (1.1)$$

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{V_d}{\eta V_t}} - 1 \right] \quad (1.2)$$

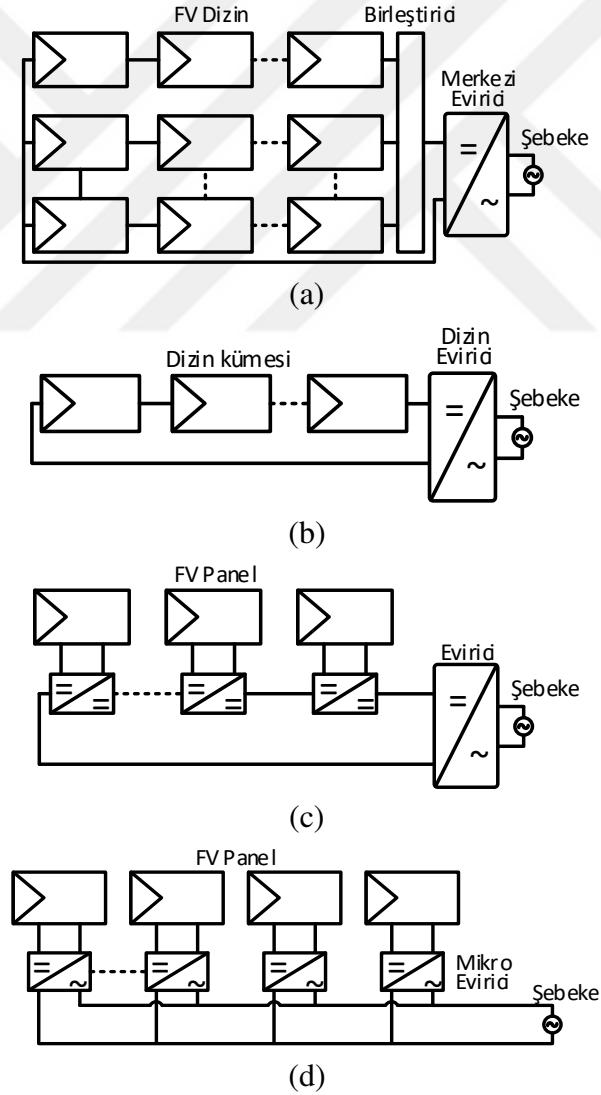
$$V_d = V_{pv} + I_{pv} R_s \quad (1.3)$$

$$V_t = \frac{kT}{q} \quad (1.4)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{\eta V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (1.5)$$

Denklem (1.5)'te beş bilinmeyen parametre mevcut olup tek diyot modeli ayrıca beş parametre FV model olarak bilinir. Gerek duyulan güç değerini karşılamak için modeli ve devre şeması gösterilen hücreler, seri, paralel ve seri-paralel olarak düzenlenerek FV modülleri oluştururlar. Yine benzer olarak FV modüller seri, paralel ve seri-paralel yapıda birleştirilerek FV panel yapısı ve paneller benzer şekilde düzenlendiğinde ise FV dizin meydana getirilir ve sistemin isterlerinin karşılanması amaçlanır.

Güneş enerjisi hasadı için hem fotovoltaik birimler (panel, dizin, vb.) hem de güç elektroniği çeviricileri (DA-DA tipi ve/veya DA/AA tipi) farklı yaklaşımlar ile kurgulanıp yeri geldiğinde doğrudan tüketiciye yeri geldiğinde şebekeye gücün aktarılması sağlanabilir. Şekil 1.2'de örnek bir güneş enerjisi hasadı yaklaşımı gösterilmiştir [15].



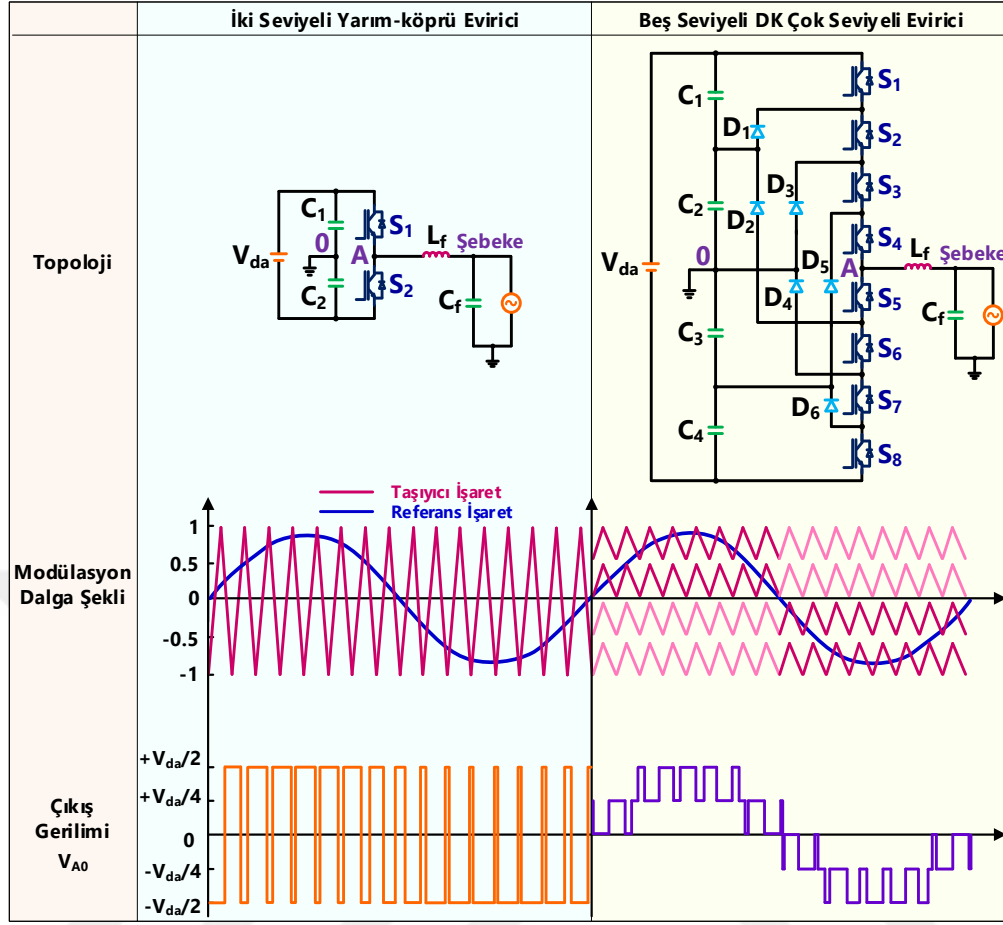
Şekil 1.2. Güneş enerjisi yaklaşımı. (a) merkezi-evirici sistemi, (b) dizin-evirici sistemi, (c) DA en iyileyici ve (d) Tekil panellere yerleştirilmiş mikro eviriciler.

1.4. Çok Seviyeli Eviriciler

İlk olarak 1981 yılında Nabae vd. [16] tarafından önerilen çok seviyeli eviriciler temelde bir kondansatör dizisi ya da ayrılmış DA kaynağı kullanılarak küçük gerilim adımları birleştirilerek bir AA gerilim dalgası üretilmesi prensibine sahiptir [17].

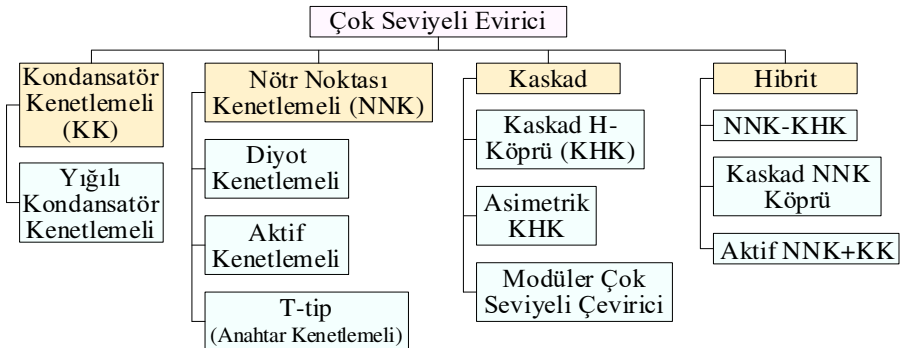
Düşük anahtarlama gerilimi ve düşük harmonik bozunumu sayesinde çok seviyeli eviriciler günümüzde oldukça yaygın kullanıma sahiptir. Ayrıca çıkış dalga şeklinin sinüzoidale yakın olması sebebiyle filtre gereksiniminin az olması da popüler olma sebeplerinden biridir. Çok sayıda anahtarlama elemanına ihtiyaç duyması ve gerilim dengesizliği sorun oluşturmaktadır [18]. Bu sorunların önüne geçmek için çeşitli topolojiler önerilmiştir. İki seviyeli evirici ile karşılaştırıldığında çok seviyeli eviriciler birçok avantaj sunmaktadır [19]:

1. Çok seviyeli eviriciler, iki seviyeli evirici ile karşılaştırıldığında daha düşük THB'ye sahiptir. Şekil 1.2'de iki seviyeli ve beş seviyeli evirici topolojileri ve onların çıkış gerilim (V_{A0}) dalga şekilleri gösterilmiştir. Görülebileceği gibi aynı anahtarlama frekansında beş seviyeli evirici, iki seviyeli eviriciye göre daha iyi performansa sahiptir. Bu sebeple çok seviyeli eviriciler aynı çıkış akım dalgalanması elde etmek için daha küçük çıkış filtre endüktansına ihtiyaç duyar.
2. Çok seviyeli evirici iki seviyeli eviriciye göre daha düşük dv/dt ye sahiptir. Şekil 1.2'de görülüyor ki; iki seviyeli evirici için köprü gerilimi (V_{A0}), $+V_{da}/2$ ve $-V_{da}/2$ arasında anahtarlanmaktadır, böylece gerilim değişim değeri Δv , V_{da} değerine eşittir. Çok seviyeli eviricide ise beş çıkış gerilim seviyesi mevcuttur: $+V_{da}/2$, $+V_{da}/4$, 0 , $-V_{da}/4$ ve $-V_{da}/2$ ve merdiven çıkış dalga şekli, gerilim değişim değerini Δv , $V_{da}/4$ olarak göstermektedir. Daha düşük dv/dt , kayıplarda azalma ve sistem veriminde iyileştirme sonuçlarını doğurmaktadır.
3. Çok seviyeli evirici iki seviyeli eviriciye göre yarı iletken elemanlarda daha düşük gerilim stresine sahiptir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi iki seviyeli evirici için S_1 ve S_2 anahtarları için gerilim değeri V_{da} iken beş seviyeli eviricide $S_1 - S_8$ için $V_{da}/4$ gerilim değerine sahip anahtarlar seçilir.



Şekil 1.3. Çıkış gerilimi açısından iki seviyeli ve beş seviyeli eviriciler arasındaki karşılaştırma sonuçları

Genel anlamda gerilim kaynaklı çok seviyeli evirici ailesi Şekil 1.4'te de gösterildiği üzere dört temel kategoriye ayrılabilir [20].



Şekil 1.4. Çok seviyeli evirici topolojisi sınıflandırması

1.5. Tek Fazlı Çok Seviyeli Evirici Topolojileri

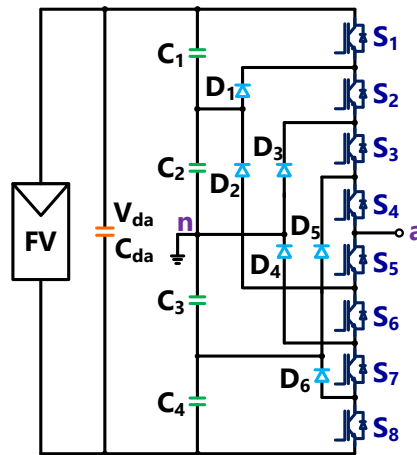
Çok seviyeli evirici (ÇSE) ailesi faz yapısına bağlı olarak; tek fazlı, üç fazlı, çok fazlı olarak sınıflandırılabilir. Literatürde yaygın kullanıma sahip tek fazlı ÇSE topolojilerinden üç tanesi aşağıdaki gibidir:

- Diyot Kenetlemeli ÇSE (DK-ÇSE)
- Kondansatör Kenetlemeli ÇSE (KK-ÇSE)
- Kaskad H-Köprü ÇSE (KHK-ÇSE)

Bu üç temel evirici topolojisinden yararlanılarak çeşitli hibrit ÇSE topolojileri üzerinde çalışmalar literatürde yapılmıştır. Bundan sonraki bölümde bu üç temel çok seviyeli evirici topolojisi hakkında bilgiler verilmektedir.

1.5.1. Diyot Kenetlemeli ÇSE

Diyot kenetlemeli ÇSE (DK-ÇSE) ilk olarak Nabae, Akagi ve Takashi tarafından 1981 yılında 3-seviyeli olarak önerilmiştir [14]. Şekil 1.5'te örnek bir 5-seviyeli diyot kenetlemeli evirici modeli gösterilmiştir [21].



Şekil 1.5. 5-seviyeli DK-ÇSE topolojisi bağlantı yapısı

DK-ÇSE'yi Şekil 1.5'te gösterilen 5-seviyeli topoloji üzerinden açıklayacak olursak; her bir kapasitöre $V_{da}/4$ gerilim düşer. Anahtarlama elemanları nötr noktalarından diyot ile

kenetlenmiştir. 5-seviyeli ÇSE 8 adet anahtarlama elemanı, her anahtarlama elemanı için bir adet ters gerilim koruma diyotu, 6 adet kenetleme diyotu, 4 adet kapasitör içermektedir. Genelleme yapacak olursak N seviyeli bir DK-ÇSE için eleman sayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir [22]:

DA tarafındaki kapasitör sayısı: $N - 1$

Anahtarlama elemanı sayısı: $2 \times (N - 1)$

Faz başına kenetleme diyotu sayısı: $(N - 1) \times (N - 2)$

DK-ÇSE'nin özellikleri [23]:

- Yüksek gerilim değerli tıkama diyotları
- Anahtarlama eleman değerlerinin eşit olmaması
- Kapasitör gerilim dengesizliği

DK-ÇSE'nin temel avantajları ve dezavantajları maddeler halinde aşağıda verilmiştir [24].

Avantajlar

- Gerilim seviyesi arttıkça harmonik bileşenler azaldığı için filtre gereksinimi de azalır.
- Kontrollü reaktif güç akışı sayesinde verimlilik artar.
- Sırt sırta bağlı evirici sistemi nedeniyle çok basit bir kontrol yöntemi kullanır.

Dezavantajlar

- Artan seviye sayısı kenetleme diyotları ve anahtarlama elemanlarının sayısını artırır. Bu da güvenilirliği azaltır.
- Eviricinin aktif güç akışının kontrolü zordur.

1.5.1.1. Diyot kenetlemeli ÇSE'nin Çalışma İlkesi

Çok seviyeli eviricilerde merdiven şeklinde çıkış gerilimi üretilir. Seviye arttıkça merdiven sayısı artar ve çıkış dalga şekli sinüsoidal biçime yaklaşır. İstenilen çıkış gerilimini elde etmek için uygun anahtarların belirli bir sıra ve zaman aralığında

tetiklenmesi gerekmektedir [23]. Tek fazlı DK-ÇSE'nin anahtarlama durumları Tablo 1.1'de verilmiştir [21].

Tablo 1.1. Tek fazlı 5-seviyeli DK-ÇSE'nin anahtarlama durumu

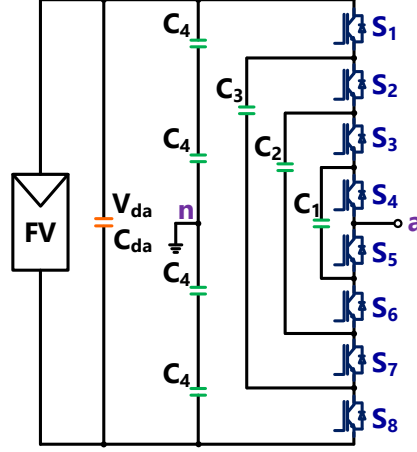
$V_{\text{çıkış}}$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
$+V_{da}/2$	Açık	Açık	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı
$+V_{da}/4$	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
0	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı
$-V_{da}/4$	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Açık	Kapalı
$-V_{da}/2$	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Açık

Her bir periyot için en fazla dört anahtar iletimde ve her anahtar bir periyot boyunca bir kez iletimde olabilir. Bu durumlar göz önüne alınarak tek fazlı 5-seviyeli DK-ÇSE'nin anahtarlama durumlarını gözden geçirilecek olursa [21]:

1. Çıkış geriliminin $V_{da}/2$ olması isteniyorsa üst yarı koldaki bütün anahtarlama elemanları (S_1 , S_2 , S_3 ve S_4) iletimde, alt yarı koldaki anahtarlama elemanları ise tıkamada olmalıdır.
2. Benzer şekilde çıkış geriliminin $V_{da}/4$ olduğu durum için üst yarı koldan S_2 , S_3 ve S_4 anahtarlama elemanları ve alt yarı koldan S_5 anahtarlama elemanı iletimde diğer anahtarlama elemanları ise tıkamada olmalıdır.
3. Çıkış geriliminin 0 olduğu durumda üst yarı kolda S_3 ve S_4 , alt yarı kolda ise S_5 ve S_6 anahtarlama elemanlarının iletimde olması gerekmektedir.
4. $-V_{da}/4$ çıkış gerilimi elde etmek için üst yarı kolda sadece S_4 , alt yarı kolda ise S_5 , S_6 ve S_7 anahtarlama elemanları iletimde olmalıdır.
5. Son olarak çıkışta $-V_{da}/2$ gerilim elde edilmek isteniyorsa alt yarı koldaki bütün anahtarlama elemanları iletimde, üst yarı koldaki bütün anahtarlama elemanları ise tıkamada olmalıdır.

1.5.2. Kondansatör Kenetlemeli ÇSE

Meynard vd. [25] tarafından ilk defa 1992 yılında kondansatör kenetlemeli ÇSE (KK-ÇSE) topolojisi önerilmiştir. Şekil 1.6'da bu eviricinin 5-seviyeli bir topolojisi gösterilmiştir [21].



Şekil 1.6. 5-seviyeli KK-ÇSE topolojisi bağlantı yapısı

Evirici teorik olarak sonsuz seviye için tasarlanabilmektedir. Fakat pratikte oluşan sınırlamalardan dolayı en fazla altı seviyeli olabilmektedir [26]. Şekil 1.6’da gösterildiği gibi tek fazlı 5-seviyeli bir kondansatör kenetlemeli (KK) evirici, 8 adet anahtarlama elemanı ve ters gerilim koruma diyotu, 3 adet yardımcı kapasitör, 4 adette DA bara kapasitörü içermektedir. Genelleştirme yapılacak olursa N seviyeli bir KK eviricinin eleman sayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir [22]:

DA bara kapasitör sayısı: $N - 1$

Yardımcı kapasitör sayısı: $[(N - 1) \times (N - 2)]/2$

Anahtarlama elemanı sayısı: $2 \times (N - 1)$

KK-ÇSE’de anahtar kombinasyonları doğru şekilde seçilirse aktif güç dönüştürücüsü olarak kullanılabilir. KK-ÇSE’nin temel karakteristik yapısını anahtarlama elemanlarına seri halde bağlı kenetleme kapasitörlerinin yer alması belirlemektedir. Anahtarlama durumu diyot kenetlemeli evirici ile benzerdir. KK eviricinin temel özellikleri [23]

- Yüksek kondansatör sayısı
- Kondansatör gerilimlerinin dengelenmesi

KK-ÇSE’nin temel avantajları ve dezavantajları maddeler halinde aşağıda verilmiştir [24].

Avantajlar

- Yardımcı kapasitörler sayesinde elektrik kesintilerinde fazladan çalışma sağlar.
- Farklı anahtarlama durumları ile çeşitli gerilim seviyeleri sağlanabilir.
- Seviye arttıkça çıkış geriliminde oluşan harmonik bozunum azalır dolayısıyla filtre ihtiyacı da azalır.
- Hem aktif, hem de reaktif güç kontrolüne imkân sağlar.

Dezavantajlar

- Evirici seviyesi arttıkça yardımcı kapasitör ihtiyacı artar. Bu da kapasitörler pahalı olduğu için maliyeti artırır.
- Eviricinin kontrolü zorlaşır.
- Aktif güç aktarımı için anahtarlama frekansı ve kayıpları yüksektir [27].

1.5.2.1. Kondansatör Kenetlemeli ÇSE Çalışma İlkesi

Tek fazlı 5-seviyeli KK-ÇSE'nin anahtarlama durumları aşağıdaki Tablo 1.2'de verilmiştir [21]. Bu durumlar göz önüne alınarak tek fazlı 5-seviyeli KK-ÇSE'nin anahtarlama durumlarını gözden geçirilecek olursa [21]:

1. Çıkış gerilimini $V_{da}/2$ olarak elde etmek için tek bir anahtarlama kombinasyonu vardır. Üst yarı koldaki tüm anahtarlama elemanlarının iletimde alt yarı koldaki elemanlar ise tıkamada olmalıdır.
2. $V_{da}/4$ çıkış gerilimi elde edebilmek için üç farklı kombinasyon vardır. Bu kombinasyonların hepsinde üst yarı kolda üç anahtarlama elemanı iletimde iken alt yarı kolda da bir anahtarlama elemanı iletimdedir. Diğer anahtarlama elemanları ise tıkama durumundadır.
3. Çıkış geriliminin 0 olması isteniyorsa altı farklı kombinasyonla anahtarlama yapılabilir. Bu anahtarlama kombinasyonlarının hepsinde üst yarı kolda iki alt yarı kolda iki olmak üzere dört anahtarlama elemanı iletim durumunda, diğer dört anahtarlama elemanı ise tıkama durumundadır.
4. $-V_{da}/4$ çıkış gerilimini elde edebilmek için üst yarı kolda bir, alt yarı kolda üç anahtarlama elemanının iletimde olduğu üç anahtarlama kombinasyonu vardır.

5. Çıkış geriliminin $-V_{da}/2$ olarak elde edildiği tek bir anahtarlama durumu vardır. Bu durumda üst yarı koldaki anahtarlama elemanları tıkamada iken alt yarı koldaki elemanlar iletimdedir.

Tablo 1.2. Tek fazlı 5-seviyeli KK-ÇSE anahtarlama durumu

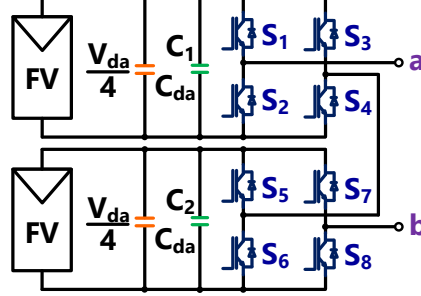
$V_{\text{çıkış}}$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
$+V_{da}/2$	Açık	Açık	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı
$+V_{da}/4$	Açık	Açık	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı
	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık
	Açık	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı
0	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı
	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık
	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı
	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı
	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık
	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık
$-V_{da}/4$	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Kapalı
	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Açık	Açık
	Kapalı	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Kapalı	Açık	Açık
$-V_{da}/2$	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Açık

1.5.3. Kaskad H-Köprü ÇSE

Kaskad H-köprü ÇSE (KHK-ÇSE), seri bağlanmış tam köprü eviricilerden oluşmaktadır. Diğer çok seviyeli eviricilerle karşılaştırıldığında aynı seviyede daha az anahtarlama elemanı içermektedir. Tek fazlı sistemde her H-köprü (tam köprü) ünitesi 3-seviyeli çıkış voltajı üretilmesi için kullanılır. Her bir H-köprü, ayrı bir DA kaynağına bağlandığı için yenilenebilir enerji kaynaklarında özellikle de fotovoltaik sistemlerde yaygın kullanılır. KHK-ÇSE'ler basit yapısı, az sayıda eleman içermesi, aşırı modülerliğe sahip olması, kontrolünün kolay olması, gerilim dengesi sorununun olmaması gibi faydalarından dolayı çokça tercih edilmektedir [28].

Çıkış geriliminin daha kaliteli olması için evirici seviyesi arttırılabilir. Fakat seviye arttıkça anahtarlama elemanı sayısı artar ve eleman sayısının artmasına bağlı olarak maliyet yükselir, anahtarlama ve iletim kayıpları artar. Bu da verimliliği düşürür. Ayrıca güvenilirlik azalır ve kontrol sistemi karmaşıklaşır [28]. Çıkışta elde edilen gerilimin

seviyesi DA kaynağı sayısının iki katından bir fazladır. Tek fazlı kaskad H-köprü (KHK) 5-seviyeli ÇSE bağlantı yapısı Şekil 1.7’de gösterilmiştir [29].



Şekil 1.7. 5-seviyeli KHK-ÇSE topolojisi bağlantı yapısı

İki adet DA kaynağı ve 8 adet anahtarlama elemanı içermektedir. Genelleştirme yapılacak olursa tek fazlı N seviyeli KHK eviricinin eleman sayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir [22]:

$$\text{Çıkış gerilimi seviyesi: } (N - 1)/2$$

$$\text{Anahtarlama elemanı sayısı: } 2 \times (N - 1)$$

KHK-ÇSE’nin temel avantajları ve dezavantajları maddeler halinde aşağıda verilmiştir [27]:

Avantajlar

- Diğer çok seviyeli evirici topolojilerine oranla aynı seviye için daha az anahtarlama elemanına ihtiyaç duyar.
- Fazladan diyot ve kapasitör gerektirmez.
- Yapısı basit olduğu için ölçeklenebilir, modüler devre düzeni ve paketlenmeye izin verir.

Dezavantajlar

- Aktif güç dönüşümünde her bir modül için ayrı bir DA kaynağına ihtiyaç duyar.

1.5.4. Karşılaştırma Sonuçları

Literatürde yaygın kullanıma sahip üç klasik çok seviyeli eviricinin (DK-ÇSE, KK-ÇSE ve KHK-ÇSE) analizi ile beş seviyeli model için bu üç topolojinin eleman sayısı, elemanlar üzerinde gerilim stresi, özel gereksinimler, kontrol sorunları ve kontrol karmaşıklığı açısından karşılaştırılması Tablo 1.3'te verildiği gibi yapılabilir [19].

Tablo 1.3. Diyot kenetlemeli (DK), kondansatör kenetlemeli (KK) ve kaskad H-köprü (KHK) tipi 5-seviyeli eviriciler için karşılaştırma sonuçları.

	DK	KK	KHK
Topoloji			
Eleman sayısı	4 DA kondansatörü + 8 aktif anahtar + 6 diyot	4 DA kondansatörü + 8 aktif anahtar + 3 kenetli kondansatör	2 DA kondansatörü + 8 aktif anahtar + 2 DA kaynağı
Gerilim stresi	$C_1 - C_4: V_{da}/4$ $S_1 - S_8: V_{da}/4$ $D_1 - D_6: V_{da}/4$ $D_3 - D_4: V_{da}/2$ $D_2 - D_5: 3V_{da}/4$	$C_4: V_{da}/4$ $S_1 - S_8: V_{da}/4$ $C_1: 3V_{da}/4$ $C_2: V_{da}/2$ $C_3: V_{da}/4$	$C_1 - C_2: V_{da}/4$ $S_1 - S_8: V_{da}/4$
Özel gereksinim	Kenetleme diyotları	Kenetleme kondansatörleri	Yalıtılmış DA kaynakları
Kontrol Durumu	Gerilim dengeleme	Gerilim ayarı ve dengeleme	Güç paylaşımı
Tasarım Karmaşıklığı	Düşük	Orta (Kondansatör)	Yüksek (Giriş transformatörü) Düşük (FV uygulamaları)

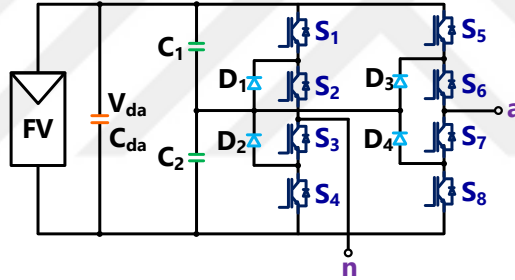
Yukarıda incelemesi yapılmış olan tek fazlı çok seviyeli evirici topolojilerinin temel fiziksel özelliklerinin ve literatürde yapılmış çalışma çıktılarının karşılaştırılması bu bölümde ele alınmaktadır. Topolojilerin temel durum ve karşılaştırma özellikleri Tablo 1.4'te verilmiştir.

Tablo 1.4. Çok seviyeli evirici topolojilerin eleman bakımından karşılaştırılması

Evirici Topolojileri	Seviye	Anahtar	Diyot	Kapasitör	DA Kaynağı	$V_{giriş}$ (V)	$I_{kaçak}$ (mA)	$f_{anahtar}$ (kHz)	Filtre	Verim (%)
DK-ÇSE [30]	3	4	2	2	1	800	7	16	$L_1=3$ mH	98.16
KK-ÇSE [30]	3	4	0	3	1	800	-	20	$L_1=3$ mH $C=2.2$ μ F	-
KHK-ÇSE [31]	3	4	0	0	1	400	40	20	$L_1, L_2=8$ mH $C=6.6$ μ F	-

1.5.5. 5-Seviyeli H-Köprü Diyot Kenetlemeli Evirici

Bu tez çalışmasında 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici ile ilgili benzetim çalışmaları gerçekleştirilecektir. Şekil 1.8’de 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 1.8. 5-seviyeli H-köprü DK evirici temel devre şeması

Bu evirici 3-seviyeli diyot kenetlemeli iki adet yarım-köprü kollarından oluşmaktadır. Çıkış gerilimi $+V_{da}/2$, 0 , $-V_{da}/2$ olan her bir 3-seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin birleşmesi ile beş seviyeli çıkış gerilimi $+V_{da}$, $+V_{da}/2$, 0 , $-V_{da}/2$ ve $-V_{da}$ olan 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici meydana gelmektedir. Seçmeli harmonik elemeli darbe genişlik modülasyonu (SHE-DGM), sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu (SDGM) ve uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UV-DGM) gibi birçok modülasyon tekniği 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için kullanılabilir. Bu topoloji ABB ve TMEIC-GE tarafından orta gerilim motor sürücüler için ticarileştirilmiştir [32]. 22 MW’a kadar güç aralığına sahip olan bu evirici yapısı, daha yüksek güç değerlerinde kullanılabilmesi için ek kaskad hücrelerin istiflenmesi yöntemi kullanılır. Literatürdeki farklı tek fazlı 5-seviyeli topolojilerin kullanılan eleman sayısı bakımında karşılaştırılması Tablo 1.5’te verilmiştir [32].

Tablo 1.5. Tek fazlı 5-seviyeli eviriciler için eleman sayıları

Topoloji	Anahtar	DA Bağlantı Kondansatörü	Kenetleme Diyotu	Yardımcı Kondansatör	Endüktans	DA Kaynağı	Toplam
NNK	8	4	12	0	0	1	25
KK	8	4	0	6	0	1	19
KHK	8	0	0	0	0	2	10
5S-NNK	8	2	4	0	0	1	15
5S-ANNK	8	2	0	1	0	1	12
HK	14	4	6	3	0	1	28
KHK-Tek Kaynak	8	1	0	0	0	1	10
KHK-Eşit olmayan Kaynak	8	0	0	0	0	2	10
YÇHÇ	12	0	0	2	0	2	16
MÇHÇ	16	2	0	8	2	1	29

Şekil 1.8’de gösterilen 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici anahtarlama durumları aşağıdaki Tablo 1.6’da verilmiştir [21].

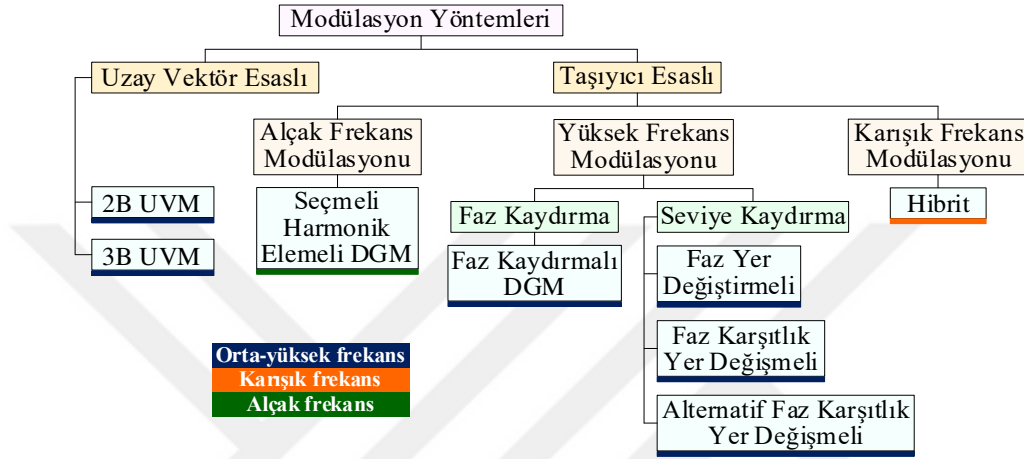
Tablo 1.6. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü DK evirici anahtarlama durumu

V_{an}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
$+V_{da}$	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı
$+V_{da}/2$	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı
	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı
0	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı
	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı
	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık
$-V_{da}/2$	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı
	Kapalı	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık
$-V_{da}$	Açık	Açık	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Kapalı	Açık	Açık

1.6. Çok Seviyeli Evirici Modülasyon Yöntemleri

Modülasyonda amaç eviricinin çıkış gerilimini ya da akımını referans işaret değerine yaklaştırmaktır. Eviriciler için akım veya gerilim kontrollü anahtarlama yapılabilir. Fakat akım kontrollü anahtarlama yüksek frekans gerektirdiği için çoğunlukla tercih edilmez. Çok seviyeli eviriciler yüksek güç ve yüksek gerilim gerektiren uygulamalarda kullanıldığı için düşük frekanslarda kullanılır. Gerilim kontrollü anahtarlama düşük frekans gerektirdiği için çok seviyeli eviricilerde kullanımı yaygındır. Anahtarlama işlemi

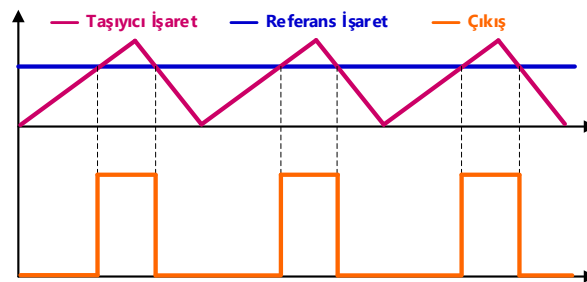
yapılırken referans işaret olarak çoğunlukla sinüzoidal işaret seçilir ve bir tetikleme işareti üretilir. Bu işaret eviricinin anahtarlama elemanlarına uygulanarak çıkış işareti elde edilir [33]. Modülasyon stratejisi, çok seviyeli evirici topolojisi ile sıkı sıkıya bağlıdır ve sistem performansını belirler. Modülasyon stratejileri Şekil 1.9'daki gibi sınıflandırılabilir [20, 34].



Şekil 1.9. Çok seviyeli eviriciler için modülasyon stratejileri sınıflandırması

1.6.1. Darbe Genişlik Modülasyon Yöntemi

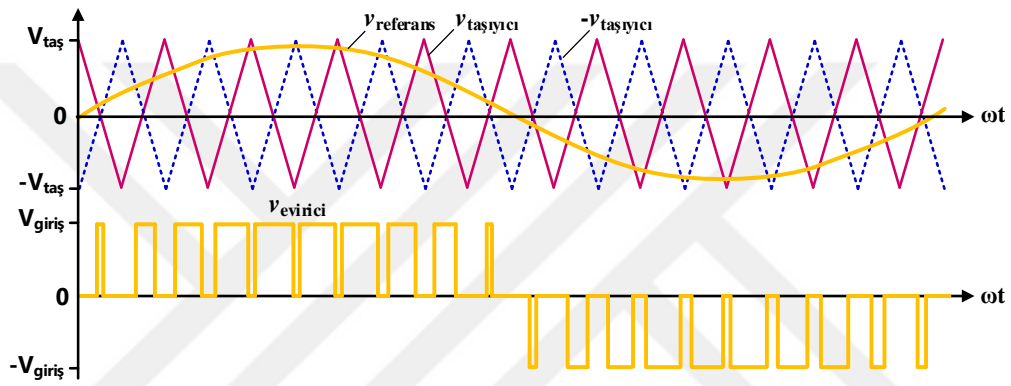
DGM tekniğinde biri referans diğeri taşıyıcı olmak üzere iki adet işarete ihtiyaç duyulur [35]. Şekil 1.10'da gösterildiği gibi klasik DGM tekniğinde referans işareti olarak DA işareti ve taşıyıcı olarak üçgen işaret kullanılır. Taşıyıcı ve referans işaretin kesişim noktaları belirlenerek anahtarlama işareti üretilir. Bu teknikte referans işareti sabit olduğu için darbelerin doluluk boşluk oranları aynıdır.



Şekil 1.10. Klasik darbe genişlik modülasyon tekniği

1.6.2. Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon Yöntemi

Çok seviyeli eviricilerde en çok kullanılan modülasyon tekniklerinden biri sinüzoidal darbe genişlik modülasyonudur (SDGM). Şekil 1.11’de gösterildiği gibi çıkışta elde edilmek istenen işaret sinüs olduğu için SDGM tekniğinde referans işareti olarak sinüzoidal işaret kullanılır. Uygulanan darbe genişlikleri sinüs dalgasının genliğine bağlı olarak değişir. Bu sayede bozunum katsayısı ve en düşük dereceli harmonik büyük oranda azaltılır [23].



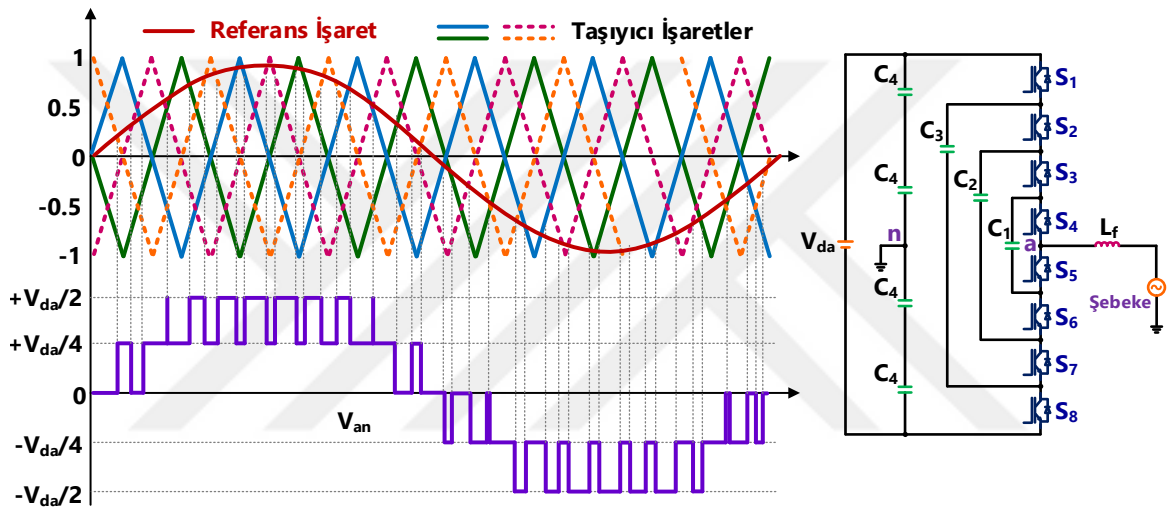
Şekil 1.11. SDGM tekniği

SDGM tekniğinde anahtarlama işaretlerini üretmek için üçgen bir taşıyıcı işaret ve sinüzoidal bir referans işaret kullanılır. Bu iki işaretin kesişim noktaları dikkate alınarak anahtarlama işaretleri üretilir [23]. Kesişim noktasında hangi işaretin genliği daha büyük ise ona göre işlem yapılır. Sinüs dalgasının genliğinin düşük olduğu noktalarda darbe genişliği azalırken, sinüs genliğinin yüksek olduğu noktalarda darbe genişliği artar. Çıkış gerilimini referans gerilime yakınsayabilmek için taşıyıcı genliğinin referans işaretin genliğinden büyük veya eşit olması gerekir [36].

Çok seviyeli evirici topolojileri için geleneksel SDGM yöntemini genişletmek için çoklu taşıyıcılar kullanılır. Bu tür yapılar, çok taşıyıcılı DGM yöntemi olarak bilinirler. Faz kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu (FK-DGM) ve seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu (SK-DGM), çok taşıyıcılı DGM yöntemlerindendir.

1.6.2.1. Faz Kaydırmalı Darbe Genişlik Modülasyonu Yöntemi

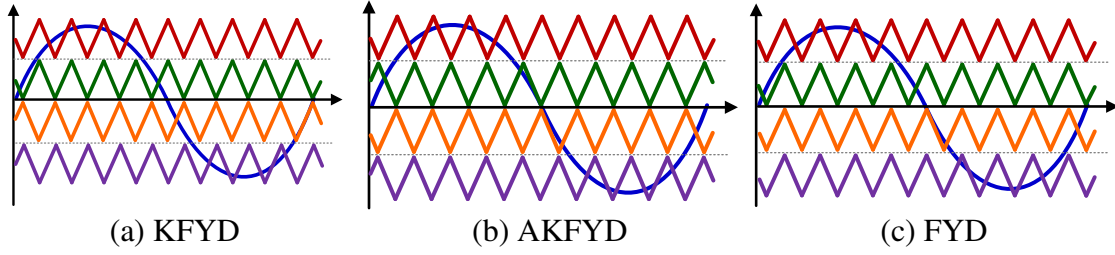
FK-DGM yönteminde tümü faz kaydırılmış bir dizi taşıyıcı işaretler kullanır. Çok hücreli topolojilerde (örneğin kondansatör kenetlemeli ve kaskad H-köprü gibi) her bir taşıyıcı işaret, bağımsız olarak modüle edilebilmesi için güç hücresi ile ilişkilidir. Şekil 1.12’de gösterildiği gibi 5-seviyeli KK evirici, dört çift tamamlayıcı kontrollü anahtara ((S_1, S_8), (S_2, S_7), (S_3, S_6) ve (S_4, S_5)) sahiptir. Her bir anahtar çifti, birbirine göre 90° faz kaydırılmış kendi üçgen taşıyıcısına sahiptir [19].



Şekil 1.12. 5-seviyeli KK evirici için FK-DGM modülasyon stratejisi

1.6.2.2. Seviye Kaydırmalı Darbe Genişlik Modülasyonu Yöntemi

Taşıyıcı işaretler, evirici tarafından üretilen her bir olası çıkış gerilim seviyesi ile birlikte her bir taşıyıcı işaret ile ilişkili genlikte kaydırmalı bir şekilde düzenlenebilir. Bu strateji seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyon (SK-DGM) olarak bilinmektedir. Üçgen dalga işaretinin yapısına göre, faz yer değiştirmeli (FYD), karşılıklı faz yer değiştirmeli (KFYD) ve alternatif karşılıklı faz yer değiştirmeli (AKFYD) olarak üç farklı şekilde anahtarlama işaretleri üretilebilmektedir [37, 19]. Şekil 1.13’te seviye kaydırmalı DGM modülasyon stratejisi diyagramı gösterilmiştir [20].



Şekil 1.13. Seviye kaydırmalı DGM modülasyon stratejisi

1.6.3. Üçüncü Harmonik Eklemeli Darbe Genişlik Modülasyonu

Genellikle üç fazlı eviricilerde kullanımına rastladığımız ÜHE-DGM yöntemi, temel modülasyon işareti ve bu temel modülasyon işaretinin n katı frekansa sahip diğer bir modülasyon işaretinin (n . harmonik bileşen) birleşiminden oluşan yeni bir modülasyon işareti ile tek veya çoklu taşıyıcı işaretinin karşılaştırılması prensibine dayanmaktadır [38].

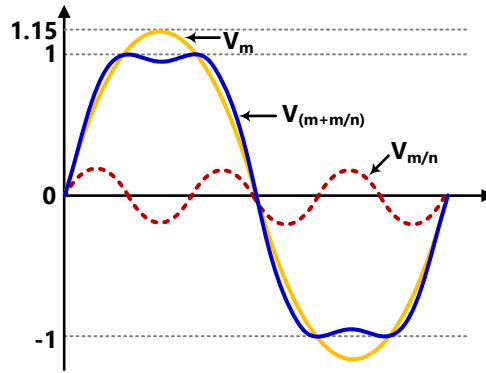
Yapılan araştırmalarda üç fazlı DGM'lu evirici sisteminin maksimum modülasyon indeksinin her bir faz bacağına hedef referans dalga şekline ortak mod n . harmonik teriminin eklenmesi ile artırılabilirliği belirlenmiştir [39]. ÜHE-DGM yöntemi ile maksimum ulaşılabilir çıkış gerilim değerini artırma imkânına kavuşulmaktadır. Temel modülasyon işareti (V_m), temel modülasyon işaretinin üçüncü harmonik bileşeni ($V_{m/n}$) ve bu iki işaretin birleşimini ($V_{(m+m/n)}$) ifade eden denklemler aşağıda verilmiştir.

$$V_m = MV_{da} \sin \omega_0 t \quad (1.6)$$

$$V_{m/n} = M_3 V_{da} \sin 3\omega_0 t \quad (1.7)$$

$$V_{(m+m/n)} = V_{da} (M \sin \omega_0 t + M_3 \sin 3\omega_0 t) \quad (1.8)$$

Gerçekleştirilen analizler sonrasında M modülasyon indeksinin $2/\sqrt{3} = 1.15$ değerine kadar artırılabilirliği ve buna bağlı olarak M_3 modülasyon indeksinin ise $\sqrt{3}/9 = 0.192$ değerini alabileceği belirlenmiştir [39]. M_3 modülasyon indeks değerinin farklı değerleri alması durumunda uygulandığı evirici çıkış karakteristiğini değiştirir [40]. Üç fazlı sistemlerde üçüncü harmonik çıkış geriliminde görünmez [41]. Şekil 1.14'te Denklem (1.6)-(1.8)'de ifade edilen modülasyon işaretlerin zamana bağlı değişimlerini belirten dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 1.14. ÜHE-DGM tekniği temel modülasyon işaretleri

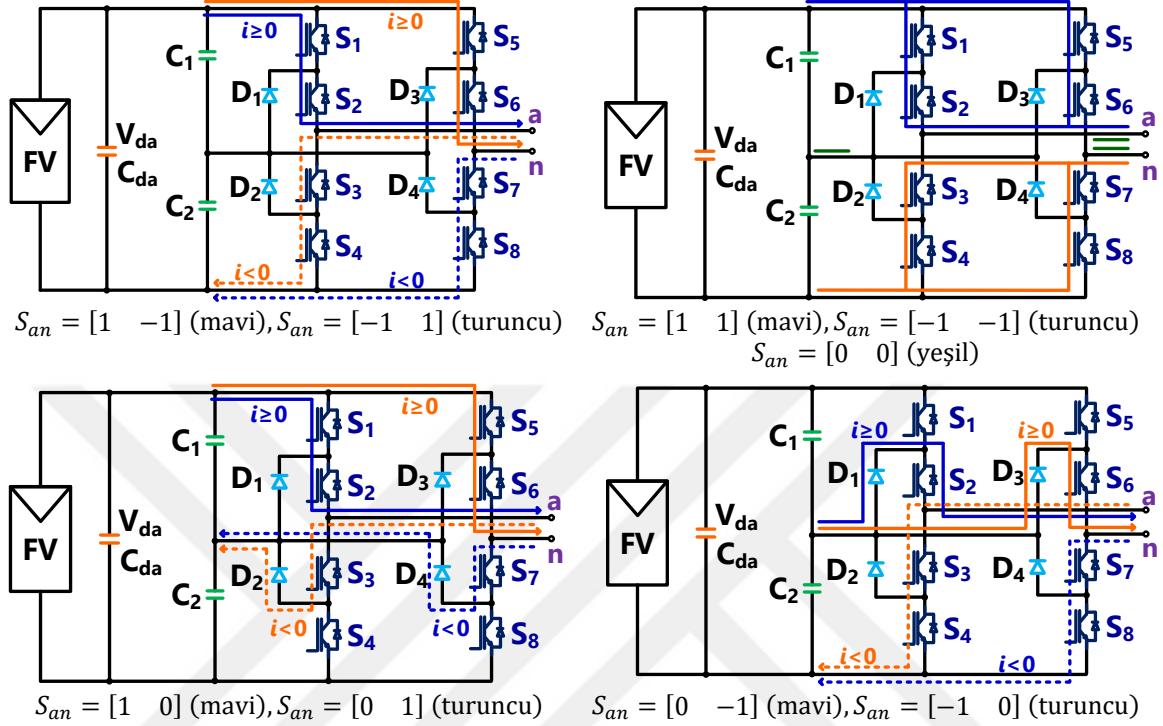
ÜHE-DGM yöntemi bir fazlı evirici topolojilerinde kullanılması sonucunda elde edilen THB değerleri üç fazlı evirici topolojilerindeki sonuçlardan daha büyüktür [42]. Bunun temel sebebi üç fazlı ÜHE-DGM’nda tüm fazlardaki üçüncü harmonik bileşenleri aynı fazdadır ve fazlara ait üçüncü harmonik bileşenleri biri birinin etkisini yok etmektedir [43]. Bu sebeple ÜHE-DGM’nun bir fazlı sistemlerde kullanımı THB açısından istenen-beklenen sonuçların uzağında kalınmasına sebep olmaktadır. Üç fazlı evirici topolojilerinde ÜHE-DGM yöntemi kullanılması ile diğer DGM yöntemlerine göre daha yüksek çıkış gerilimi, akımı ve daha düşük THB değerleri elde edilebilmektedir [44, 45].

1.6.4. Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu

Uzak vektör darbe genişlik modülasyonu (UV-DGM) çok seviyeli eviricilerde kullanımı yaygın olan bir diğer modülasyon tekniğidir [46, 47]. UV-DGM tekniğinde üç faz gerilim kontrolü tek bir uzak vektörü ile yapılır. Çıkış gerilimi için vektörler her anahtarlama durumu için teker teker hesaplanır. Belirlenen vektörlerin oluşturduğu diyagramda anahtarlama durumlarını ve bu anahtarlama durumlarına karşılık gelen çıkış gerilimlerini içerir. Uzak vektörü oluşturulan vektör diyagramı üzerinde döndürülerek anahtarlama işaretleri elde edilir. Elde edilen anahtarlama işaretleri eviriciye uygulanır.

Bir fazlı sistemlerde UV-DGM’nun uygulaması üç fazlı sistemlere göre farklılıklar içermektedir. Uygulanacak olan güç elektroniği çevirici özelliğine göre UV-DGM yapısını yeniden uyarlamak gerekmektedir [48]. Bu tez kapsamında ele alınan ve Şekil 1.8’de gösterilen tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici kontrolü için modülasyon tekniği olarak UV-DGM’nun seçilmesi durumunda yapılması gereken adımlardan ilki

eviricinin çalışma modlarını belirlemektir. Şekil 1.15'te tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli eviricinin çalışma modları gösterilmiştir [49].



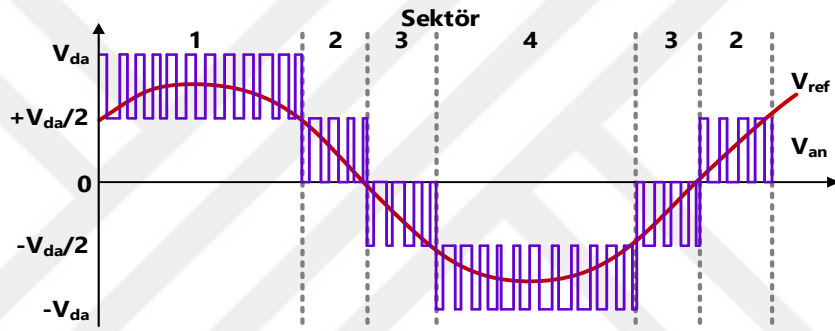
Şekil 1.15. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için basitleştirilmiş çalışma modları

Bu çalışma modlarına ait çalışma durumları Tablo 1.7'de verilmiştir. Evirici çıkış gerilimi V_{an} , 0, $\mp V_{da}/2$ ve $\mp V_{da}$ değerleri ile sınırlıdır [50].

Çalışma durumları göz önünde tutulduğunda çıkışta modülasyon referans sinüzoidal gerilim dalga şekli (v_{ref}) elde etmek için anahtarlama işleminin belirli bir düzende gerçekleştirilmesi gerekir. Şekil 1.16'da anahtarlama sonucunda gözlemlenecek evirici çıkış gerilimi ve modülasyon referans gerilimi işaretleri dalga şekilleri gösterilmiştir [51].

Tablo 1.7. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için çalışma durumları

Durum	Vektör	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	Faz-a	Faz-n	V _{an}
[1 1]	V _{1,1}	1	1	0	0	1	1	0	0	V _{da} /2	V _{da} /2	0
[1 0]	V _{1,0}	1	1	0	0	0	1	1	0	V _{da} /2	0	V _{da} /2
[1 -1]	V _{1,-1}	1	1	0	0	0	0	1	1	V _{da} /2	-V _{da} /2	V _{da}
[0 1]	V _{0,1}	0	0	1	1	1	1	0	0	0	V _{da} /2	-V _{da} /2
[0 0]	V _{0,0}	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
[0 -1]	V _{0,-1}	0	1	1	0	0	0	1	1	0	-V _{da} /2	V _{da} /2
[-1 1]	V _{-1,1}	0	0	1	1	1	1	0	0	-V _{da} /2	V _{da} /2	-V _{da}
[-1 0]	V _{-1,0}	0	0	1	1	0	1	1	0	-V _{da} /2	0	-V _{da} /2
[-1 -1]	V _{-1,-1}	0	0	1	1	0	0	1	1	-V _{da} /2	-V _{da} /2	0



Şekil 1.16. Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici için basitleştirilmiş çalışma modları

Modülasyon referans gerilim işareti aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$v_{ref} = m \sin(\omega t + \theta) \quad (1.9)$$

Burada m modülasyon indeksi ve θ , v_{ref} 'in başlangıç açısıdır.

Şekil 1.16'da gösterildiği üzere durağan koordinat (çerçeve) dört sektöre bölünebilir. v_{ref} 'in değerine göre [52]:

$$\text{Sektör 1: } 0.5 \leq v_{ref} \leq 1 \quad (1.10)$$

$$\text{Sektör 2: } 0 \leq v_{ref} < 0.5 \quad (1.11)$$

$$\text{Sektör 3: } -0.5 < v_{ref} < 0 \quad (1.12)$$

$$\text{Sektör 4: } -1 \leq v_{ref} \leq -0.5 \quad (1.13)$$

Bu sektörler ile ilişkili çalışma durumları aşağıda verilmiştir.

$$\text{Sektör 1: } S_{an} = \{[1 \ 0], [1 \ -1], [1 \ 0]\} \quad (1.14)$$

$$\text{Sektör 2: } S_{an} = \{[1 \ 0], [0 \ 0], [1 \ 0]\} \quad (1.15)$$

$$\text{Sektör 3: } S_{an} = \{[-1 \ 0], [0 \ 0], [-1 \ 0]\} \quad (1.16)$$

$$\text{Sektör 4: } S_{an} = \{[-1 \ 0], [-1 \ 1], [-1 \ 0]\} \quad (1.17)$$

Modülasyon referans gerilim işareti (v_{ref}), bir anahtarlama periyodu (T_s) boyunca sabittir. Anahtarlama sürecinde ilgili sektördeki vektörler belirli çalışma zaman dilimlerinde aktif olmaktadır [53]. Bir anahtarlama periyodu (T_s) boyunca iki vektörün (V_1 ve V_2) kendilerine ait zaman dilimlerinde (T_1 ve T_2) görevlerini yerine getirdiklerinden hareketle aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$V_{an}T_s = V_1T_1 + V_2T_2 \quad (1.18)$$

$$T_s = T_1 + T_2 \quad (1.19)$$

Sektörlere bağlı olarak çıkış gerilim vektörlerinin çalışma zaman aralıklarını Tablo 1.8’de verildiği gibi seçilebilir [53]. Literatürde çalışma zaman aralıklarının sayısı ve değeri ile ilgili farklı çalışmalar mevcuttur [50] - [53]. Aralık sayısı artırmanın sistem kayıplarını azalttığı ve THB değerini düşürdüğü ifade edilmektedir. Sektör yapısında genel itibari ile simetrilerin mevcut olduğu ve buna bağlı olarak simetri sektörlerinde zaman aralığını diğer simetrik sektörlerle göre değiştirmenin sistem performansına pozitif etki yaptığı gözlemlenmiştir [52].

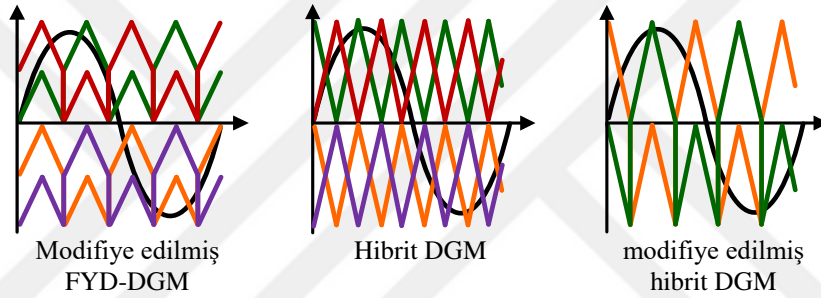
Tablo 1.8. Çıkış gerilim vektörleri çalışma zaman dilimi

Zaman Sektör	T₁	T₂
1	$2(V_{da} - u_{\alpha})T_s/V_{da}$	$(2u_{\alpha} - V_{da})T_s/V_{da}$
2	$2u_{\alpha}T_s/V_{da}$	$(V_{da} - 2u_{\alpha})T_s/V_{da}$
3	$-2u_{\alpha}T_s/V_{da}$	$(V_{da} + 2u_{\alpha})T_s/V_{da}$
4	$2(V_{da} + u_{\alpha})T_s/V_{da}$	$-(V_{da} + 2u_{\alpha})T_s/V_{da}$

1.6.5. Hibrit/Modifiye Edilmiş Modülasyon

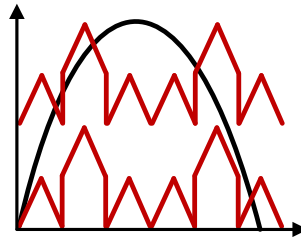
Çok seviyeli eviricilerde kullanılan uzay vektör ve taşıyıcı esaslı temel modülasyon tekniklerinin yanı sıra bu iki modülasyon tekniği sınıfından faydalanılarak ortaya çıkarılmış hibrit ve modifiye edilmiş modülasyon teknikleri de literatürde mevcuttur. Genel itibariyle modülasyon tekniğinde kullanılan taşıyıcı işaretinin farklılaştırılması ile ortaya çıkan modülasyon tekniğidir.

Sarkar vd. çalışmasında 5-seviyeli kaskad H-köprü evirici için Şekil 1.17’de gösterilen faz yer değiştirmeli (FYD), modifiye edilmiş FYD, hibrit ve modifiye edilmiş modülasyon stratejilerinin uygulanması ele alınmıştır [54].



Şekil 1.17. Modifiye edilmiş ve hibrit taşıyıcı işaretleri

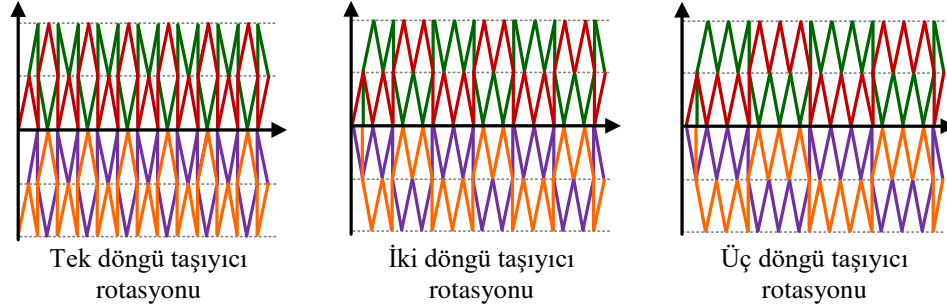
Podder vd. çalışmasında tek fazlı 4-hücre 9-seviyeli kaskad H-köprü evirici için Şekil 1.18’de gösterilen KFYD temelli modifiye edilmiş modülasyon tekniği irdelenmiştir [55].



Şekil 1.18. Modifiye edilmiş ve hibrit taşıyıcı işaretleri

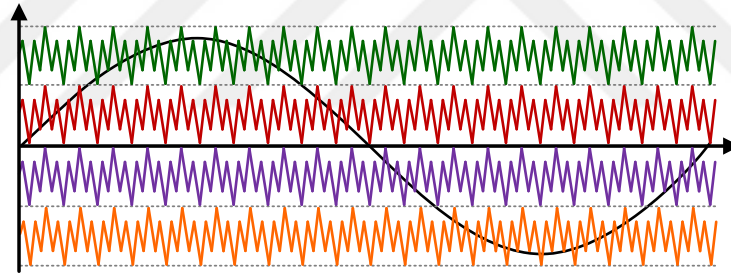
Meraj vd. çalışmasında empedans kaynaklı kaskad çok seviyeli evirici için modifiye edilmiş seviye kaydırmalı darbe genişlik modülasyon (SK-DGM) tekniği kullanımı

önermektedir [56]. Şekil 1.19’da gösterilen üç farklı taşıyıcı işareti yapısının evirici performansı göstergeleri (verim, dalga şekli biçim, temel (50 Hz) gerilim ve akım bileşeni değeri ve THB) üzerindeki etkisi hem benzetimsel hem de deneysel açılardan irdelenmiştir.



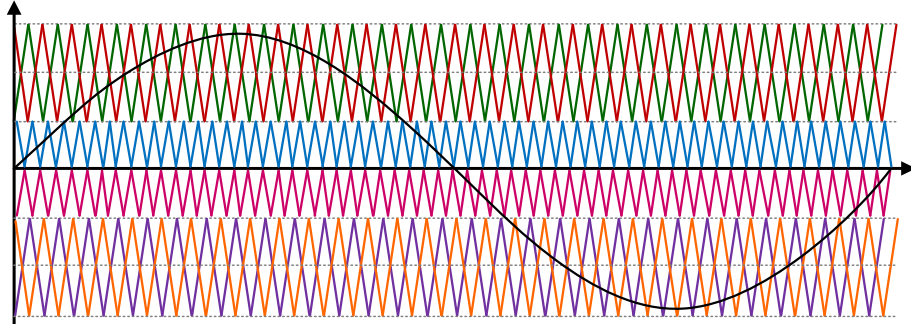
Şekil 1.19. Modifiye edilmiş SK-DGM tekniği taşıyıcı işaret şekilleri

Yadav vd. çalışmasında üç fazlı 5-seviyeli kaskad bağlı transformatörlü eviricide kullanılmak üzere Şekil 1.20’de gösterilen modifiye edilmiş taşıyıcılı sinüsoidal DGM tekniğini önermektedir [57].



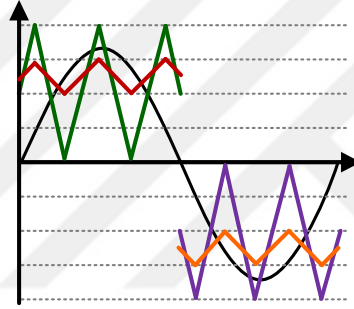
Şekil 1.20. Modifiye edilmiş taşıyıcılı SDGM dalga şekli

Ye vd. çalışmasında Şekil 1.21’de gösterilen FK-DGM ve SK-DGM tekniklerinin kullanıldığı hibrit bir modülasyon tekniğini 7-seviyeli evirici için önermektedir [58]. Hem benzetim hem de deneysel çalışmalar sonucunda çıkış geriliminde düşük oranda harmonik gözlenmiş, kapasitörlerde daha küçük oranda dalgalanmaların meydana geldiği ve bunun sonucunda daha küçük değerde kapasitör ve evirici çıkış filtre kullanımının yeterli olacağı kanaatine varılmıştır.



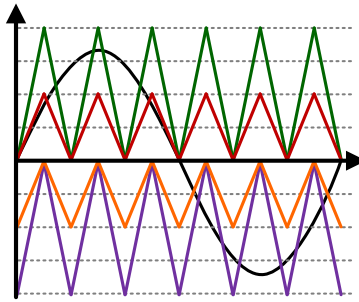
Şekil 1.21. Hibrit DGM dalga şekli

Ahmadzadeh vd. çalışmasında üç fazlı 5S-NNK evirici için Şekil 1.22’de gösterilen FYD modülasyon strateji temelli modifiye edilmiş DGM tekniğini önermiştir [59].



Şekil 1.22. Modifiye edilmiş DGM dalga şekli-I

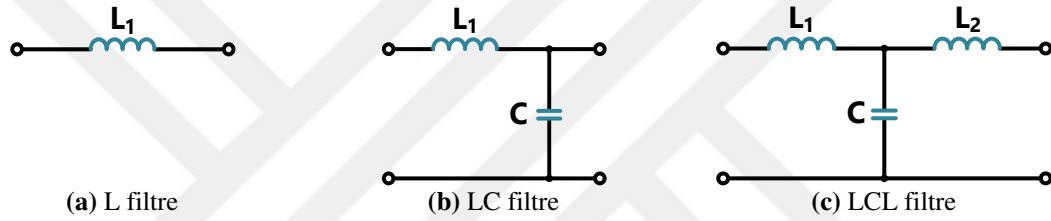
Kumar vd. çalışmasında üç fazlı asenkron motor sürmek amacıyla 5-seviyeli kaskad H-köprü evirici için Şekil 1.23’te gösterilen modifiye edilmiş DGM tekniğini önermiştir [60].



Şekil 1.23. Modifiye edilmiş DGM taşıyıcı işareti-II

1.7. Filtre Tasarımı

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin şebekeye aktarımında güç elektroniği çeviricilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Dönüştürücülerin anahtarlama işlemi DGM tekniği ile yapıldığı için dönüştürücü çıkış gerilimi harmonik bileşenler içerir [61]. Harmonik bileşenli akımın şebekeye enjekte edilmesi sorunlara yol açacağı için çıkış geriliminin filtreden geçirilmesi gerekir. Şebeke bağlantılı sistemlerde filtre kullanımının hem gerilim harmoniklerini azaltma hem de şebekeye bağlanacak eviricinin olabildiğince istenen şebeke bağlantı standartlarını sağlama açısından önemi büyüktür [62, 61]. Kullanımı yaygın olan filtre temel devre şemaları Şekil 1.24'te gösterilmiştir.



Şekil 1.24. Filtre türleri

1.7.1. L Filtre

L filtre evirici çıkışına seri bağlı bir adet endüktanstan oluşur. Yüksek frekans zayıflatma gücü düşüktür. Ayrıca yüksek güçlü sistemler için sistem dinamik cevabı da yavaştır. L filtrenin etkisini arttırmak için endüktans değeri yükseltilebilir [63, 61].

1.7.2. LC Filtre

LC filtre bir endüktans ve bir kapasitörden oluşur. L filtreye göre yüksek frekans zayıflatma gücü daha yüksektir. Kapasite değeri artırılarak endüktans değeri azaltılabilir. Böylece kayıplar ve maliyet azalır. Fakat yüksek kapasite değeri de çeşitli problemlere yol açtığı için önerilmemektedir [62, 61]. LC filtrede kullanılacak kapasite ve endüktans değerlerinin hesabı aşağıdaki denklemlerde verilmiştir [64].

$$L = \frac{R}{2\pi f_s} \quad (1.20)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_s R} \quad (1.21)$$

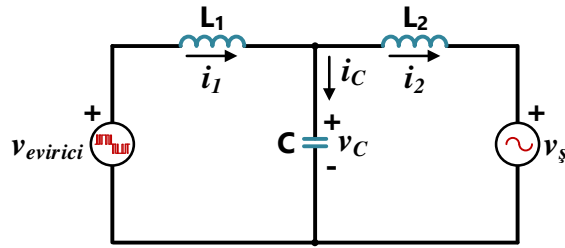
$$10f_s \leq f_r \leq \frac{f_{sw}}{2} \quad (1.22)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.23)$$

Burada R yükü, L filtre endüktansını, C filtre kapasitesini, f_s şebeke frekansını, f_r kesim frekansını ve f_{sw} anahtarlama frekansını ifade etmektedir.

1.7.3. LCL Filtre

Bir adet kapasitör ve iki endüktanstan oluşan temel LCL filtre devre şeması Şekil 1.25'te gösterilmiştir. Eleman sayısının artmasıyla değerleri daha küçük olur. Yüksek frekans zayıflatmanın en yüksek olduğu filtre çeşididir. Diğer filtreleere göre LCL filtre harmonikleri azaltmada daha etkilidir ancak rezonans gibi bir problemi vardır. Ayrıca LCL filtrenin tasarımı oldukça karmaşıktır. LCL filtre endüktif çıkışa sahip olması sebebiyle ani deşarj akımı ile başa çıkma konusunda iyidir [62, 61, 63]. LCL filtrede kullanılacak kapasitör ve endüktansların değerleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanır [63].



Şekil 1.25. Temel LCL filtre devre şeması

$$L_{1_min} \geq \frac{V_{in} T_{sw}}{8\lambda_{cL1} I_1} , \quad \lambda_c: \%20 - \%30 \quad (1.24)$$

$$L_{1_max} \leq \frac{\lambda_{cL1} V_s}{\omega_0 I_1} , \quad \lambda_c: \sim \%5 \quad (1.25)$$

$$C \leq \lambda_c \frac{P_o}{\omega_o V_s^2} , \quad \lambda_c: \sim \%5 \quad (1.26)$$

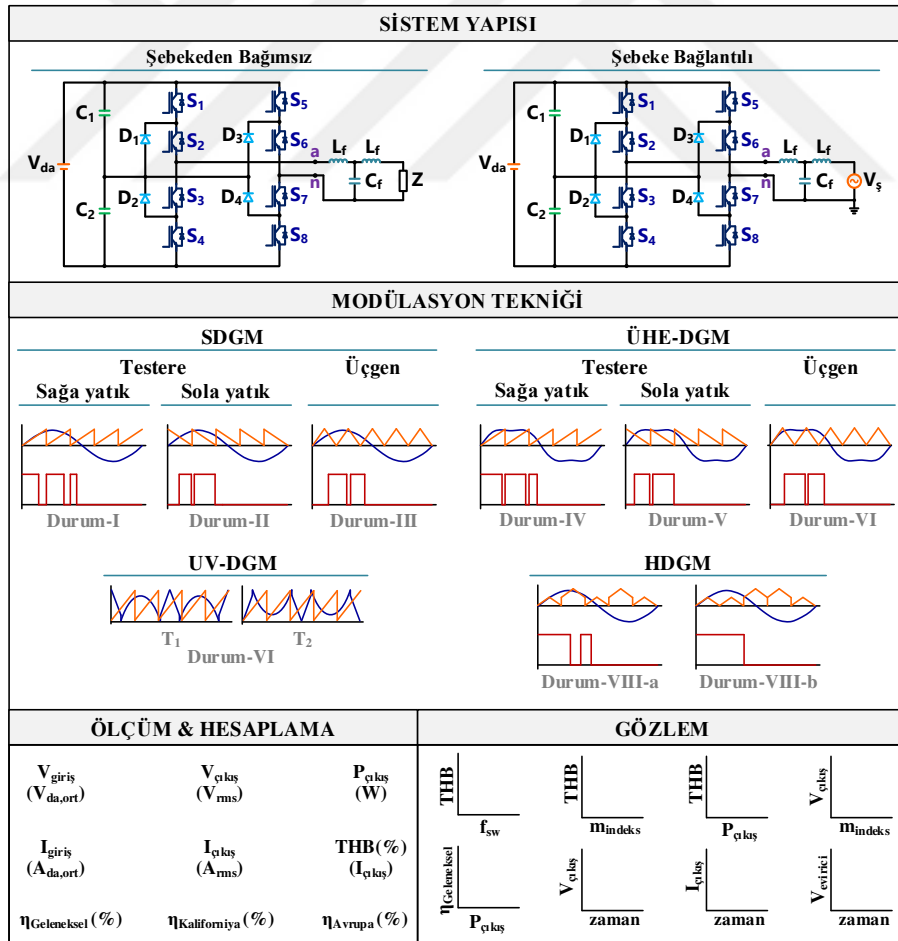
$$L_2 \leq \frac{1}{L_1 C \omega_h^2 - 1} \cdot \left(L_1 + \frac{|V_{inv}(j\omega_h)|}{\omega_h \lambda_h I_2} \right) \quad (1.27)$$

Burada V_{in} evirici giriş gerilimini, T_{sw} taşıyıcı periyodunu, I_1 endüktans akımını, λ_{c_L1} dalgalanma sabitini, V_s rms şebeke gerilimini, ω_0 modülasyon işaretinin açısal frekansını, λ_c filtre kapasite tarafından üretilen reaktif gücün şebeke bağlantılı eviricinin nominal çıkış aktif gücüne oranını, P_o şebeke bağlantılı eviricinin nominal çıkış aktif gücünü, V_{inv} rms evirici çıkış gerilimini, I_2 enjekte edilen rms şebeke akımını, λ_h baskın harmoniğin harmonik oranını, ω_h baskın harmoniğin açısal frekansını ve f_h baskın harmonik frekansını ifade etmektedir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

2.1. Giriş

Tezin bu bölümünde tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli eviricide Şekil 2.1’de özetlenen farklı modülasyon tekniklerinin uygulanması durumları için benzetim çalışması gerçekleştirilecektir. Temelde eviricinin şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız durumları için ayrı ayrı irdelemeler yapılacaktır. Çeşitli modülasyon teknikleri ve çalışma koşulları dikkate alınarak eviricinin performansını ortaya koymaya yardımcı olacak evirici çıkış akım ve gerilim dalga şekilleri gözlemlenecek ve evirici verimi (Normal verim, Avrupa verimi ve Kaliforniya verimi), aktif evirici giriş ve çıkış güçleri ve toplam harmonik bozulma (THB) değerleri hesaplanacaktır.



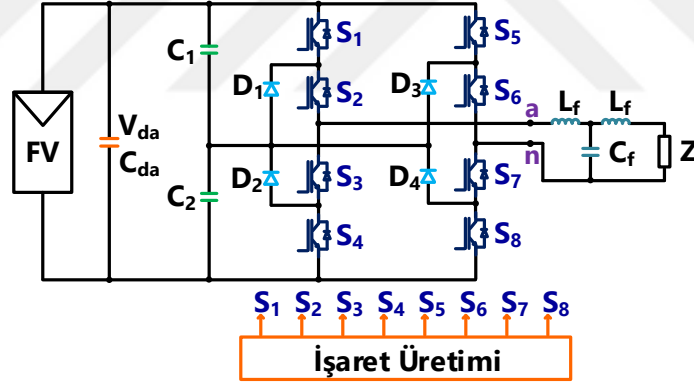
Şekil 2.1. Evirici benzetimine ait sistem yapısı, modülasyon tekniği, ölçüm & hesaplama ve gözlem prensipleri

2.2. Benzetim Çalışması

2.2.1. Şebekeden Bağımsız Evirici

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli eviricinin şebekeden bağımsız olarak çalışma durumları farklı açılardan bu bölümde ele alınacaktır. Evirici modülasyon tekniği ile çıkış gücü, THB ve verim arasındaki ilişki ve modülasyon tekniği ile modülasyon indeksi, anahtarlama frekansı, THB, evirici çıkış gerilimi arasındaki ilişki irdelenecektir.

Benzetim çalışması gerçekleştirilecek olan şebeke bağlantısız tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici sisteminin genel blok diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Şekildeki İşaret Üretim bloğu içerisinde üretilen anahtarlama işaretleri ilgili evirici anahtarlarına ($S_1 - S_8$) gönderilmektedir. Uygun anahtarlama stratejisi ile evirici çıkışı gerilimi elde edilmekte olup elde edilen evirici çıkış gerilimi filtreden geçirilerek filtre çıkışına bağlı olan yük ile buluşmaktadır.

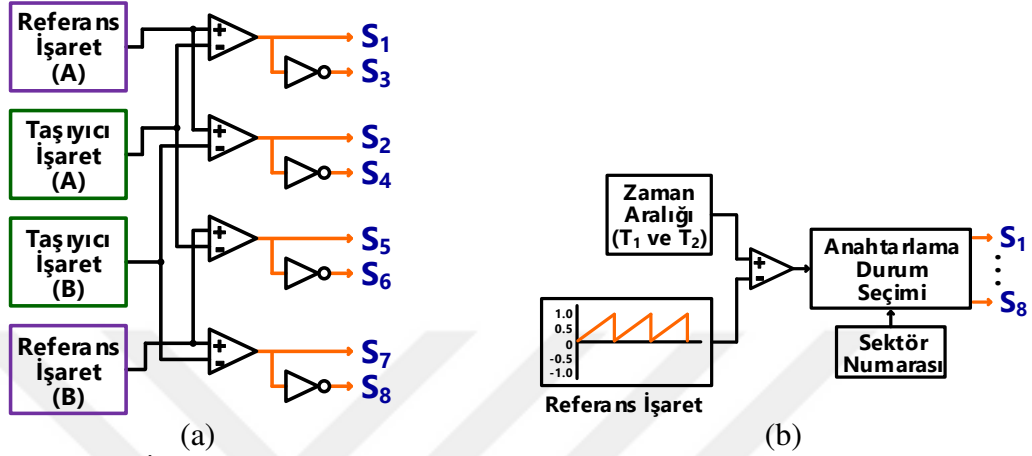


Şekil 2.2. Şebekeden bağımsız evirici sistemi temel devre blok diyagramı

2.2.1.1. İşaret Üretimi

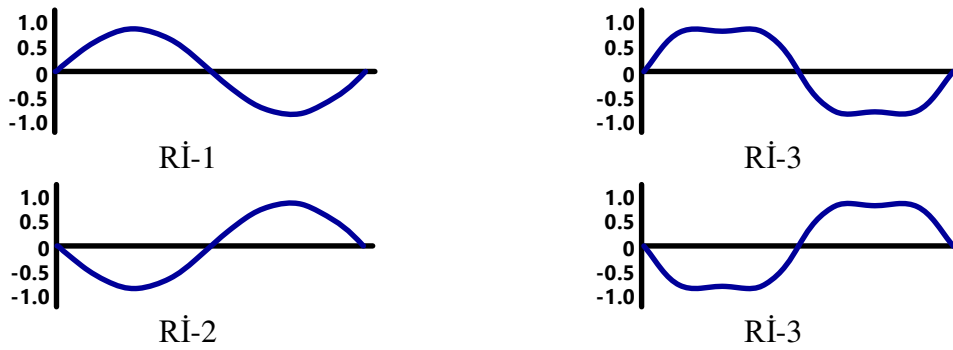
Şekil 2.2’de gösterilen şebeke bağlantısız tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici sisteminin temel devre blok diyagramı içerisinde var olan İşaret Üretim bloğu, evirici topolojisine bağlı oluşturulan anahtarlama stratejisi (hangi anahtarın hangi sıra ve sıklıkla ON-OFF durumunda olacağını ifadesi), Referans İşaret ve Taşıyıcı İşaret kullanılarak oluşturulmuştur.

Şekil 2.3'te benzetim çalışmasında kullanılan İşaret Üretim bloğu temel blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil 2.3.a, SDGM, UHE-DGM ve HDGM teknikleri için Şekil 2.3.b UV-DGM tekniği için anahtarlama işareti üretiminde kullanılmaktadır.

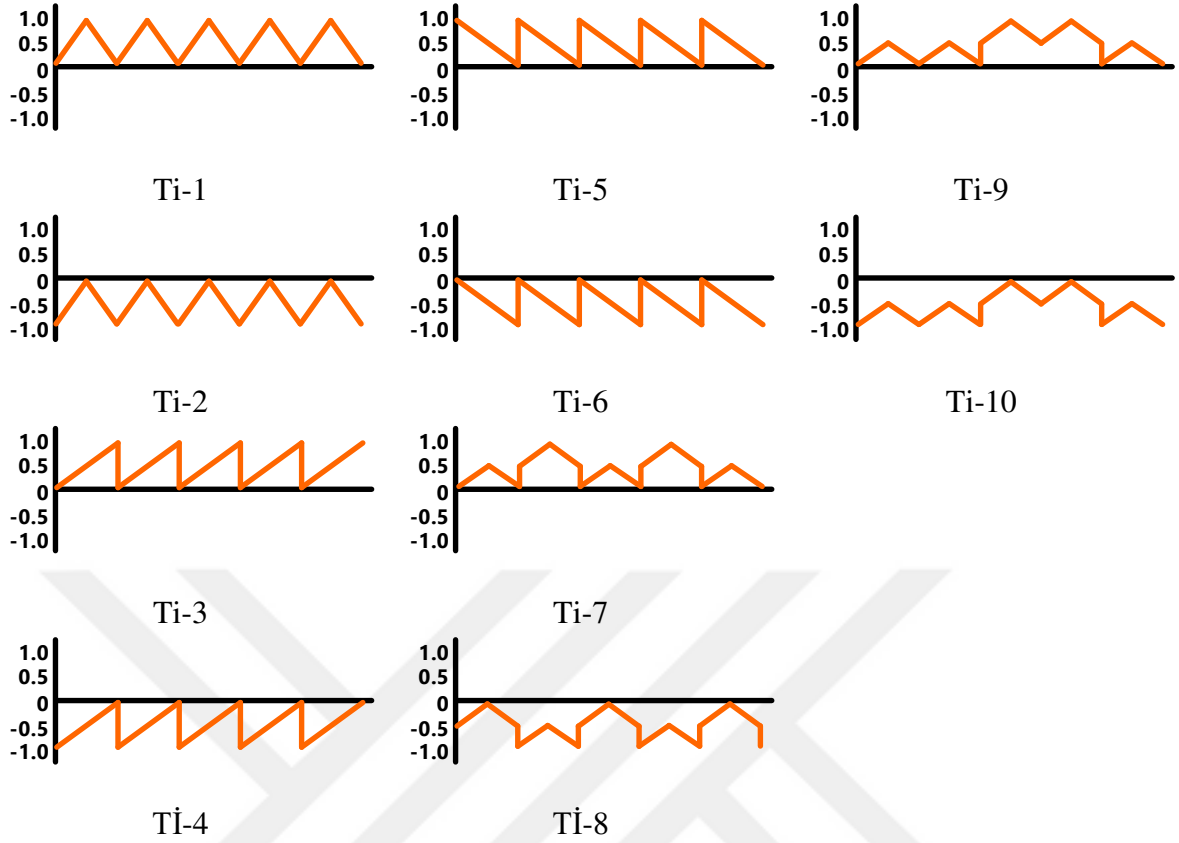


Şekil 2.3. İşaret üretim bloğu temel blok diyagramı

Şekil 2.3'te gösterilen İşaret Üretim bloğunda belirtilen Referans İşaret (Rİ) ve Taşıyıcı İşaret (Tİ) türleri/dalga şekilleri, uygulanacak olan modülasyon tekniğine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Referans İşaret ve Taşıyıcı İşaret türleri/dalga şekilleri sırasıyla Şekil 2.4. ve 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Referans İşaret (Rİ) türleri/dalga şekilleri



Şekil 2.5. Taşıyıcı İşaret (Tİ) türleri/dalga şekilleri

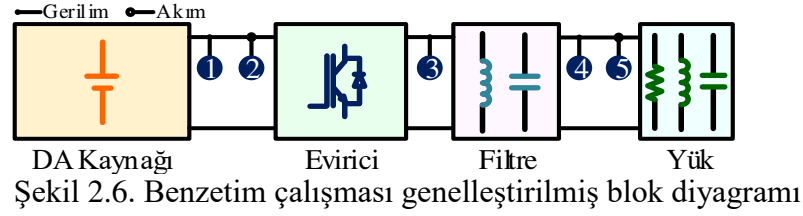
Benzetim çalışmasında kullanılacak olan SDGM, UHE-DGM ve HDGM teknikleri için Şekil 2.3'te gösterilen İşaret Üretim bloğunda kullanacak olan Taşıyıcı İşaret (Tİ) ve Referans İşaret (Rİ) tür/dalga şekil bilgileri Tablo 2.1'de özetlenmiştir.

Tablo 2.1. Durum, Modülasyon tekniği, Rİ ve Tİ tür matrisi

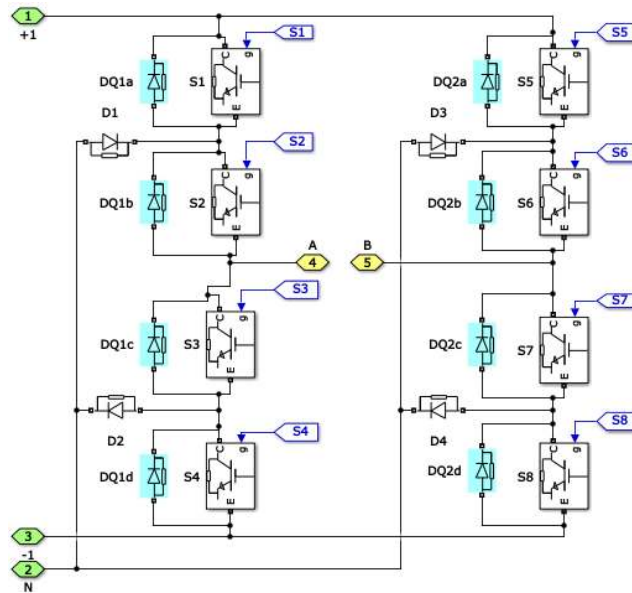
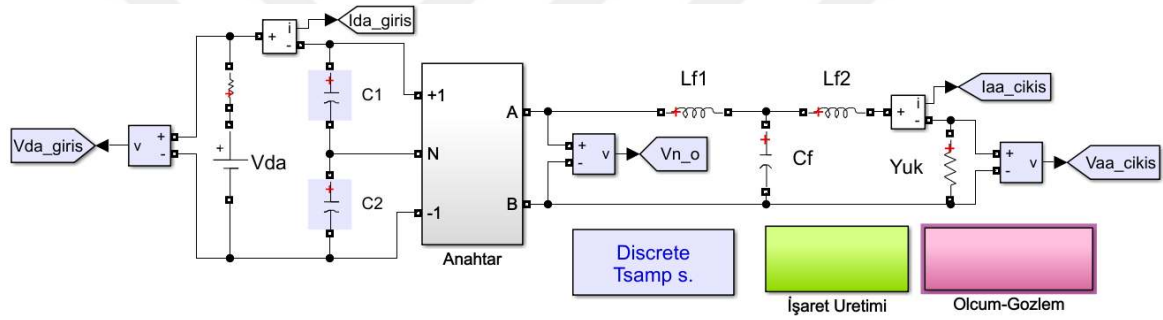
Durum	Modülasyon Tekniği	Referans İşaret (Rİ)		Taşıyıcı İşaret (Tİ)	
		A	B	A	B
I	SDGM	Rİ-1	Rİ-2	Tİ-3	Tİ-4
II	SDGM	Rİ-1	Rİ-2	Tİ-5	Tİ-6
III	SDGM	Rİ-1	Rİ-2	Tİ-1	Tİ-2
IV	UHE-DGM	Rİ-3	Rİ-4	Tİ-3	Tİ-4
V	UHE-DGM	Rİ-3	Rİ-4	Tİ-5	Tİ-6
VI	UHE-DGM	Rİ-3	Rİ-4	Tİ-1	Tİ-2
VIII-a	HDGM-I	Rİ-1	Rİ-2	Tİ-7	Tİ-8
VIII-b	HDGM-I	Rİ-1	Rİ-2	Tİ-9	Tİ-10

Şekil 2.6'da gösterilen benzetim çalışması gerçekleştirilecek sistemin geliştirilmiş blok diyagramı üzerinde işaretlenmiş noktalardan gerilim ve akım ile ilgili ölçümler ve bu

ölçümler ile ilişkili hesaplamalar yapılacaktır. Benzetim çalışmasında FV panel yerine DA kaynağı kullanılacaktır.

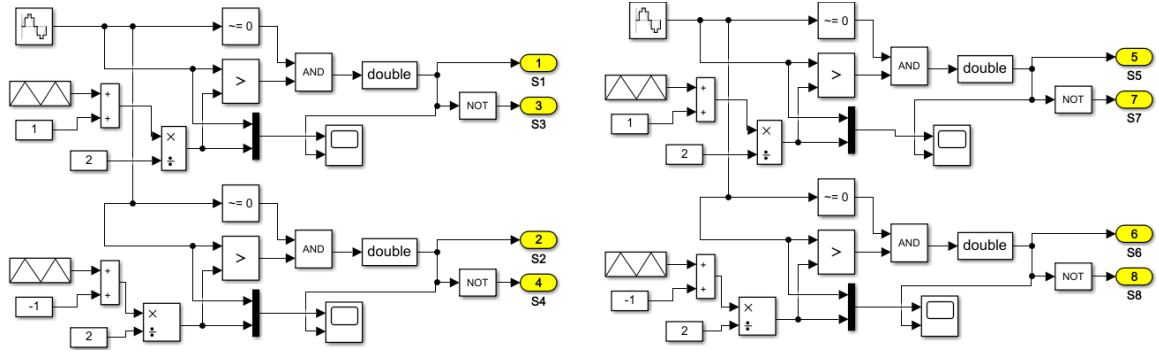


Şebekeden bağımsız evirici sisteminin benzetim programı ara yüzü blok diyagramları Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

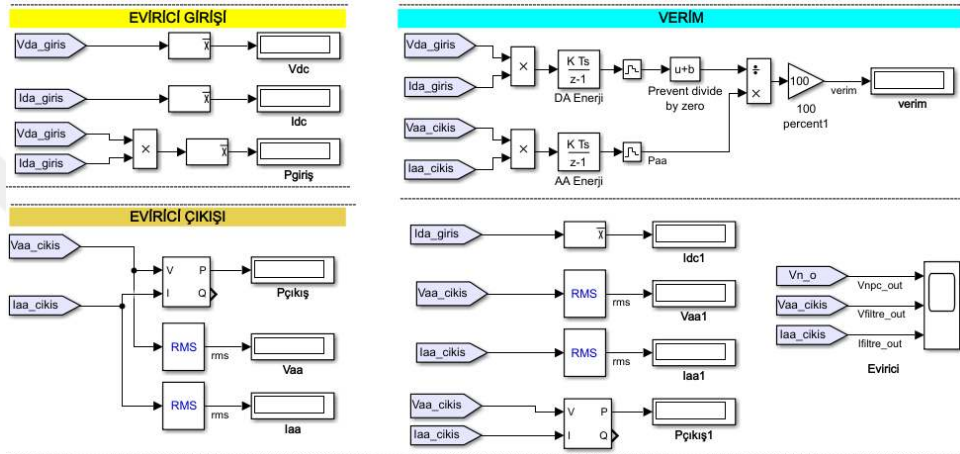


Şekil 2.7. Şebekeden bağımsız evirici sistemi benzetim ara yüzü

Şekil 2.7'nin devamı



(c) Örnek işaret üretim blok görünümü



(d) Örnek ölçüm-gözlem blok görünümü

2.2.1.1.1. Test-I

Evirici modülasyon tekniği ile çıkış gücü, THB ve verim arasındaki ilişki, bu bölümde yapılacak olan benzetim çalışmaları ile ortaya koyulacaktır. Uygulanacak modülasyon teknikleri ve taşıyıcı işaret türleri Tablo 2.2’de ve sistemin benzetimine ait parametre değerleri Tablo 2.3’te verilmiştir.

Bu çalışmada farklı modülasyon tekniklerinin sistem çıktıları üzerindeki etkileri gözlemlenecektir. Çıkış yük (R_y) değeri değiştirilerek sistem çıkış gücü ayarlanmakta ve Şekil 2.6’da gösterilen ölçüm noktalarından alınan akım ve gerilim bilgileri kullanılarak evirici giriş gücü ($P_{giriş}$) ve çıkış gücü ($P_{çıkış}$) ve bunlar ile ilişkili evirici temel verimi (η), Avrupa verimi (η_{Avrupa}), Kaliforniya verimi ($\eta_{Kaliforniya}$) ve çıkış akımına ait THB hesaplanacaktır. Evirici temel verimi (η), Avrupa verimi (η_{Avrupa}) ve Kaliforniya verimi ($\eta_{Kaliforniya}$) aşağıdaki verilen denklemlerdeki gibi tanımlanabilir [65]:

Tablo 2.2. Benzetim çalışması modülasyon teknikleri ve taşıyıcı işaret türleri

Modülasyon Tekniği	Taşıyıcı İşaret Türü	Durum
SDGM	Sağa yatık testere	I
	Sola yatık testere	II
	Üçgen	III
ÜHE-DGM	Sağa yatık testere	IV
	Sola yatık testere	V
	Üçgen	VI
UV-DGM		VII
HDGM-I		VIII-a
HDGM-II		VIII-b

Tablo 2.3. Sistem benzetim parametreleri

DA Kaynak		Evirici				Yük	
V_{da} (V)	400	Güç (kW)	4.0			R_y (Ω)	0-500
Filtre		C_1 (mF)	1.6	C_2 (mF)	1.6	Modülasyon Bilgisi	
L_f (mH)	3.0	Anahtar		Diyot		f_{sw} (kHz)	20
C_f (μ F)	2.2	R_{on} (m Ω)	1.0	R_{on} (m Ω)	1.0	m_{indeks}	0.9
		L_{on} (mH)	0.0	L_{on} (mH)	0.0		
		V_F (V)	1.45	V_f (V)	1.8		

$$\eta = 100 \times (P_{\text{çıkış}}/P_{\text{giriş}}) \quad (2.1)$$

$$\eta_{\text{Avrupa}} = 0.03\eta_{\%5} + 0.06\eta_{\%10} + 0.13\eta_{\%20} + 0.10\eta_{\%30} + 0.48\eta_{\%50} + 0.20\eta_{\%100} \quad (2.2)$$

$$\eta_{\text{Kaliforniya}} = 0.04\eta_{\%10} + 0.05\eta_{\%20} + 0.12\eta_{\%30} + 0.21\eta_{\%50} + 0.53\eta_{\%75} + 0.05\eta_{\%100} \quad (2.3)$$

Evirici giriş gerilimi ($V_{giriş}$), anahtarlama frekansı (f_{sw}) ve modülasyon indeksi (m_{indeks}) değeri sabit olması ve çıkış yükü ($R_{yük}$) değerinin değişken olması koşulu için benzetim çalışması yerine getirilmiş ve Tablo 2.4-2.12’de verilen sonuçlar gözlemlenmiştir.

Tablo 2.4. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-I)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.52341	249.22	0.8040	$\%5 \times P_{maks}$	4.83	95.706	309.980
400	1.0342	248.85	1.6095	$\%10 \times P_{maks}$	3.80	96.796	154.615
400	2.0556	248.69	3.2190	$\%20 \times P_{maks}$	2.77	97.317	77.2580
400	3.0768	248.60	4.8295	$\%30 \times P_{maks}$	2.30	97.478	51.4750
400	5.1188	248.33	8.0561	$\%50 \times P_{maks}$	1.85	97.585	30.8250
400	7.6705	247.80	12.109	$\%75 \times P_{maks}$	1.55	97.611	20.4645
400	8.1808	247.67	12.923	$\%80 \times P_{maks}$	1.50	97.610	19.1650
400	9.2011	247.38	14.555	$\%90 \times P_{maks}$	1.42	97.606	16.9960
400	10.221	247.05	16.194	$\%100 \times P_{maks}$	1.35	97.598	15.2560
$\eta_{Avrupa} = \%97.43835$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.54163$			

Tablo 2.5. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-II)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	5.2341	249.22	8.0400	$\%5 \times P_{maks}$	4.83	95.706	309.980
400	1.0342	248.85	1.6095	$\%10 \times P_{maks}$	3.80	96.796	154.615
400	2.0556	248.69	3.2190	$\%20 \times P_{maks}$	2.77	97.317	77.2580
400	3.0768	248.60	4.8295	$\%30 \times P_{maks}$	2.30	97.478	51.4750
400	5.1188	248.33	8.0561	$\%50 \times P_{maks}$	1.85	97.585	30.8250
400	7.6705	247.80	12.109	$\%75 \times P_{maks}$	1.55	97.611	20.4645
400	8.1808	247.67	12.923	$\%80 \times P_{maks}$	1.50	97.610	19.1650
400	9.2011	247.38	14.555	$\%90 \times P_{maks}$	1.42	97.606	16.9960
400	10.221	247.05	16.194	$\%100 \times P_{maks}$	1.35	97.598	15.2560
$\eta_{Avrupa} = \%97.43835$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.54163$			

Tablo 2.6. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-III)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.52394	249.95	0.80115	$\%5 \times P_{maks}$	4.40	95.547	311.990
400	1.0346	249.70	1.6031	$\%10 \times P_{maks}$	3.31	96.720	155.765
400	2.0563	249.58	3.2069	$\%20 \times P_{maks}$	2.46	97.302	77.8260
400	3.0782	249.46	4.8122	$\%30 \times P_{maks}$	2.10	97.493	51.8400
400	5.1220	249.14	8.0296	$\%50 \times P_{maks}$	1.74	97.640	31.0280
400	7.6776	248.54	12.073	$\%75 \times P_{maks}$	1.51	97.704	20.5875
400	8.1889	248.40	12.558	$\%80 \times P_{maks}$	1.48	97.711	19.2780
400	9.2114	248.07	14.514	$\%90 \times P_{maks}$	1.42	97.721	17.0916
400	10.234	247.71	16.150	$\%100 \times P_{maks}$	1.37	97.727	15.3376
$\eta_{Avrupa} = \%97.48077$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.60693$			

Tablo 2.7. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-IV)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.53782	291.33	0.70688	$\%5 \times P_{maks}$	17.28	95.748	412.140
400	1.0615	291.04	1.4143	$\%10 \times P_{maks}$	17.06	96.940	205.785
400	2.1087	290.90	2.8285	$\%20 \times P_{maks}$	16.93	97.520	102.847
400	3.1557	290.83	4.2429	$\%30 \times P_{maks}$	16.86	97.703	68.545
400	5.2484	290.63	7.0739	$\%50 \times P_{maks}$	16.75	97.833	41.0850
400	7.8602	290.23	10.619	$\%75 \times P_{maks}$	16.56	97.877	27.3310
400	8.3821	290.13	11.330	$\%80 \times P_{maks}$	16.52	97.880	25.6080
400	9.4248	289.91	12.752	$\%90 \times P_{maks}$	16.43	97.883	22.7345
400	10.467	289.66	14.177	$\%100 \times P_{maks}$	16.33	97.882	20.4320
$\eta_{Avrupa} = \%97.67298$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.79180$			

Tablo 2.8. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-V)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.53782	291.33	0.70688	$\%5 \times P_{maks}$	17.28	95.748	412.140
400	1.0615	291.04	1.4143	$\%10 \times P_{maks}$	17.06	96.940	205.785
400	2.1087	290.90	2.8285	$\%20 \times P_{maks}$	16.93	97.520	102.847
400	3.1557	290.83	4.2429	$\%30 \times P_{maks}$	16.86	97.703	68.545
400	5.2484	290.63	7.0739	$\%50 \times P_{maks}$	16.75	97.833	41.0850
400	7.8602	290.23	10.619	$\%75 \times P_{maks}$	16.56	97.877	27.3310
400	8.3821	290.13	11.330	$\%80 \times P_{maks}$	16.52	97.880	25.6080
400	9.4248	289.91	12.752	$\%90 \times P_{maks}$	16.43	97.883	22.7345
400	10.467	289.66	14.177	$\%100 \times P_{maks}$	16.33	97.882	20.4320
$\eta_{Avrupa} = \%97.67298$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.79180$			

Tablo 2.9. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.53780	294.18	0.69883	$\%5 \times P_{maks}$	16.56	95.558	420.970
400	1.0602	293.87	1.3979	$\%10 \times P_{maks}$	16.27	96.859	210.230
400	2.1057	293.73	2.7960	$\%20 \times P_{maks}$	16.12	97.500	105.053
400	3.1512	293.62	4.1946	$\%30 \times P_{maks}$	16.05	97.711	70.0000
400	5.2418	293.36	6.9953	$\%50 \times P_{maks}$	15.94	97.874	41.9360
400	7.8528	292.88	10.505	$\%75 \times P_{maks}$	15.77	97.950	27.8815
400	8.3746	292.76	11.208	$\%80 \times P_{maks}$	15.73	97.958	26.1215
400	9.4179	292.51	12.617	$\%90 \times P_{maks}$	15.65	97.972	23.1850
400	10.460	292.23	14.028	$\%100 \times P_{maks}$	15.56	97.981	20.8325
$\eta_{Avrupa} = \%97.7001$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.84077$			

Tablo 2.10. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.52172	249.39	0.80248	$\%5 \times P_{maks}$	2.66	95.955	310.780
400	1.0325	249.16	1.6063	$\%10 \times P_{maks}$	2.26	96.948	155.115
400	2.0542	249.02	3.2136	$\%20 \times P_{maks}$	1.81	97.429	77.4900
400	3.0761	248.93	4.8220	$\%30 \times P_{maks}$	1.59	97.585	51.6230
400	5.1202	248.67	8.0442	$\%50 \times P_{maks}$	1.38	97.702	30.9130
400	7.6763	248.20	12.089	$\%75 \times P_{maks}$	1.24	97.749	20.5310
400	8.1878	248.08	12.901	$\%80 \times P_{maks}$	1.22	97.753	19.2295
400	9.2106	247.83	14.528	$\%90 \times P_{maks}$	1.19	97.759	17.0585
400	10.234	247.55	16.161	$\%100 \times P_{maks}$	1.16	97.761	15.3180
$\eta_{Avrupa} = \%97.56896$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.67201$			

Tablo 2.11. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a)

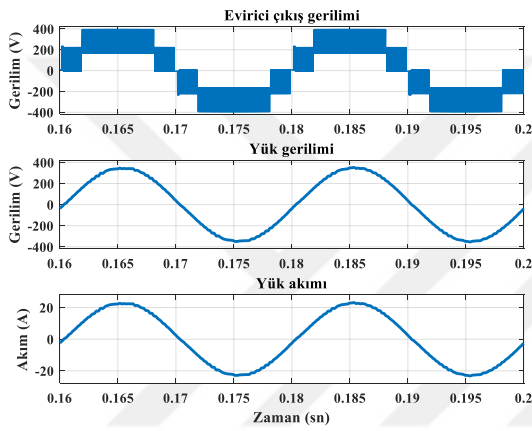
$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.52513	250.44	0.79913	$\%5 \times P_{maks}$	2.54	95.283	313.395
400	1.0346	249.62	1.6031	$\%10 \times P_{maks}$	2.10	96.698	155.710
400	2.0560	249.17	3.2116	$\%20 \times P_{maks}$	1.77	97.307	77.5860
400	3.0779	249.06	4.8194	$\%30 \times P_{maks}$	1.54	97.496	51.6775
400	5.1219	248.74	8.0420	$\%50 \times P_{maks}$	1.32	97.641	30.9305
400	7.6774	248.15	12.091	$\%75 \times P_{maks}$	1.16	97.705	20.5230
400	8.1886	248.00	12.905	$\%80 \times P_{maks}$	1.13	97.712	19.2175
400	9.2113	247.68	14.537	$\%90 \times P_{maks}$	1.09	97.721	17.0375
400	10.234	247.32	16.176	$\%100 \times P_{maks}$	1.05	97.727	15.2895
$\eta_{Avrupa} = \%97.47296$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.60740$			

Tablo 2.12. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b)

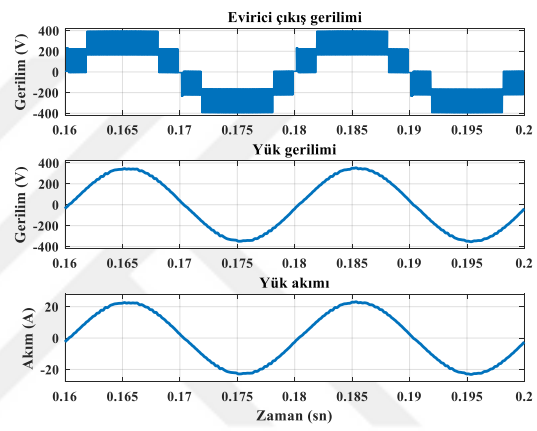
$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)	$R_{yük}$ (Ω)
400	0.52257	249.69	0.80194	$\%5 \times P_{maks}$	3.49	95.796	311.365
400	1.0333	249.40	1.6051	$\%10 \times P_{maks}$	2.88	96.857	155.384
400	2.0550	249.25	3.2112	$\%20 \times P_{maks}$	2.27	97.373	77.6190
400	3.0767	249.13	4.8183	$\%30 \times P_{maks}$	1.91	97.540	51.7050
400	5.1205	248.81	8.0399	$\%50 \times P_{maks}$	1.53	97.668	30.9470
400	7.6762	248.21	12.088	$\%75 \times P_{maks}$	1.27	97.723	20.5330
400	8.1873	248.07	12.902	$\%80 \times P_{maks}$	1.24	97.728	19.2275
400	9.2098	247.74	14.533	$\%90 \times P_{maks}$	1.18	97.736	17.0470
400	10.233	247.38	16.172	$\%100 \times P_{maks}$	1.13	97.740	15.2972
$\eta_{Avrupa} = \%97.52643$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.63820$			

Modülasyon tekniği SDGM ve işaret türü Sağa Yatık Testere ve Sola Yatık Testere olan Durum-I ve II'ye ait Tablo 2.4 ve 2.5'te verilen sonuçlarda bir farklılık gözlemlenmemiştir. Yine modülasyon tekniği ÜHE-DGM ve işaret türü Sağa Yatık Testere ve Sola Yatık Testere olan Durum- IV ve V'ye ait Tablo 2.7 ve 2.8'de verilen sonuçlarda aynıdır.

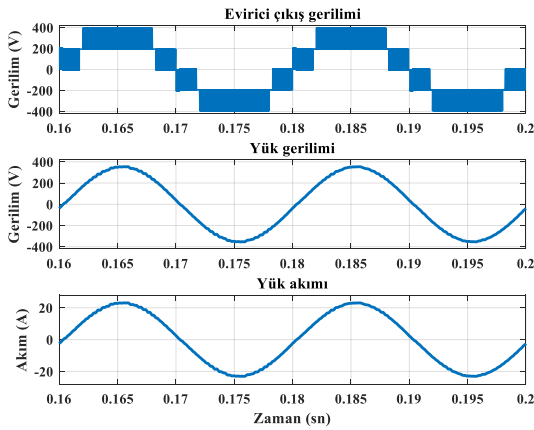
Durum-I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII-a ve VIII-b için evirici çıkış gücünün ($P_{çıkış}$) maksimum değerinde evirici çıkış gerilimi, yük akımı ve gerilim dalga şekilleri Şekil 2.8-2.16'da gösterilmiştir.



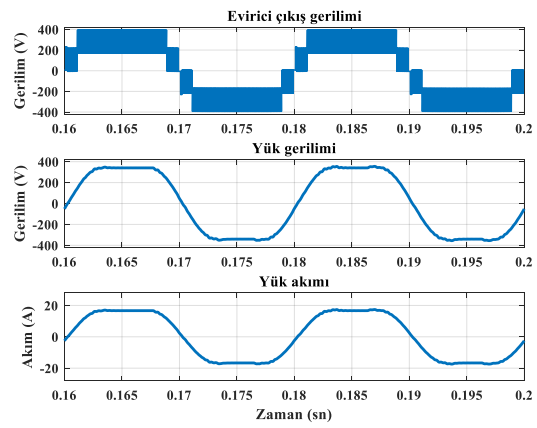
Şekil 2.8. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-I)



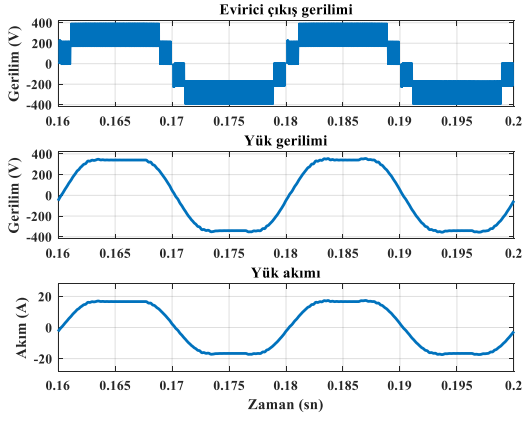
Şekil 2.9. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-II)



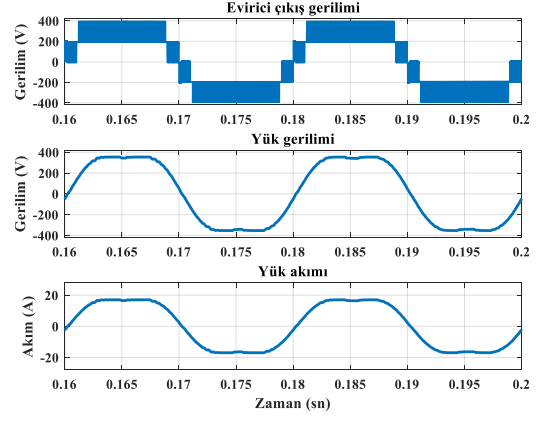
Şekil 2.10. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-III)



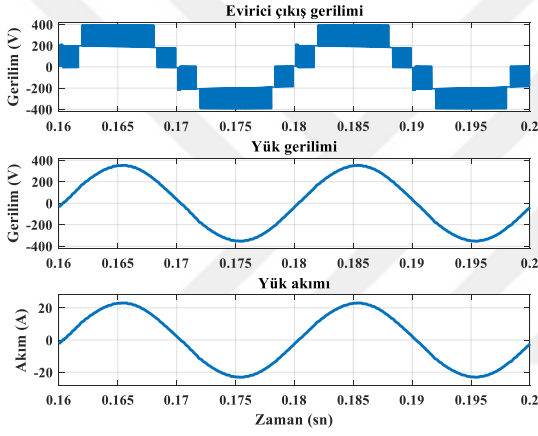
Şekil 2.11. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-IV)



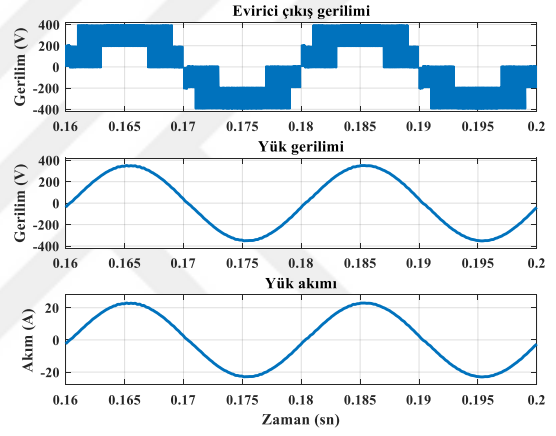
Şekil 2.12. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-V)



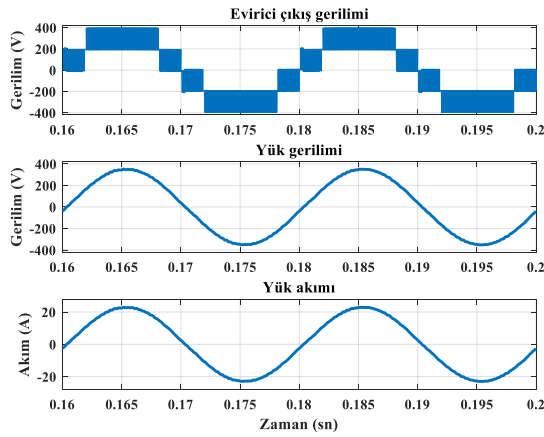
Şekil 2.13. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-VI)



Şekil 2.14. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-VII)



Şekil 2.15. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-VIII-a)

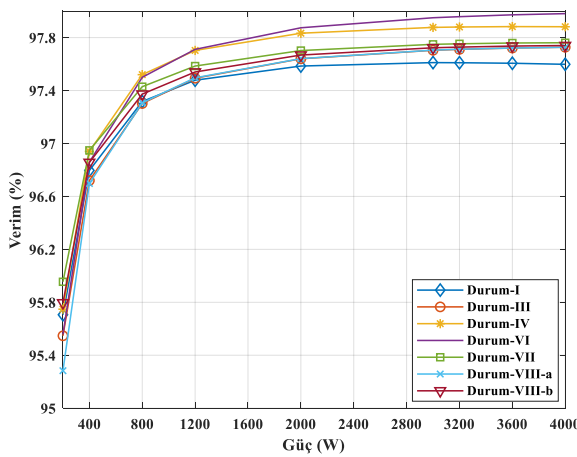


Şekil 2.16. Gerilim-akım dalga şekli
(Durum-VIII-b)

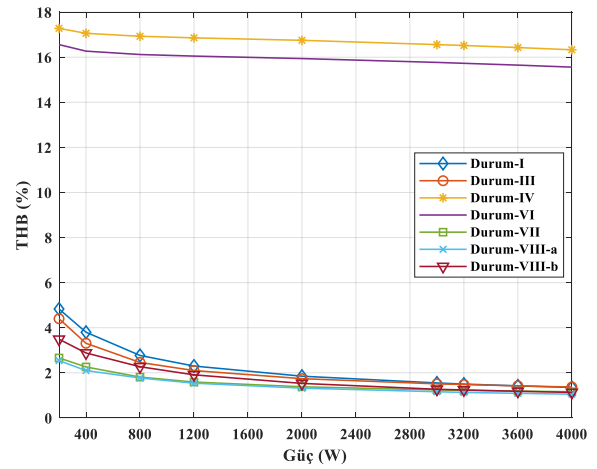
$t = 0.16 - 0.17$ ms zaman aralığında Şekil 2.8-2.16'da gösterilen evirici çıkış gerilimi dalga şekillerine göz atıldığında gerilimin $[0 - V_{da}/2 - V_{da} - V_{da}/2 - 0]$ sınır değer bölgelerine sahip olduğu gözlemlenmektedir: Sırasıyla Şekil 2.8, 2.9, 2.10, 2.14 ve 2.16'da gösterilen Durum-I, II, III, VII ve VIII-b için $[V_{da}/2 - V_{da} - V_{da}/2]$ değer bölgesine ait zaman dilimi, Şekil 2.11, 2.12, 2.13 ve 2.15'de gösterilen Durum-IV, V, VI ve VIII-a'ya göre daha dardır.

Şekil 2.8-2.16'da görüldüğü üzere yük tipinin direnç olması sebebiyle yük gerilimi ve akımın dalga şekilleri biçimsel olarak aynı ve aralarında her hangi bir faz farkı yoktur. Modülasyon tekniği ÜHE-DGM ve farklı taşıyıcı işaretlerin kullanıldığı ve sırasıyla Şekil 2.11- 2.13'de gösterilen Durum-IV, V ve VI için yük gerilimi ve akımı dalga formu saf sinüzoidalın uzağındadır. Bunun yanında SDGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerini kullanıldığı Şekil 2.8-2.10, 2.14-2.16 gösterilen Durum-I, II, III, VII, VIII-a ve VIII-b için yük gerilimi ve akımı dalga formu saf sinüzoidal dalga formuna yakındır.

Üç fazlı çok seviyeli evirici uygulamalarında modülasyon tekniği olarak ÜHE-DGM'ne başvurulduğunda eviricinin tüm fazlarındaki üçüncü harmonik bileşenleri aynı fazda olduğu ve fazlara ait üçüncü harmonik bileşenleri biri birinin etkisini yok ettiği gözlemlenmektedir. Bu çalışmada ele alınan evirici topolojisinin bir fazlı olması sebebiyle Şekil 2.11-2.13'de de görüldüğü üzere üçüncü harmonik çıkış akım ve geriliminde gözlemlenmektedir. Benzetim çalışması yapılan durumlara bağlı güç ile verim arasındaki değişim ve THB ile verim arasındaki değişim sırasıyla Şekil 2.17 ve 2.18'de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. Verim-güç



Şekil 2.18. THB-güç

Durum- I ve II'ye ait Tablo 2.4 ve 2.5'te verilen sonuçların ve Durum- IV ve V'ye ait Tablo 2.7 ve 2.8'de verilen sonuçların aynı olması sebebiyle Şekil 2.17 ve 2.18'de Durum-II ve V sonuçları çizdirilmemiştir.

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli (DK) eviricide farklı modülasyon teknikleri kullanılarak çıkış gücüne bağlı olarak verim değişimi tüm modülasyon tekniği ve taşıyıcı işaret türü durumları için Şekil 2.17'de gösterildiği gibi benzer karakteristiği sergilediği gözlemlenmiştir. Evirici çıkış gücünün artışı ile verimin arttığı (Şekil 2.17) ve THB'nin azaldığı (Şekil 2.18) ve ÜHE-DGM tekniğinin kullanıldığı Durum-IV ve VI için THB'nin fark edilebilir şekilde yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir.

SDGM, ÜHE-DGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin farklı durumları için benzetim karşılaştırılması Tablo 2.13'te özetlenmiştir.

Tablo 2.13. SDGM, ÜHE-DGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin farklı durumları için benzetim karşılaştırılması

	Durum								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII-a	VIII-b
	SDGM			ÜHE-DGM			UV-DGM	HDGM	
$THB_{I_{çıkış}}^*$	1.35	1.35	1.37	16.33	16.33	15.56	1.16	1.05	1.13
η^*	97.598	97.598	97.727	97.882	97.882	97.981	97.761	97.727	97.740
$V_{çıkış}^* (V_{rms})$	247.05	247.05	247.71	289.66	289.66	292.23	247.55	247.32	247.38
η_{Avrupa}	97.43835	97.43835	97.48077	97.67298	97.67298	97.7001	97.56896	97.47296	97.52643
$\eta_{Kaliforniya}$	97.54163	97.54163	97.60693	97.79180	97.79180	97.84077	97.67201	97.60740	97.63820

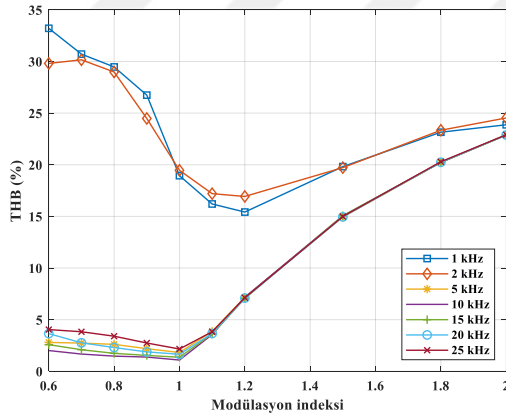
Not: *: $P_{çıkış} = P_{maks}$ durumu için, η (her türü) ve THB değeri %'lidir.

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü DK evirici sisteminde SDGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin kullanımı (Durum I-III, VII, VIII-a ve VIII-b) ile yük akımı THB değeri Tablo 2.13'te belirtildiği üzere standartlarda [66] belirtilen %5 sınır değerinin altında kalarak istenen koşul sağlanmaktadır. Sistemde ÜHE-DGM tekniğinin uygulandığı durumlarda (Durum IV, V ve VI) ise THB standart sınır değerinin çok üzerinde kaldığı gözlemlenmiştir. En düşük 3 yük akımı THB değerini sırasıyla Durum VIII-a, VIII-b ve Durum-VII'i içeren HDGM ve UV-DGM tekniklerinin kullanımı ile elde edilmiştir. En yüksek THB değeri ise eviricide modülasyon tekniği olarak ÜHE-DGM kullanılması (Durum-IV, V ve VI) sonucu gözlemlenmiştir. Evirici Geleneksel (η^*), Avrupa ve Kaliforniya verimleri (η_{Avrupa} ve $\eta_{Kaliforniya}$) açısından modülasyon tekniği ÜHE-DGM

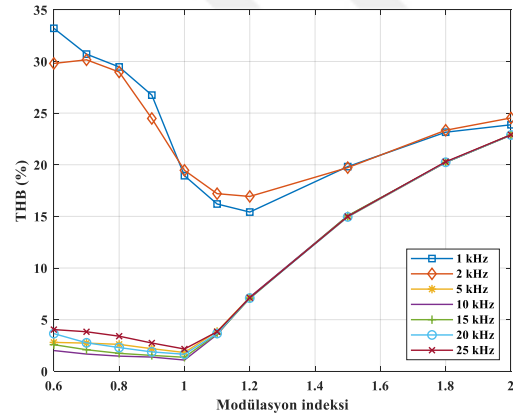
ve işaret türü olarak Üçgen kullanılan Durum-VI'nın daha iyi performans sergilediği Tablo 2.13'te görülmektedir. Evirici çıkış gerilimi ($V_{çıkış}^*$ (V_{rms})) olarak en yüksek ve düşük değeri sırasıyla Durum-VI ve I-II'de gözlemlenmiştir.

2.2.1.1.2. Test-II

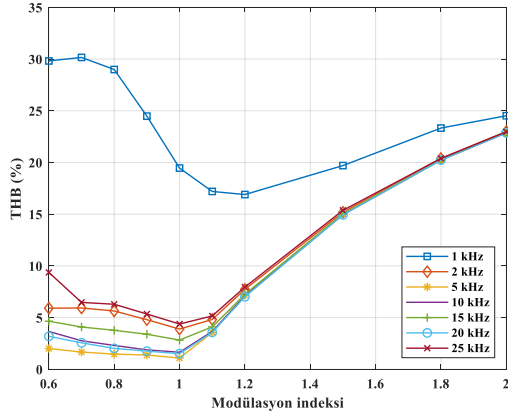
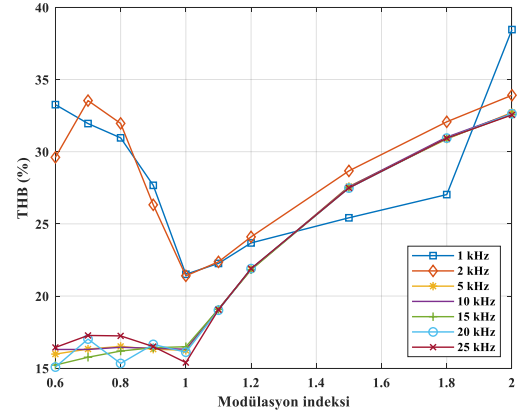
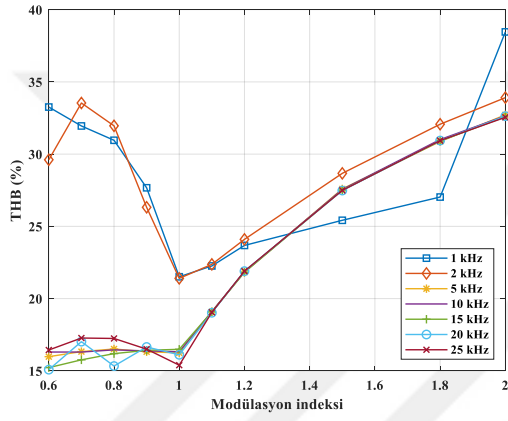
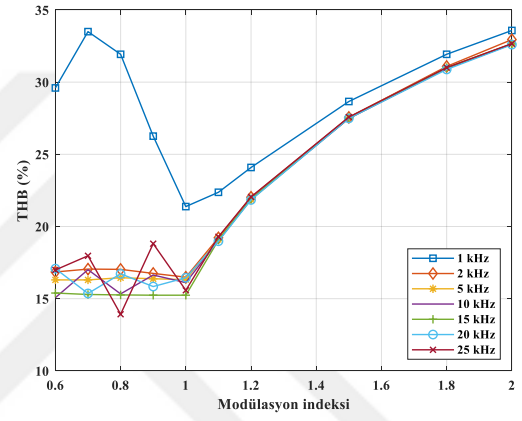
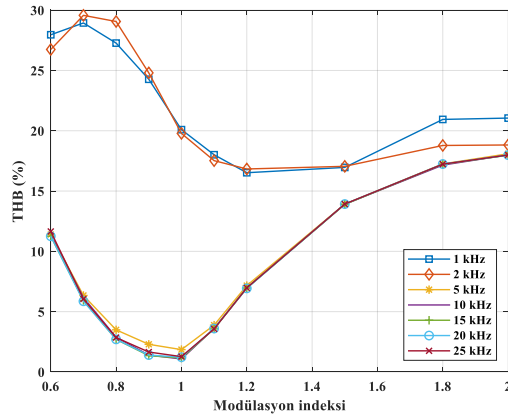
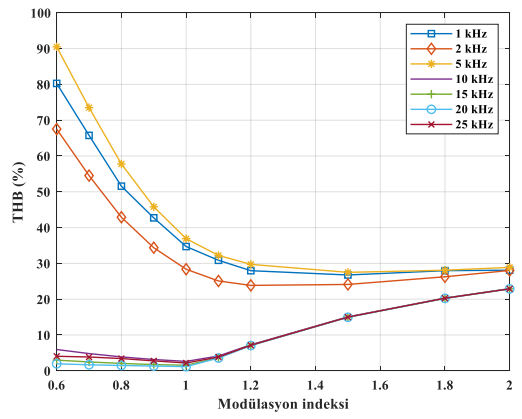
Evirici modülasyon tekniği ile modülasyon indeksi, anahtarlama frekansı, THB, evirici çıkış gerilimi arasındaki ilişki, bu bölümde yapılacak olan benzetim çalışmaları ile ortaya koyulacaktır. Tablo 2.2'de belirtilen modülasyon teknikleri ve taşıyıcı işaret türleri göz önünde bulundurularak evirici çıkış yükü sabit ($R_{yük} = 32 \Omega$), farklı anahtarlama frekanslarında (f_{sw}) modülasyon indeksi (m_{indeks}) değerinin değişken olması koşulu için benzetim çalışması yerine getirilmiştir. Bu test ile ilgili elde edilen tüm sayısal sonuçlar tablo halinde ve evirici çıkış gerilimi, yük akımı ve gerilim dalga şekilleri Ek-1'de verilmiştir. Burada elde edilen sonuçlardan bir kısmı gösterilecektir. Belirli modülasyon tekniğinde anahtarlama frekansına (f_{sw}) bağlı olarak modülasyon indeksi (m_{indeks}) ile THB arasındaki ilişki Şekil 2.19-2.27'de gösterilmiştir.

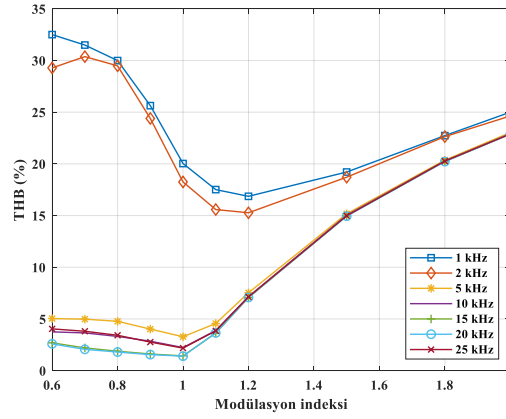


Şekil 2.19. THB- m_{indeks} (Durum-I)



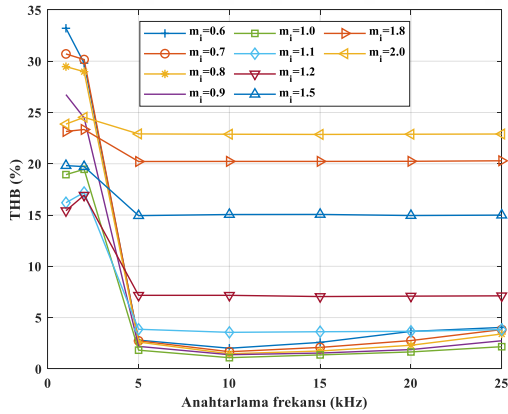
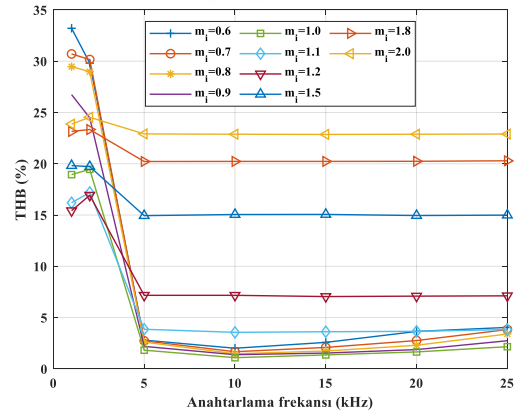
Şekil 2.20. THB- m_{indeks} (Durum-II)

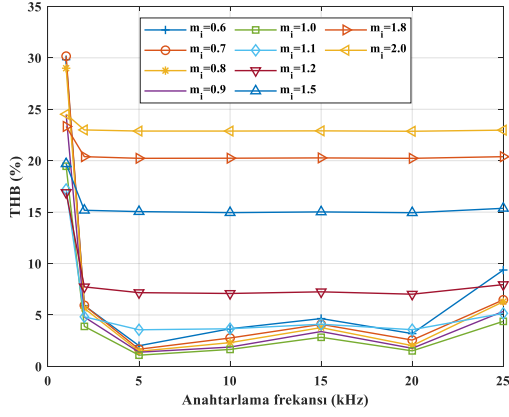
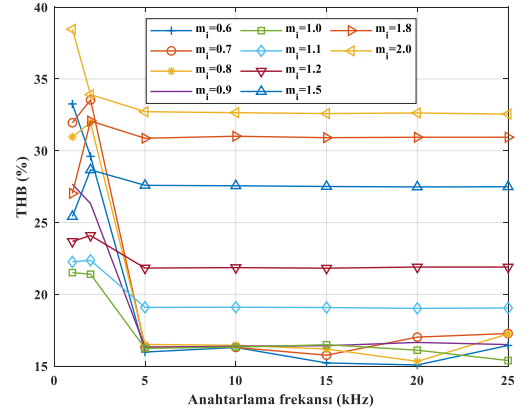
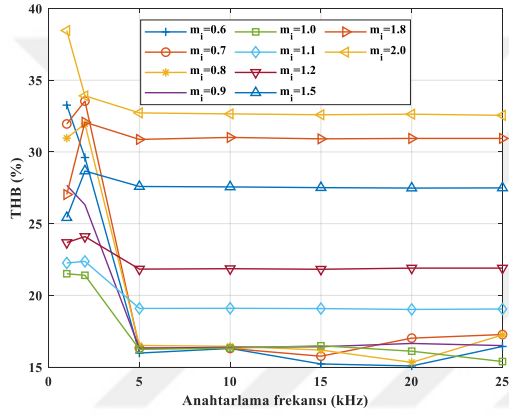
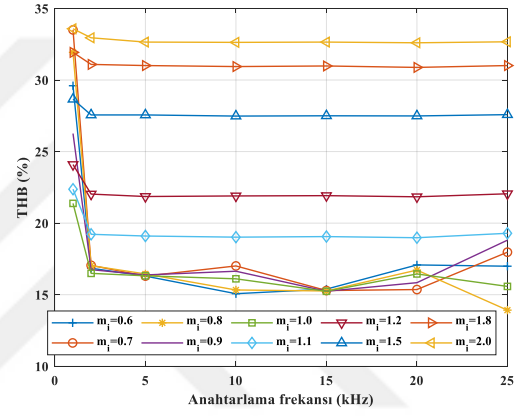
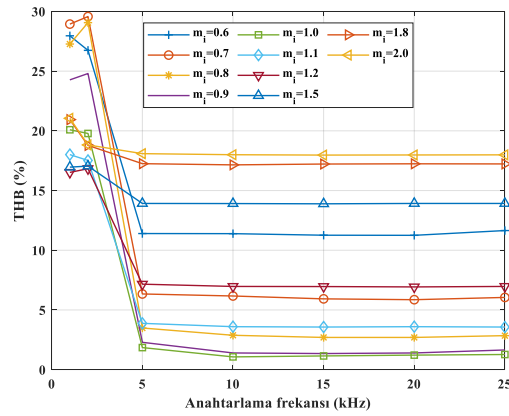
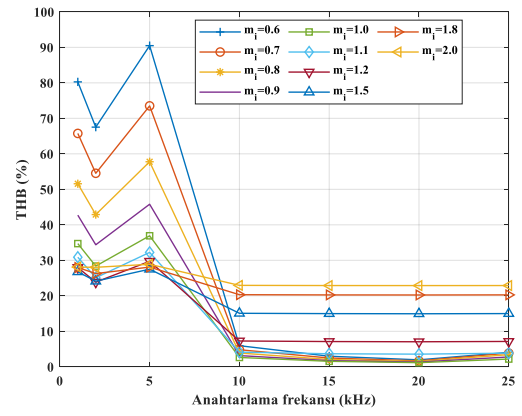
Şekil 2.21. THB- m_{indeks} (Durum-III)Şekil 2.22. THB- m_{indeks} (Durum-IV)Şekil 2.23. THB- m_{indeks} (Durum-V)Şekil 2.24. THB- m_{indeks} (Durum-VI)Şekil 2.25. THB- m_{indeks} (Durum-VII)Şekil 2.26. THB- m_{indeks} (Durum-VIII-a)

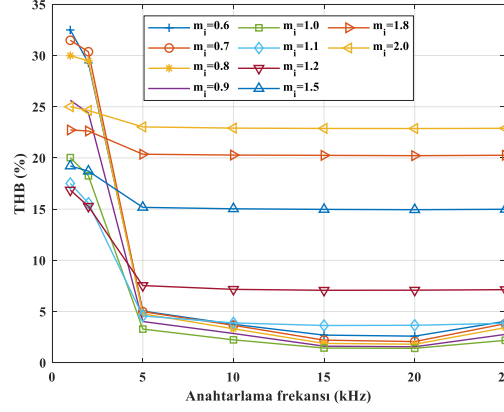
Şekil 2.27. THB- m_{indeks} (Durum-VIII-b)

Şekil 2.19-2.27'de görüldüğü üzere doğrusal modülasyon aralığında ($m_{indeks} < 1$), modülasyon indeksi değeri arttıkça THB değerinin düştüğü ve aşırı modülasyon aralığında ($m_{indeks} > 1$) ise modülasyon indeksi değeri arttıkça THB değeri arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca anahtarlama frekansı arttıkça THB değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Belirli modülasyon tekniğinde modülasyon indeksine (m_{indeks}) bağlı olarak anahtarlama frekansına (f_{sw}) ile THB arasındaki ilişki Şekil 2.28-2.36'da gösterilmiştir.

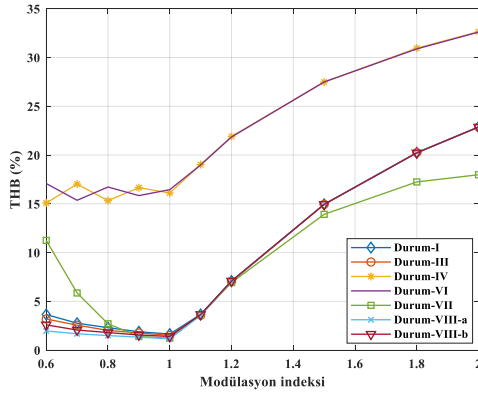
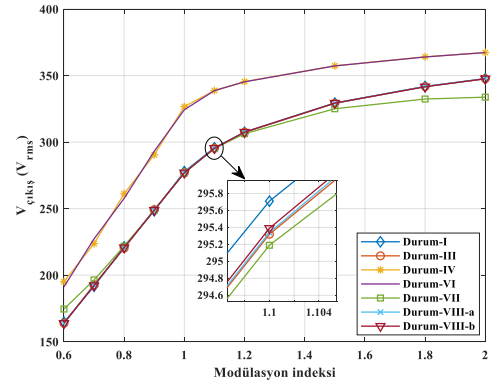
Şekil 2.28. THB- f_{sw} (Durum-I)Şekil 2.29. THB- f_{sw} (Durum-II)

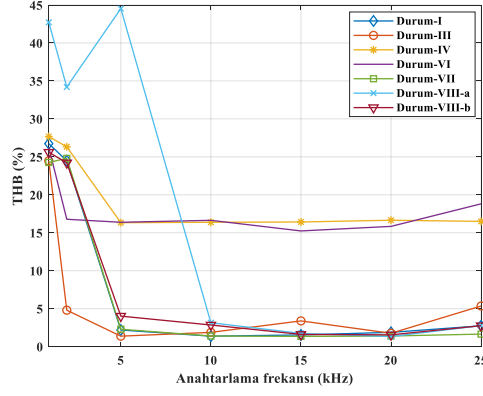
Şekil 2.30. THB- f_{SW} (Durum-III)Şekil 2.31. THB- f_{SW} (Durum-IV)Şekil 2.32. THB- f_{SW} (Durum-V)Şekil 2.33. THB- f_{SW} (Durum-VI)Şekil 2.34. THB- f_{SW} (Durum-VII)Şekil 2.35. THB- f_{SW} (Durum-VIII-a)

Şekil 2.36. THB- f_{sw} (Durum-VIII-b)

Şekil 2.28-2.36'da gözlemlendiği üzere genel itibariyle anahtarlama frekansı arttıkça THB değerinin düştüğü ve anahtarlama frekansının belirli bir değer ($f_{sw} < 1$) ve aşırı modülasyon değer ($m_{indeks} > 1$) aralıklarında modülasyon indeksi değeri arttıkça THB değerinin fark edilebilecek seviyede değişim göstermediği tespit edilmiştir.

Belirli anahtarlama frekansında (f_{sw}) modülasyon tekniğine bağlı olarak modülasyon indeksi (m_{indeks}) ile THB arasındaki ilişki ve modülasyon indeksi (m_{indeks}) ile evirici çıkış gerilimi ($V_{çıkış}$) arasındaki ilişki ve belirli olarak modülasyon indeksi (m_{indeks}) değerinde modülasyon tekniğine bağlı olarak anahtarlama frekansı (f_{sw}) ile THB arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 2.37- 2.39'da gösterilmiştir.

Şekil 2.37. THB- m_{indeks} ($f_{sw} = 20$ kHz)Şekil 2.38. $V_{çıkış}$ - m_{indeks} ($f_{sw} = 20$ kHz)



Şekil 2.39. THB- f_{sw} ($m_{indeks} = 0.9$)

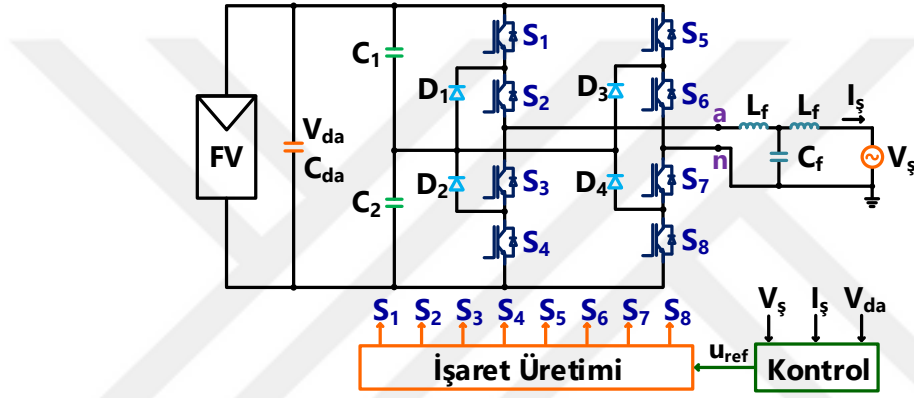
Şekil 2.37’de görüldüğü üzere modülasyon tekniği olarak SDGM, UV-DGM ve HDGM kullanılan Durum-I, II, III, VII, VIII-a ve VIII-b için doğrusal modülasyon aralığında ($m_{indeks} < 1$), modülasyon indeksi değeri arttıkça THB değerinin düştüğü ve aşırı modülasyon aralığında ($m_{indeks} > 1$) ise modülasyon indeksi değeri arttıkça THB değerinin arttığı tespit edilmiştir. ÜHE-DGM tekniğini barındıran Durum- IV, V ve VI için doğrusal modülasyon aralığında ($m_{indeks} < 1$), modülasyon indeksi değeri arttıkça THB değeri artıp-azalma veya azalma-artma karakteristiği gösterdiği ve aşırı modülasyon aralığında ($m_{indeks} > 1$) ise modülasyon indeksi değeri arttıkça THB değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü DK evirici sisteminin temel anahtarlama frekansında ($f_{sw} = 20 \text{ kHz}$) modülasyon indeksi (m_{indeks}) değeri arttıkça evirici çıkış nominal gerilim ($V_{çıkış}$) değerinin arttığı Şekil 2.38’de görülmektedir. Şekil 2.39’da görüldüğü üzere sabit bir modülasyon indeksi değeri ($m_{indeks} = 0.9$) için anahtarlama frekansı (f_{sw}) arttıkça genel itibariyle THB değerinin düşme eğiliminde olduğu, evirici sisteminin temel anahtarlama frekansı ($f_{sw} = 20 \text{ kHz}$) değerinden büyük anahtarlama frekanslarında ise THB değeri artış yönünde eğilim gösterdiği gözlemlenmiştir.

2.2.2. Şebeke Bağlantılı Evirici

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli eviricinin şebeke bağlantılı olarak çalışma durumları bu bölümde ele alınacaktır. Evirici modülasyon tekniği ile THB ve verim arasındaki ilişki irdelenecektir.

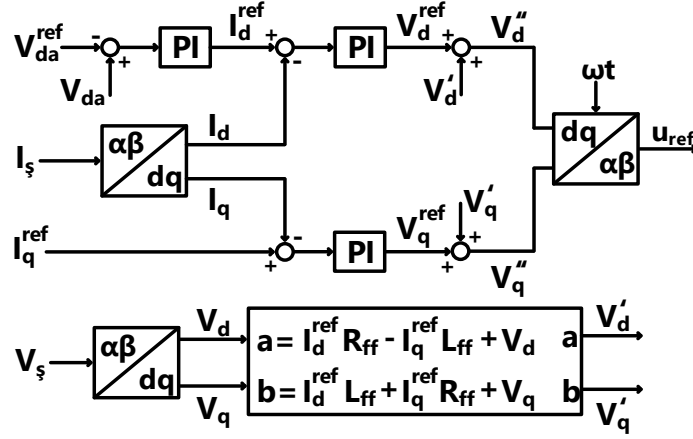
Benzetim çalışması gerçekleştirilecek olan şebeke bağlantılı tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici sisteminin genel blok diyagramı Şekil 2.40'da gösterilmiştir. Şebeke gerilimi (V_s) ve akımı (I_s) ve FV panel çıkış gerilim (V_{da}) bilgisi Kontrol bloğu içerisinde kullanılarak çıkışında Referans İşareti (u_{ref}) üretilir. İşaret Üretim bloğu içerisinde Referans İşareti (u_{ref}) kullanılarak blok içerisinde üretilen anahtarlama işaretleri ilgili evirici anahtarlarına ($S_1 - S_8$) gönderilmektedir. Uygun anahtarlama stratejisi ile evirici çıkışı gerilimi elde edilir ve filtre aracılığıyla şebeke terminali ile bağlantısı sağlanmış olur.



Şekil 2.40. Şebeke bağlantılı evirici sistemi temel devre blok diyagramı

2.2.2.1. Kontrol Yapısı

Şekil 2.40'da gösterilen şebeke bağlantılı evirici sistemi yapısının alt bileşenlerinden biri olan Kontrol bloğunun temel blok diyagramı Şekil 2.41'de gösterilmiştir. Evirici kontrol yapısında şebeke gerilimi (V_s) ve akımı (I_s) ve FV panel çıkış gerilim (V_{da}) bilgileri girdi olarak kullanılmakta olup Kontrol bloğu çıktı olarak modülasyon tekniğine bağlı olarak anahtarlama işaretlerinin oluşturulması için gerekli olan Referans İşareti (u_{ref}) dalga şeklini üretmektedir.



Şekil 2.41. Kontrol bloğu temel blok diyagramı

Kontrol sistemi kaskad bir yapıya sahip olup bu yapı akım (iç) kontrol ve gerilim (dış) kontrol çevrimlerini bünyesinde barındırmaktadır. Şebeke gerilimi (V_s) ve akım (I_s) vektörleri Clarke dönüşümü uygulanarak $\alpha\beta$ uzayında akım ve gerilim uzay vektörüne ve bu uzay vektörleri Park dönüşümü kullanılarak döner referans ekseninde zamana bağlı olmayan iki boyutlu dq sinyallerine dönüştürülür. Bu sinyaller Şekil 2.41’de gösterilen PI denetleyici kullanılarak denetlenir ve sonrasında ters dq dönüşümü uygulanarak Referans İşareti (u_{ref}) olarak kullanılacak olan $\alpha\beta$ uzayında gerilim uzay vektörüne dönüştürülür.

2.2.2.2. İşaret Üretimi

Şekil 2.40’da gösterilen şebeke bağlantılı tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici sisteminin temel devre blok diyagramı içerisinde var olan İşaret Üretim bloğu, evirici topolojisine bağlı oluşturulan anahtarlama stratejisi (hangi anahtarın hangi sıra ve sıklıkla ON-OFF durumunda olacağını ifadesi), Referans İşaret ve Taşıyıcı İşaret kullanılarak oluşturulmuştur.

Şebeke bağlantılı evirici sistemin benzetim çalışmasında şebekeden bağımsız evirici sistemi benzetim çalışmasında olduğu gibi Şekil 2.3’te benzetim çalışmasında kullanılan İşaret Üretim bloğu temel blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil 2.3.a, SDGM ve HDGM teknikleri için Şekil 2.3.b UV-DGM tekniği için anahtarlama işareti üretiminde kullanılmaktadır. Şekil 2.3’te gösterilen İşaret Üretim bloğunda belirtilen Referans İşaret ($R\hat{I}$) ve Taşıyıcı İşaret ($T\hat{I}$) türleri/dalga şekilleri, uygulanacak olan modülasyon tekniğine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Referans İşaret türü/dalga şekli Şekil 2.40’da gösterilen Kontrol bloğu çıkış sinyali olan Referans İşareti (u_{ref}) dalga şekline göre

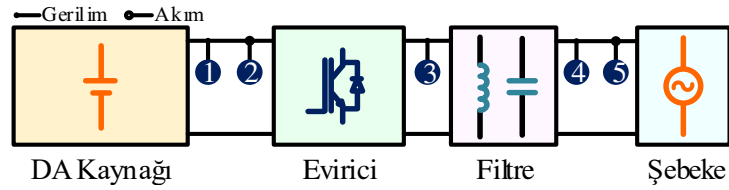
belirlenirken Taşıyıcı İşaret türü/dalga şekli Şekil 2.5'te gösterilen sinyallere göre belirlenmektedir.

Benzetim çalışmasında kullanılacak olan SDGM ve HDGM teknikleri için Şekil 2.40'da gösterilen İşaret Üretim bloğunda kullanacak olan Taşıyıcı İşaret (Tİ) ve Referans İşaret (Rİ) tür/dalga şekil bilgileri Tablo 2.14'de özetlenmiştir.

Tablo 2.14. Durum, Modülasyon tekniği, Rİ ve Tİ tür matrisi

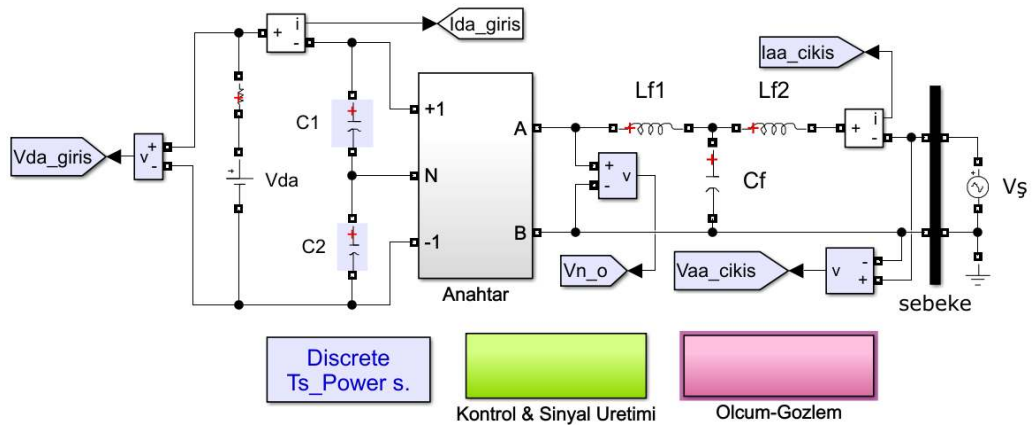
Durum	Modülasyon Tekniği	Referans İşaret (Rİ)		Taşıyıcı İşaret (Tİ)	
		A	B	A	B
I	SDGM	u_{ref}	$\overline{u_{ref}}$	Tİ-3	Tİ-4
II	SDGM	u_{ref}	$\overline{u_{ref}}$	Tİ-5	Tİ-6
III	SDGM	u_{ref}	$\overline{u_{ref}}$	Tİ-1	Tİ-2
VIII-a	HDGM-I	u_{ref}	$\overline{u_{ref}}$	Tİ-7	Tİ-8
VIII-b	HDGM-I	u_{ref}	$\overline{u_{ref}}$	Tİ-9	Tİ-10

Şekil 2.42'de verilen benzetim çalışması gerçekleştirilecek şebeke bağlantılı sistemin geliştirilmiş blok diyagramı üzerinde işaretlenmiş noktalardan gerilim ve akım ile ilgili ölçümler ve bu ölçümler ile ilişkili hesaplamalar yapılacaktır. Benzetim çalışmasında FV panel yerine DA kaynağı kullanılacaktır.

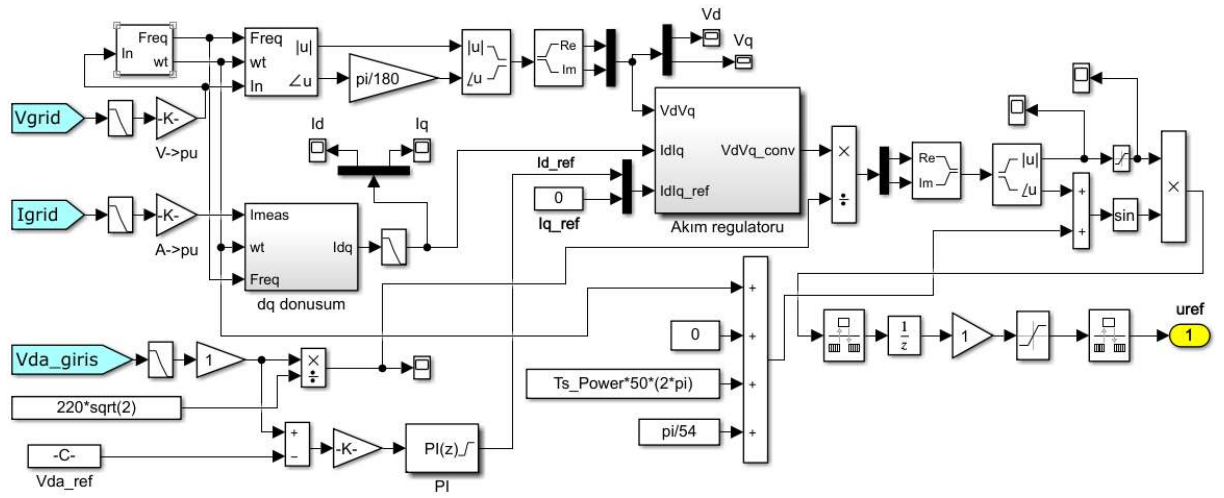


Şekil 2.42. Benzetim çalışması geliştirilmiş blok diyagramı

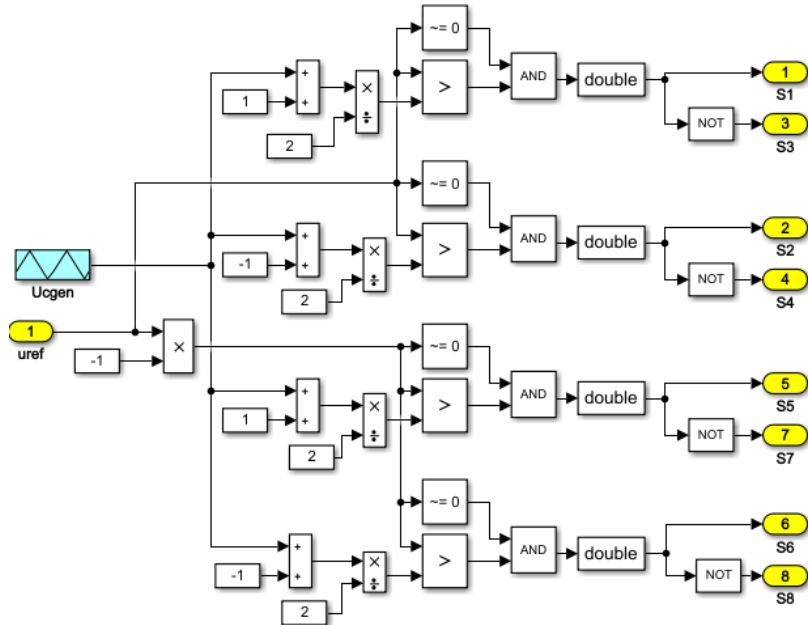
Şebeke bağlantılı evirici sisteminin benzetim programı ara yüzü blok diyagramları Şekil 2.43'te gösterilmiştir.



(a) Genel görünüm



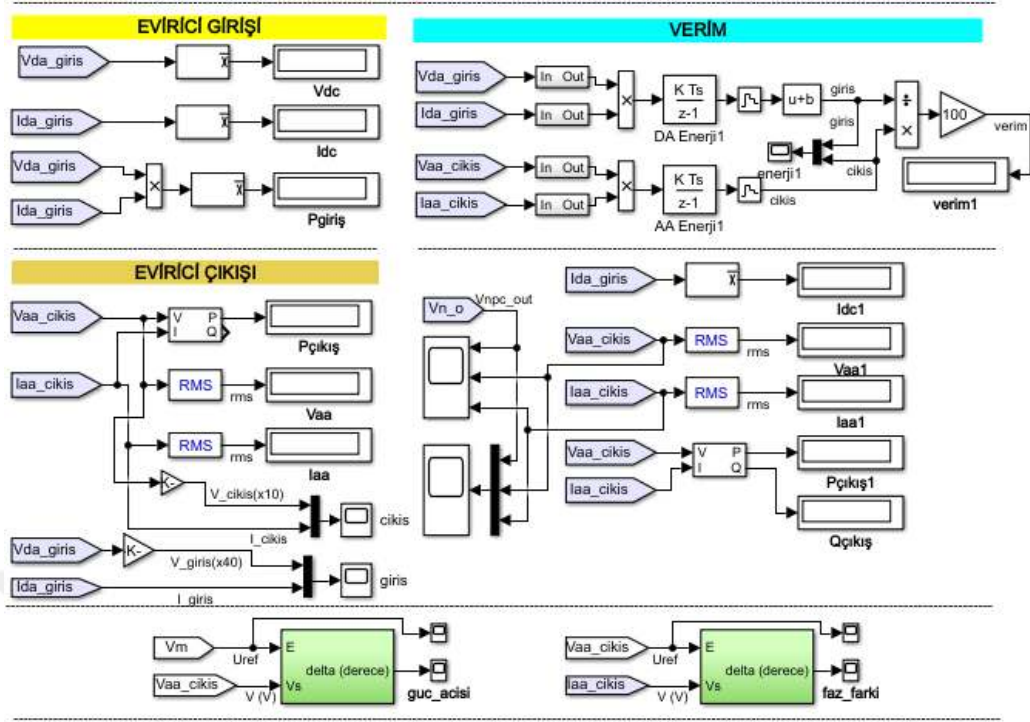
(b) Örnek kontrol üretim blok görünümü



(c) Örnek işaret üretim blok görünümü

Şekil 2.43. Şebeke bağlantılı evirici sistemi benzetim ara yüzü

Şekil 2.443.'ün devamı



(d) Örnek ölçüm-gözlem blok görünümü

2.2.2.2.1. Test-I

Evirici modülasyon tekniği ile THB ve verim arasındaki ilişki, bu bölümde yapılacak olan benzetim çalışmaları ile ortaya koyulacaktır. Uygulanacak modülasyon teknikleri ve taşıyıcı türleri Tablo 2.15'te ve sistemin benzetimine ait parametre değerleri Tablo 2.16'da verilmiştir. Bu çalışmada farklı modülasyon tekniklerinin sistem çıktıları üzerindeki etkileri gözlemlenecektir. Giriş akımının d bileşeninin referans değeri (I_{d_ref}) değiştirilerek sistem çıkış gücü ($P_{çıkış}$) ayarlanmakta ve Şekil 2.42'de gösterilen ölçüm noktalarından alınan akım ve gerilim bilgileri kullanılarak evirici giriş gücü (P_{giris}) ve çıkış gücü ($P_{çıkış}$) ve bunlar ile ilişkili evirici temel verimi (η), Avrupa verimi (η_{Avrupa}), Kaliforniya verimi ($\eta_{Kaliforniya}$) ve çıkış akımına ait THB hesaplanacaktır.

Tablo 2.15. Benzetim çalışması modülasyon teknikleri ve taşıyıcı işaret türleri

Modülasyon Tekniği	Taşıyıcı İşaret Türü	Durum
SDGM	Sağa yatık testere	I
	Sola yatık testere	II
	Üçgen	III
UV-DGM		VII
HDGM-I		VIII-a
HDGM-II		VIII-b

Tablo 2.16. Sistem benzetim parametreleri

DA Kaynak		Evirici				Şebeke	
V_{da} (V)	400	Güç (kW)	4.0			V_{aa} (V)	$220\sqrt{2}$
Filtre		C_1 (mF)	1.6	C_2 (mF)	1.6	f_s (Hz)	50
L_f (mH)	3.0	Anahtar		Diyot		Modülasyon Bilgisi	
C_f (μF)	2.2	R_{on} (mΩ)	1.0	R_{on} (mΩ)	1.0	f_{sw} (kHz)	20
		L_{on} (mH)	0.0	L_{on} (mH)	0.0	m_{indeks}	0.9
		V_F (V)	1.45	V_f (V)	1.8		

Evirici giriş gerilimi ($V_{giriş}$) ve anahtarlama frekansı (f_{sw}) değeri sabit olması ve şebekeye aktarılan aktif gücün ($P_{çıkış}$) değişken olması koşulu için benzetim çalışması yerine getirilmiş ve Tablo 2.17-2.22’de verilen sonuçlar gözlemlenmiştir.

Tablo 2.17. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-I)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
400	0.52147	220	0.95319	$\%5 \times P_{maks}$	30.86	96.033
400	1.0324	220	1.8646	$\%10 \times P_{maks}$	22.61	96.898
400	2.0564	220	3.6772	$\%20 \times P_{maks}$	14.98	97.255
400	3.0816	220	5.4845	$\%30 \times P_{maks}$	10.42	97.360
400	5.1333	220	9.1057	$\%50 \times P_{maks}$	5.30	97.432
400	7.6950	220	13.647	$\%75 \times P_{maks}$	3.77	97.469
400	8.2098	220	14.558	$\%80 \times P_{maks}$	3.37	97.473
400	9.2342	220	16.373	$\%90 \times P_{maks}$	3.25	97.472
400	10.259	220	18.190	$\%100 \times P_{maks}$	3.02	97.475
$\eta_{Avrupa} = \%97.33638$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.41491$		

Tablo 2.18. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-II)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
400	0.52147	220	0.95319	$\%5 \times P_{maks}$	30.86	96.033
400	1.0324	220	1.8646	$\%10 \times P_{maks}$	22.61	96.898
400	2.0564	220	3.6772	$\%20 \times P_{maks}$	14.98	97.255
400	3.0816	220	5.4845	$\%30 \times P_{maks}$	10.42	97.360
400	5.1333	220	9.1057	$\%50 \times P_{maks}$	5.30	97.432
400	7.6950	220	13.647	$\%75 \times P_{maks}$	3.77	97.469
400	8.2098	220	14.558	$\%80 \times P_{maks}$	3.37	97.473
400	9.2342	220	16.373	$\%90 \times P_{maks}$	3.25	97.472
400	10.259	220	18.190	$\%100 \times P_{maks}$	3.02	97.475
$\eta_{Avrupa} = \%97.33638$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.41491$		

Tablo 2.19. Benzetim çalışması sonuç değerleri, Test-I (Durum-III)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
400	0.52090	220	0.96883	$\%5 \times P_{maks}$	36.73	96.095
400	1.0316	220	1.8734	$\%10 \times P_{maks}$	24.89	96.914
400	2.0577	220	3.6731	$\%20 \times P_{maks}$	13.99	97.252
400	3.0817	220	5.4801	$\%30 \times P_{maks}$	9.70	97.357
400	5.1337	220	9.1088	$\%50 \times P_{maks}$	5.77	97.428
400	7.6971	220	13.649	$\%75 \times P_{maks}$	3.60	97.466
400	8.2071	220	14.552	$\%80 \times P_{maks}$	3.24	97.469
400	9.2334	220	16.371	$\%90 \times P_{maks}$	3.06	97.472
400	10.259	220	18.189	$\%100 \times P_{maks}$	2.84	97.476
$\eta_{Avrupa} = \%97.33679$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.41266$		

Tablo 2.20. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII)

$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
400	0.52229	220	0.97503	$\%5 \times P_{maks}$	77.13	95.060
400	1.0351	220	1.8438	$\%10 \times P_{maks}$	33.54	96.745
400	2.0596	220	3.6507	$\%20 \times P_{maks}$	9.76	97.181
400	3.0841	220	5.4688	$\%30 \times P_{maks}$	6.62	97.326
400	5.1349	220	9.1025	$\%50 \times P_{maks}$	4.24	97.406
400	7.6970	220	13.643	$\%75 \times P_{maks}$	2.51	97.462
400	8.2105	220	14.553	$\%80 \times P_{maks}$	2.02	97.463
400	9.2351	220	16.369	$\%90 \times P_{maks}$	1.96	97.464
400	10.259	220	18.184	$\%100 \times P_{maks}$	1.90	97.471
$\eta_{Avrupa} = \%97.27171$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.39164$		

Tablo 2.21. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a)

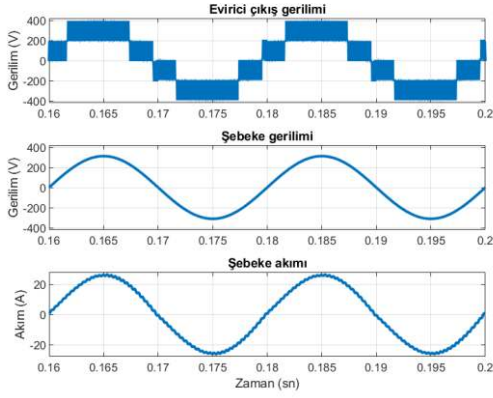
$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
400	0.52367	220	0.96129	$\%5 \times P_{maks}$	34.32	95.599
400	1.0339	220	1.8301	$\%10 \times P_{maks}$	11.15	96.744
400	2.0595	220	3.6669	$\%20 \times P_{maks}$	12.55	97.176
400	3.0806	220	5.4620	$\%30 \times P_{maks}$	6.79	97.307
400	5.1349	220	9.0976	$\%50 \times P_{maks}$	3.47	97.387
400	7.6992	220	13.647	$\%75 \times P_{maks}$	3.44	97.427
400	8.2120	220	14.555	$\%80 \times P_{maks}$	3.48	97.430
400	9.2376	220	16.368	$\%90 \times P_{maks}$	2.25	97.431
400	10.265	220	18.190	$\%100 \times P_{maks}$	2.22	97.434
$\eta_{Avrupa} = \%97.26875$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.36468$		

Tablo 2.22. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b)

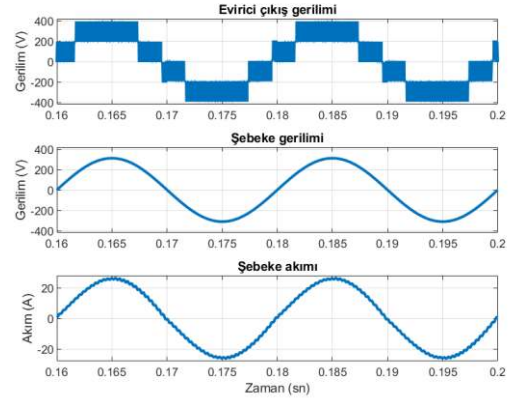
$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
400	0.52653	220	0.93556	$\%5 \times P_{maks}$	23.59	95.147
400	1.0397	220	1.8516	$\%10 \times P_{maks}$	18.08	96.421
400	2.0626	220	3.6599	$\%20 \times P_{maks}$	11.30	96.988
400	3.0869	220	5.4689	$\%30 \times P_{maks}$	7.75	97.230
400	5.1409	220	9.1051	$\%50 \times P_{maks}$	4.66	97.313
400	7.7053	220	13.646	$\%75 \times P_{maks}$	2.77	97.369
400	8.2180	220	14.552	$\%80 \times P_{maks}$	2.38	97.372
400	9.2416	220	16.372	$\%90 \times P_{maks}$	2.63	97.404
400	10.266	220	18.184	$\%100 \times P_{maks}$	2.18	97.402
$\eta_{Avrupa} = \%97.16175$				$\eta_{Kaliforniya} = \%97.28524$		

Modülasyon tekniği SDGM ve taşıyıcı işaret türü Sağa Yatık Testere ve Sola Yatık Testere olan Durum-I ve II'ye ait Tablo 2.17 ve 2.18'de verilen sonuçlarda bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bütün durumlar için çıkış gücü azaldıkça verim azalmış, THB değeri artmıştır.

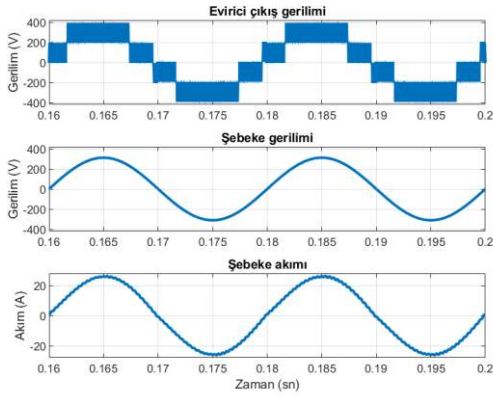
Durum-I, II, III, VII, VIII-a ve VIII-b için evirici çıkış gücünün ($P_{çıkış}$) maksimum değerinde evirici çıkış gerilimi, yük akımı ve gerilim dalga şekilleri Şekil 2.44-2.49'da gösterilmiştir.



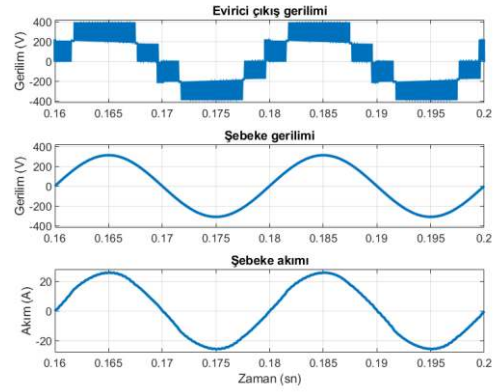
Şekil 2.44. Gerilim-akım dalga şekli (Durum-I)



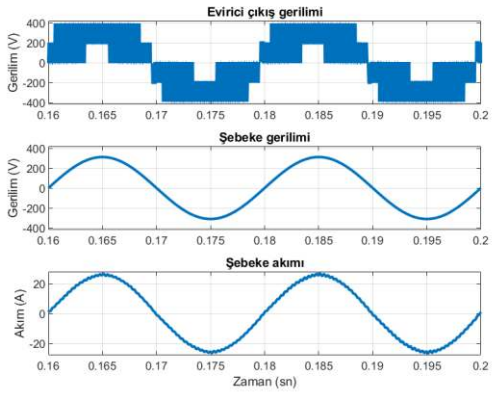
Şekil 2.45. Gerilim-akım dalga şekli (Durum-II)



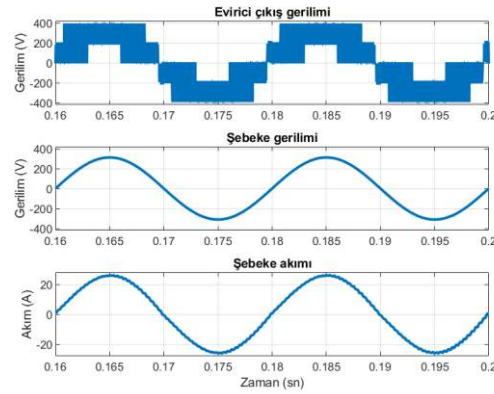
Şekil 2.46. Gerilim-akım dalga şekli (Durum-III)



Şekil 2.47. Gerilim-akım dalga şekli (Durum-VII)



Şekil 2.48. Gerilim-akım dalga şekli (Durum-VIII-a)



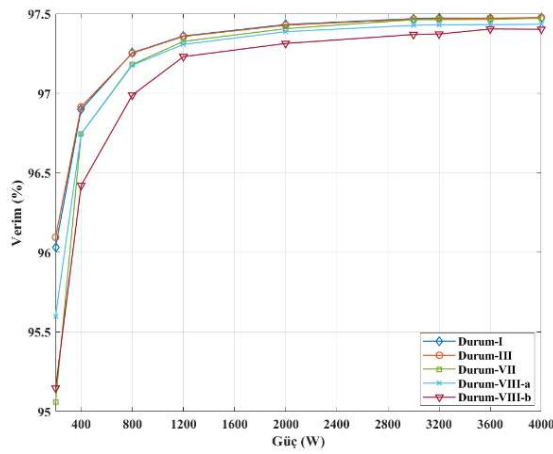
Şekil 2.49. Gerilim-akım dalga şekli (Durum-VIII-b)

$t = 0.16 - 0.17$ ms aralığında Şekil 2.44-2.49'da gösterilen evirici çıkış gerilimi dalga şekillerine göz atıldığında gerilimin $[0 - V_{da}/2 - V_{da} - V_{da}/2 - 0]$ sınır değer bölgelerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Sırasıyla Şekil 2.44, 2.45, 2.46 ve 2.47'de

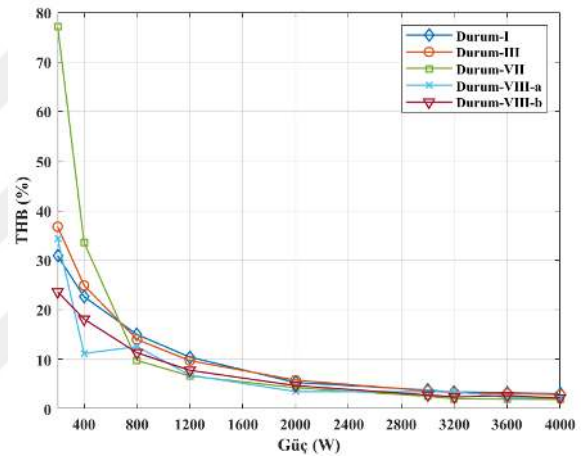
gösterilen Durum-I, II, III ve VII için $[V_{da}/2 - V_{da} - V_{da}/2]$ değer bölgesine ait zaman dilimi, Şekil 2.48 ve 2.49’da gösterilen Durum VIII-a ve VIII-b’ye göre daha dardır.

Şekil 2.44-2.49’da görüldüğü üzere şebeke gerilimi ve akımının dalga şekilleri biçimsel olarak aynı ve aralarında her hangi bir faz farkı yoktur. Dolayısıyla sistemin şebeke ile senkron olduğu söylenebilir. SDGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin kullanıldığı Şekil 2.44-2.49’da gösterilen Durum-I, II, III, VII, VIII-a ve VIII-b için şebeke akımı dalga formu saf sinüzoidal dalga formuna yakındır.

Benzetim çalışması yapılan durumlara bağlı güç ile verim arasındaki değişim ve THB ile verim arasındaki değişim sırasıyla Şekil 2.50 ve 2.51’de gösterilmiştir.



Şekil 2.50. Verim-güç



Şekil 2.51. THB-güç

Durum- I ve II’ye ait Tablo 2.17 ve 2.18’de verilen sonuçların aynı olması sebebiyle Şekil 2.50 ve 2.51’de Durum- II sonucu çizdirilmemiştir.

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü DK eviricide farklı modülasyon teknikleri kullanılarak çıkış gücüne bağlı olarak verim değişimi tüm modülasyon tekniği ve taşıyıcı işaret türü durumları için Şekil 2.50’de görüldüğü üzere benzer karakteristik göstermektedir. Evirici çıkış gücünün artışı ile verimin arttığı (Şekil 2.50) ve THB değerinin azaldığı (Şekil 2.51) görülmektedir.

SDGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin farklı durumları için benzetim karşılaştırılması Tablo 2.23’te özetlenmiştir.

Tablo 2.23. SDGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin farklı durumları için benzetim karşılaştırılması

	Durum					
	I	II	III	VII	VIII-a	VIII-b
	SDGM			UV-DGM	HDGM	
THB_{çıkış}*	3.02	3.02	2.84	1.90	2.22	2.18
η^*	97.475	97.475	97.476	97.471	97.434	97.402
η_{Avrupa}	97.33638	97.33638	97.33679	97.27171	97.26875	97.16175
$\eta_{Kaliforniya}$	97.41491	97.41491	97.41266	97.39164	97.36468	97.28524

Not: *: $P_{çıkış} = P_{maks}$ durumu için, η (her türü) ve THB değeri %'lidir.

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü DK evirici sisteminde SDGM, UV-DGM ve HDGM tekniklerinin kullanımı (Durum I-III, VII, VIII-a ve VIII-b) ile yük akımı THB değeri Tablo 2.23'te belirtildiği üzere %5 sınır değerinin altında kalarak istenen koşul sağlanmaktadır. Sırasıyla Durum-VII, VIII-b ve VIII-a'yı içeren UV-DGM ve HDGM teknikleri için en düşük 3 şebeke akımı THB değeri elde edilmiştir. Evirici Geleneksel (η^*) ve Avrupa verimi (η_{Avrupa}) açısından modülasyon tekniği SDGM ve işaret türü Üçgen olan Durum-III'ün daha iyi performans sergilediği Tablo 2.23'te görülmektedir. Kaliforniya verimi ($\eta_{Kaliforniya}$) açısından ise Durum-I ve Durum-II'nin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Burada gözlemlenen durumlar ile ön plana çıkan verim türü (Geleneksel, Kaliforniya veya Avrupa) arasındaki farklılığın temel sebebi, verim türlerinin hesaplanmasında kullanılan formülasyonların (Denklem (2.1)-(2.3)) değişkenlik göstermesidir. Yapılan testler sonucunda oluşturulan tablolara bakıldığında maksimum gücün belirli oranın (%) evirici çıkışında gözlemlenmesi durumunda evirici verimi elde edilmektedir. Kaliforniya verimi hesaplanırken maksimum gücün %75'ine karşılık gelen verim değeri Durum III'de, Durum I ve II'ye göre daha küçüktür. Bu nedenle Durum III'e ait Kaliforniya verimi, Durum I ve II'deki verimden daha küçük olmaktadır.

2.2.2.2.2. Test-II

Şebeke bağlantılı tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici sistemi ile ilgili Test-I'de yapılan benzetim çalışmalarında Şekil 2.41'de gösterildiği gibi Kontrol bloğu içerisinde akım (iç) çevrim ve gerilim (dış) çevrim kontrol yapılarında denetleyici olarak PI denetleyici kullanılmıştır.

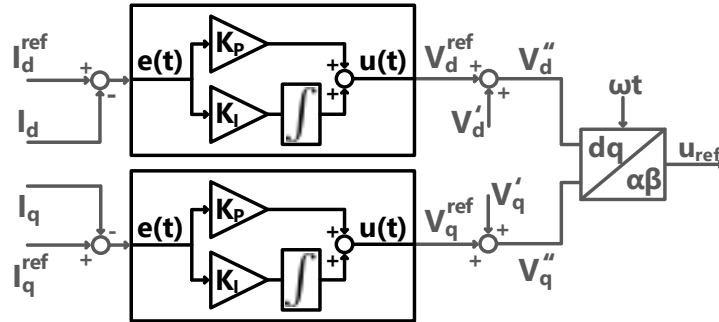
Bu bölümde akım (iç) çevrim kontrolü içerisinde farklı denetleyici yapılarının kullanılmasında durumunda evirici sistem performansında meydana gelen değişimler gözlemlenecektir. Denetleyici olarak mevcutta kullanılmakta olan PI (Oransal + İntegral) denetleyici, Bulanık PI ve Kayan Kipli denetleyici kullanılacaktır.

Şekil 2.41’de gösterilen Kontrol bloğu içerisindeki akım (iç) çevrim denetleyici giriş işareti akımın I_d ve I_q bileşenleridir. Akımın I_d bileşeni ile evirici çıkışı aktif güç kontrol edilebilirken I_q bileşeni ile evirici çıkışı reaktif güç kontrol gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada evirici çıkışı aktif gücü kontrolü yapıldığı varsayılarak akımın I_d bileşeni kontrol edilirken I_q bileşeninin referans değeri $I_q^{ref} = 0$ olarak düzenlenecektir.

Temelde PI denetleyicide $e(t)$ hata değeri, K_p oransal kazanç katsayısı ile hata değerinin integrali ise K_i integral kazanç katsayısı ile çarpılır. Bu iki işlemin toplamında hataya ve hatanın integraline bağlı Denklem 2.4’te verilen bir kontrol işareti elde edilmiş olur.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt \quad (2.4)$$

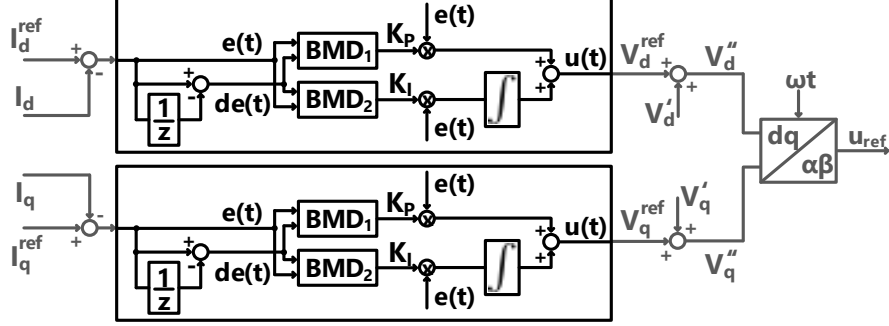
Burada $u(t)$ kontrol işaretini, $e(t)$ hatayı göstermektedir. Şekil 2.52’de PI denetleyici blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.52. PI denetleyicili temel kontrol blok diyagramı

Kullanılan ikinci denetleyici yapısı bulanık PI denetleyici kullanılacaktır. Bu yapı PI denetleyici ile bulanık mantık denetleyicinin birleşiminden oluşmaktadır. Karmaşık veya belirsizlik içeren, matematiksel olarak ifade edilemeyen problemlerin çözümünde bulanık mantık kullanılabilir. Bulanık mantık denetleyicisi (BMD), bulanıklaştırma birimi, bulanık kurallar ve durulaştırma biriminden oluşur. Bulanık PI denetleyici yapısında ise PI

denetleyici parametreleri K_p ve K_I bulanık mantık denetleyicisi kullanılarak belirlenir. Bulanık PI denetleyici yapısına ait blok diyagram Şekil 2.53'te gösterilmiştir.

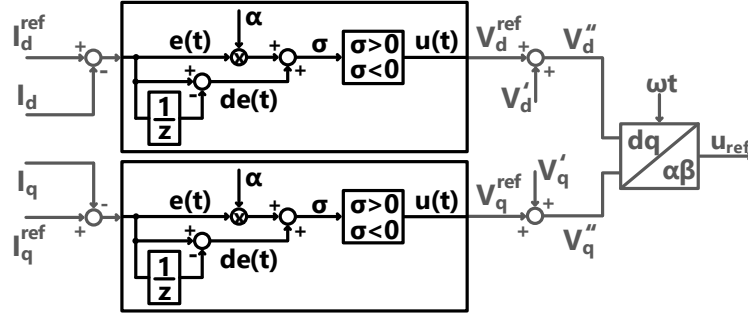


Şekil 2.53. Bulanık PI denetleyici blok diyagramı

Üyelik fonksiyonu türü olarak hesaplama kolaylığı içerdiğinden üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bulanık çıkarım aşamasında uygulanan kural sayısı 25 tir. Durulaştırma aşamasında alanların merkezi yöntemi kullanılarak denetleyici çıkışı gerçek değerleri elde edilmektedir. BMD denetleyici parametreleri deneme-yanılma yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

Kayan kipli denetim değişken yapılı bir denetim sistemi olup sistem çıkışını referans olarak verilmiş kayma yüzeyinde tutmaya çalışır. Sistem belirsizliklerine karşı kararlılık ve sağlamlık, esneklik, kolay uygulanabilirlik gibi birçok avantaja sahiptir. Kayan kipli denetim bazı dezavantajlara da sahiptir. Bunlardan biri çatırtı olarak adlandırılan denetleyici çıkış sinyalinde meydana gelen yüksek frekans salınımıdır.

Kayan kipli denetim iki aşamalı bir denetimdir. İlk evre olan erişme evresi başlangıç anında denetim sinyalinin kayma yüzeyine yerleşmesine kadar olan evredir. İkinci evre ise kayma evresidir. Kayma evresi boyunca sistem çıkışı kayma yüzeyine bağlıdır. Kayan kipli denetime ait blok diyagramı Şekil 2.54'te gösterilmiştir. Burada σ kayma yüzeyini ve α kayma yüzeyi eğimini ifade etmektedir.



Şekil 2.54. Kapan kipli denetleyici blok diyagramı

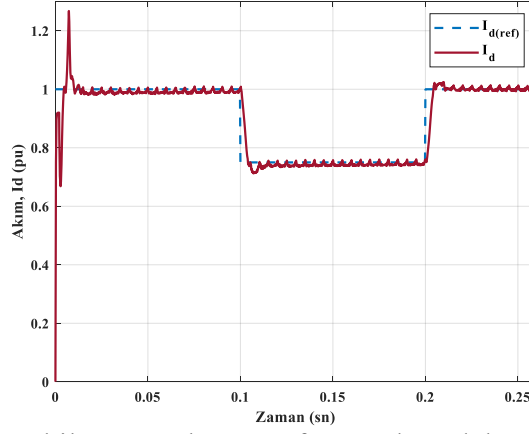
Denetleyici girişinde I_d^{ref} referans akım değeri olarak basamak şeklinde bir akım girişi verilerek denetleyici çıkışındaki akım değerinin verilen referans değerini takip edip etmediği gözlenmiştir. Denetleyicilerin performanslarını değerlendirmek için ISE (hatanın karesinin integrali), IAE (hatanın mutlak değerinin integrali) ve ITAE (zaman ağırlıklı mutlak hata değerinin integrali) gibi performans kriterleri kullanılmıştır. Bu performans kriterlerine ilişkin tanımlar denklemlerde verilmiştir.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2.5)$$

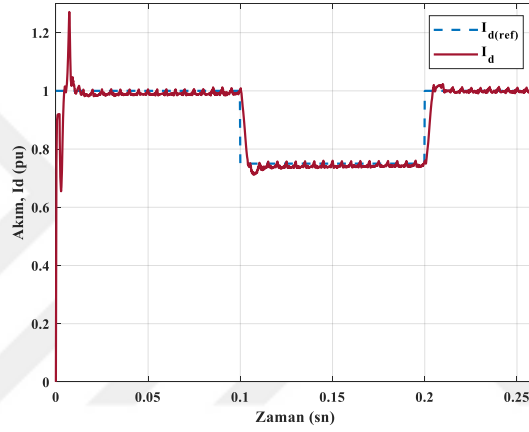
$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.6)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (2.7)$$

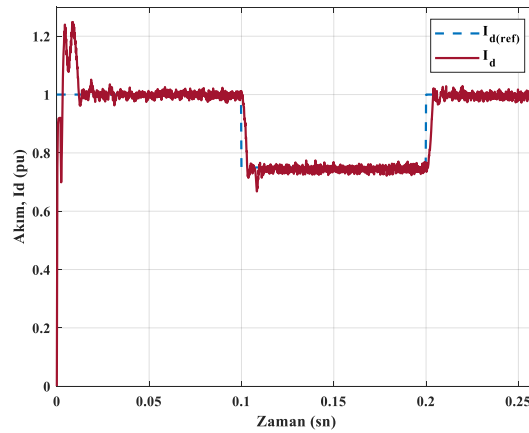
Şebeke bağlantılı tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici sisteminde şebekeye enjekte edilen akımın I_d bileşeninin kontrolü farklı denetleyiciler (PI, Bulanık PI ve Kapan kipli) kullanılarak gerçekleştirmek için benzetim çalışmaları yapılacaktır. Şekil 2.55-2.57'de I_d^{ref} referans akımı ve evirici çıkışında gözlemlenen I_d akımının zaman içerisindeki değişimi gözlemlenmiştir.



Şekil 2.55. Çıkış ve referans akım dalga şekli (PI)



Şekil 2.56. Çıkış ve referans akım dalga şekli (Bulanık PI)

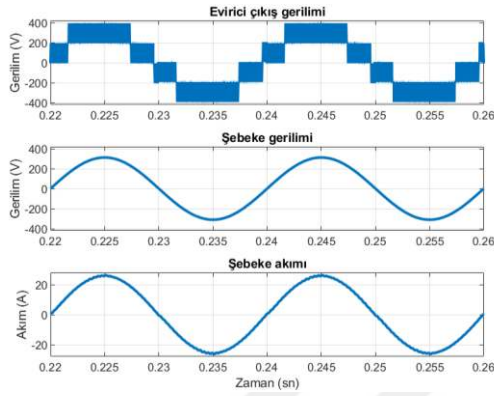


Şekil 2.57. Çıkış ve referans akım dalga şekli (Kayan kipli)

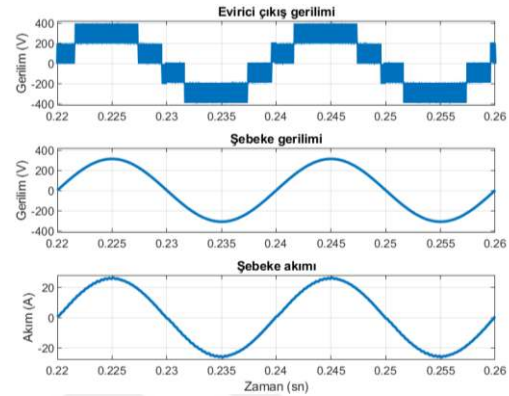
PI denetleyici ve bulanık PI denetleyici yöntemlerinin kullanıldığı Şekil 2.55 ve 2.56'ya bakıldığında biçimsel olarak göz ile ayırt edilemeyecek kadar bir birine yakın oldukları gözlemlenmiştir. Denetleyici olarak Kayan kipli denetimin kullanılması durumunda Şekil 2.57'de gösterilen dalga şekilleri elde edilmiştir. Evirici çıkışı akım (I_d)

dalga şeklinde dalgalanmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Tüm denetleyici türlerinde çıkış akımının (I_d) referans akım (I_d^{ref}) dalga şeklini takip ettiği gözlenmiştir.

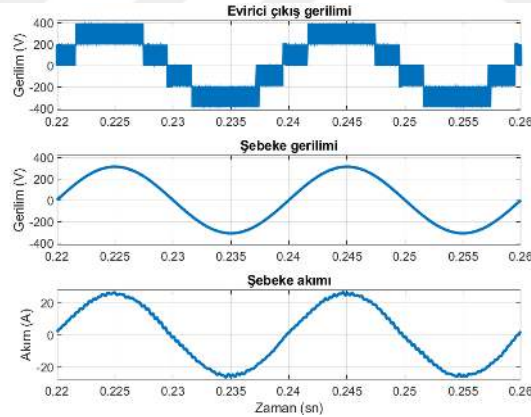
Evirici çıkış gerilimi, şebeke akımı ve şebeke gerilimine ait gerilim-akım grafikleri Şekil 2.58-2.60’da gösterilmiştir. Şekil 2.58-2.60’a bakıldığında çıkışların yaklaşık olarak aynı olduğu söylenebilir. Kayan kipli denetim yönteminin kullanıldığı Şekil 2.60’da şebeke akımında salınımın etkisi gözlenmektedir.



Şekil 2.58. Gerilim-akım dalga şekli (PI)



Şekil 2.59. Gerilim-akım dalga şekli (Bulanık PI)



Şekil 2.60. Gerilim-akım dalga şekli (Kayan kipli)

Şebeke bağlantılı tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici sisteminde şebekeye enjekte edilen akımın I_d bileşeninin kontrolünü farklı denetleyiciler (PI, Bulanık PI ve Kayan kipli) kullanılarak gerçekleştirmek için yapılan benzetim çalışmaları sonucunda gözlemlenen sayısal bazı değerler Tablo 2.24’te verilmiştir.

Tablo 2.24. Evirici sistem denetimi benzetim sonuçları

Denetleyici Türü	$THB_{i_{çıkış}}^*$ (%)	η^* (%)	ISE	IAE	ITAE
PI	1.29	97.468	0.0005720	0.004408	0.0004192
Bulanık PI	1.27	97.467	0.0005800	0.004421	0.0004213
Kayan Kipli	3.23	97.462	0.0006979	0.005344	0.0005018

Tablo 2.24’de geleneksel verim değerinin en yüksek olduğu kontrol yönteminin PI denetleyici olduğu söylenebilir. ISE, IAE ve ITAE değerlerinin en iyi olduğu kontrol yöntemi ise yine PI denetleyicidir. THB değerinin en düşük olduğu kontrol yönteminin ise bulanık PI denetleyicidir. En yüksek THB değeri ise kayan kipli denetim yönteminde gözlenmiştir. Bunun sebebi kayan kipli denetim yönteminin dezavantajı olan çatırtı problemidir. Tablo 2.24’de alınan sonuçların genel bir karşılaştırmasını yapacak olursak en iyi çıkış değerlerinin genel olarak PI denetleyici için elde edildiği söylenebilir.

3. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, tek fazlı 5-seviyeli H-köprü diyot kenetlemeli evirici topolojisinin farklı modülasyon teknikleri ve farklı kontrol yöntemleri için benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olarak çalışma durumları için 5-seviyeli DK evirici topolojisinin MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır.

Tek fazlı 5-seviyeli H-köprü DK evirici kullanılan sistemin benzetim sonuçlarında farklı modülasyon türleri için çıkış gerilimleri ve çıkış akımına ait dalga şekillerine yer verilmiştir. Şebekeden bağımsız durum için SDGM, ÜHE-DGM, UV-DGM ve HDGM modülasyon türleri ve farklı taşıyıcı işaret türleri kullanılarak alınan benzetim sonuçları tablolar halinde verilmiştir.

Şebeke bağlantılı durum için SDGM, UV-DGM ve HDGM modülasyon türleri ve farklı taşıyıcı işaret türleri kullanılarak alınan benzetim sonuçları tablolar halinde verilmiştir. Farklı modülasyon türleri için verim-güç ve THB-güç arasındaki ilişkiyi özetleyen grafiklere yer verilmiştir. Şebeke bağlantılı durum için kontrol yöntemleri değiştirilerek benzetim sonuçları tablo ve grafikler halinde verilmiştir. ÜHE-DGM tekniğinin kullanıldığı şebekeden bağımsız durum benzetimleri için THB değerleri %5'in üzerindeyken diğer tüm durumlar için maksimum güçte THB değerleri standartta belirtilen %5 sınır değerinin altındadır. Tüm çalışma durumları için güç değerinin azalması ile verim azalmış, toplam harmonik bozunum ise artmıştır.

4. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında tek fazlı şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı 5-seviyeli H-köprü DK evirici sisteminin benzetim çalışmasına yer verilmiştir. Sistemin farklı modülasyon türleri için benzetim sonuçları irdelenmiştir. DK evirici kullanılan FV sistemlerde yapılacak çalışmalar ile ilgili aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- Şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız durumlar için diyot kenetlemeli eviricinin anahtarlama elemanı sayısı azaltılarak daha verimli bir sistem elde edilebilir.
- DK evirici yerine farklı çok seviyeli evirici türleri kullanılarak verim değeri artırılıp, THB değeri azaltılabilir.
- DK eviricinin seviye sayısı artırılıp çıkış gerilimi şekli sinüzoidale yaklaştırılarak filtre gereksinimi azaltılabilir.
- Literatürde var olan modülasyon tekniklerinden faydalanılarak yeni hibrit modülasyon türleri ortaya koyup bu evirici sistem performansı üzerindeki etkisi irdelenebilir.
- Kontrol yöntemleri değiştirilerek sistem çalışması irdelenebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Baker, R. H., ve Bannister, L. H., 'Electric power converter'. US Patent: 3867643A, February 1975.
2. Panda, A. K. ve Suresh, Y., Research on Cascade Multilevel Inverter with Single DC Source By Using Three-Phase Transformers, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 40, 1 (2012) 9-20.
3. Sotoodeh, P. & Miller, R. D., A Single-Phase 5-Level Inverter with FACTS Capability Using Modular Multi-Level Converter (MMC) Topology, In 2013 International Electric Machines & Drives Conference, May 2013, 1229-1234.
4. Prabaharan, N. & Palanisamy, K., A Single Phase Grid Connected Hybrid Multilevel Inverter for Interfacing Photo-Voltaic System, Energy Procedia, 103 (2016) 250-255.
5. Prabaharan, N., Rini Ann Jerin, A., Palanisamy, K. ve Umashankar, S., Integration of Single Phase Reduced Switch Multilevel Inverter Topology for Grid Connected Photovoltaic System, Energy Procedia, 138 (2017) 1177-1183.
6. Kabalcı, E. ve Canbaz, R., Şebeke Bağlantılı Tek Fazlı Dokuz Seviyeli Asimetrik Evirici Tasarımı ve Analizi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 5 (2017) 512-518.
7. Jun, E. S. ve Kwak, S., A Highly Efficient Single-Phase Three-Level Neutral Point Clamped (NPC) Converter Based on Predictive Control with Reduced Number of Commutations, Energies 2018, 11, 12 (2018) 3524.
8. Syed, A. ve Sandipamu, T. K., A Novel Single-Phase Multilevel Transformerless PV Inverter for Reduced Common-Mode Current, materialstoday: Proceedings, 5, 1(1) (2018) 524-530.
9. Saketi, S. K., Chaturvedi, P. ve Yadeo, D., A New Fault Tolerant Single Phase 5-Level Inverter Topology, 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), December 2018, 1-5.
10. Tarassodi, P., Siadatan, A. ve Keshani, M., Single-Phase Multi-Level Inverter Suitable for Symmetrical and Asymmetrical Photovoltaic (PV) Applications, 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2019, 980-984.
11. Sreekanth, T., Kshirsagar, A., Mishra, S. ve Mohan, N., A Nine-Level Inverter for Single Phase PV Applications, 2019 IEEE Energy Conversion Congress and

Exposition (ECCE), September 2019, Baltimore, MD, USA, 5894-5899.

12. Selvaperumal, S. ve Sivagamasundari, M. S., Cascaded H-Bridge Five Level Inverter Based Selective Harmonic Eliminated Pulse Width Modulation for Harmonic Elimination, World Academy of Science and Technology, 13, 2 (2019) 110-114.
13. Khan, M. N. H., Forouzesh, M., Siwakoti, Y. P., Li, L., Kerekes, T. ve Blaabjerg, F., Transformerless Inverter Topologies for Single-Phase Photovoltaic Systems: A Comparative Review, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8, 1 (2020) 805-835.
14. Li, X., Wang, Q., Wen, H. and Xiao, W., Comprehensive Studies on Operational Principles for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems, in IEEE Access, 7 (2019) 121407-121420, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937100.
15. Alluhaybi, K., Batarseh, I. and Hu, H., Comprehensive Review and Comparison of Single-Phase Grid-Tied Photovoltaic Microinverters, in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 8, 2 (2020) 1310-1329, doi: 10.1109/JESTPE.2019.2900413.
16. Nabae, A., Takahashi, I. ve Akagi, H., A New Neutral-Point Clamped PWM Inverter, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-17, 5 (1981) 18–23.
17. Wang, J., Multilevel Inverters and Their Applications in Power System, PhD Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, 2005.
18. Beşer, E., Anahtarlama Elemanı Sayısı ve Harmonik Optimizasyonu ile Bir Fazlı Çok Seviyeli Evirici Tasarımı, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2009.
19. Kou, L., Topologies and Modulation Methods for Five-Level Active-Neutral-Point-Clamped Inverters, PhD Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, December, 2017.
20. Jiao, Y., High Power High Frequency 3-level Neutral Point Clamped Power Conversion System, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, August, 17th, 2015.
21. Tang, Q., A New Diode-Clamping Multilevel Inverter With A DC Capacitor Voltage Balance Control, PhD Thesis, Polytechnic Institute of New York University, January 2013.
22. Colak, I., Kabalci, E. ve Bayindir, R., Review of Multilevel Voltage Source Inverter Topologies and Control Schemes, Energy Conversion and

Management, 52, 2 (2011) 1114–1128.

23. Rashid, M. H., Power Electronics, Pearson Education Inc., 2014.
24. Mohapatra, G. Multilevel Inverter; A Review, 2018 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI), 2018, Chennai, India.
25. Meynard, T. A. ve Foch, H., Multi-Level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverters, PESC '92 Record. 23rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1, (1992) 397-403.
26. Khadse, S., Mendole, R. ve Pandey, A., A 5-Level Single Phase Flying Capacitor Multilevel Inverter, International Research Journal of Engineering and Technologi (IRJET), 4, 2 (2017) 348-352.
27. Pharne, I. D. ve Bhosale, Y. N., A Review on Multilevel Inverter Topology, 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), (2013), 700-703.
28. Noman, A. M., Al-Shamma'a, A. A., Addoweesh, K. E., Alabduljabbar, A. A. ve Alolah, A. I., Cascaded Multilevel Inverter Topology Based on Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter, Energies 2018, 11, 4 (2018) 895.
29. Patil, P. H. ve Rajeev, M., Comparison of Three Different Topologies of a Five Level Multilevel Inverter, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ICNTE-2015 Conference Proceeding, 3, 1 (2015) 1-5.
30. Islam, M., Mekhilef, S. ve Hasan, M., Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45 (2015) 69–86.
31. Xiao, H. ve Xie, S., Leakage Current Analytical Model and Application in Single-Phase Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 52, 4 (2010) 902-913.
32. Sotoodeh, P., A Single-Phase Multi-Level D-Statcom Inverter Using Modular Multi-Level Converter (Mmc) Topology For Renewable Energy Sources, PhD Thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2014.
33. Liu, Y., Advanced Modulation, Control and Application for Multilevel Inverters, PhD Thesis, Graduate Faculty of North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, 2009.
34. Maswood, A. I. ve Tafti, H. D., Advanced Multilevel Converters and Applications in Grid Integration, JohnWiley & Sons Ltd, 2019.
35. Naga Bhaskar Reddy, V., Babu, C. S. ve Nagaraja Rao, S., Comparison of

Modulation Techniques for Multilevel Inverter fed Permanent Magnet Synchronous Motor, International Journal of Engineering Science and Technology, 2, 10 (2010) 5206-5214.

36. Köseoğlu, C., Yenilenebilir Enerji Sistemleri İçin Çok Seviyeli Bir Eviricinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Ocak 2014.
37. Keven, G., Asimetrik Çok Seviyeli Kaskad Evirici Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Haziran 2019.
38. Kabalcı, E., Çok Seviyeli İnvertörler için Yeni bir SDGM Tekniğinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, 2010.
39. Holmes, D. G. ve Lipo, T. A., Pulse Width Modulation For Power Converters: Principles and Practice, Wiley-IEEE Press, 2003.
40. Albatran, S., Allabadi, A. S., Al Khalaileh, A. R. ve Fu, Y., Improving the Performance of a Two-Level Voltage Source Inverter in the Overmodulation Region Using Adaptive Optimal Third Harmonic Injection Pulsewidth Modulation Schemes, IEEE Transactions on Power Electronics, 36, 1 (2021) 1092-1103.
41. Abad, G., Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications, Wiley, 2017.
42. Matnani, M. K., Design and Implementation of DSP Based Control of Hybrid Cascaded Multilevel Inverter Using Various Novel Pulse Width Modulation Techniques, PhD Thesis, The Maharaja Sayajirao University of Baroda, 2014.
43. Albatran, S., Al Khalaileh, A. R. ve Allabadi, A. S., Minimizing Total Harmonic Distortion of a Two-Level Voltage Source Inverter Using Optimal Third Harmonic Injection, IEEE Transactions on Power Electronics, 35, 3 (2020) 3287-3297.
44. Meco-Gutierrez, M., Heredia-Larrubia, J. R., Perez-Hidalgo, F., Ruiz-Gonzalez, A. ve Vargas-Merino, F., Pulse Width Modulation Technique Parameter Selection with Harmonic Injection and Frequency-Modulated Triangular Carrier, IET Power Electronics, 6, 5 (2013) 954-962.
45. Ferreira, A., Carvalho, A., Martins, A., Pereira, F. ve Sobrado, V., Comparison of PWM Methods for Current Harmonic Reduction in a Non-Ideal Grid, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (2013), 538-543.
46. He, Y., Liu, Y., Lei, C. ve Liu, J., Equivalent Space Vector Output of Diode Clamped Multilevel Inverters Through Modulation Wave Decomposition Under

Carrier-Based PWM Strategy, IEEE Access, 8, (2020) 104918-104932.

47. Hossain, M. L., Abu-Siada, A., Muyeen, S. M., Ibrahim, Z. & Blaabjerg, F., Design and Validation of a Generalized Multilevel Inverter with Simplified Switching Technique, Electric Power Components and Systems, 48, 1-2 (2020) 186-200.
48. Afjeh, M. G., Babaei, M., Bidgoli, M. A. ve Ahmarinejad, A., Deadbeat Control of a Modified Single-Phase Five-Level Photovoltaic Inverter with Reduced Number of Switches, International Journal of Photoenergy, (2020).
49. Lee, J. S., Lee, S. J. & Lee, K. B., Novel switching method for single-phase NPC three-level inverter with neutral-point voltage control, International Journal of Electronics, 105, 2 (2018) 303-323.
50. Shults, T. E., Husev, O., Blaabjerg, F., Roncero-Clemente, C., Romero-Cadaval, E. ve Vinnikov, D., Novel Space Vector Pulsewidth Modulation Strategies for Single-Phase Three-Level NPC Impedance-Source Inverters, IEEE Transactions on Power Electronics, 34, 5 (2019) 4820-4830.
51. Guzman-Guemez, J., Laila, D. S. ve Sharkh, S. M., State-space approach for modelling and control of a single-phase three-level NPC inverter with SVPWM, 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), (2016), 1-5.
52. Wang, S., Ma, J., Liu, B., Jiao, N., Liu T. ve Wang, Y., Unified SVPWM Algorithm and Optimization for Single-Phase Three-Level NPC Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, 35, 7 (2020) 7702-7712.
53. Zhang, Z., Xie, Y., Huang, W., Le, J. ve Chen, L., A new SVPWM method for single-phase three-level NPC inverter and the control method of neutral point voltage balance, 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, (2009), 1-4.
54. Sarkar, I. ve Fernandes, B. G., Modified hybrid multi-carrier PWM technique for cascaded H-Bridge multilevel inverter, IECON 2014- 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, (2014), 4318-4324.
55. Podder, S., Biswas, M. M. ve Khan, M. Z. R., A modified PWM technique to improve total harmonic distortion of Multilevel Inverter, 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), (2016), 515-518.
56. Meraj, M., Rahman, S., Iqbal, A. ve Emadi, N. A., Novel Level Shifted PWM Technique for Unequal and Equal Power Sharing in Quasi Z-Source Cascaded Multilevel Inverter for PV Systems, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 9, 1 (2021) 937-948.
57. Yadav, S. K., Mishra, N., Singh, B., Padmanaban, S. ve Blaabjerg, F., Modified SPWM technique for improved harmonic performance of single PV array fed

grid-tied five-level converter, IET Power Electronics, 13, 19 (2020) 4498-4506.

58. Ye, Y., Peng, W. ve Yi, Y., Analysis and Optimal Design of Switched-Capacitor Seven-Level Inverter With Hybrid PWM Algorithm, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 16, 8 (2020) 5276-5285.
59. Ahmadzadeh, T., Sabahi, M. ve Babaei, E., Modified PWM control method for neutral point clamped multilevel inverters, 2017 14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunication and Information Technology (ECTI-CON), (2017), 765-768.
60. Kumar, R., Kant, P. ve Singh, B., Modified PWM Technique for a Multi-Pulse Converter fed Multilevel Inverter Based IM Drive, 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020), (2020) 1-6.
61. Gurrola-Corrala, C., Segundo, J., Esparzab, M. ve Cruza, R., Optimal LCL-filter design method for grid-connected renewable energy sources, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 120 (2020) 1-14.
62. Sezen, S., Üç Fazlı Şebeke Bağlantılı Çok Seviyeli Evirici Kullanarak Aktif Filtreleme Yeteneğine Sahip Fotovoltaik Sistemin Tasarımı Ve Uygulanması, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2015.
63. Özkop, E., Yenilenebilir Enerji ve Güç Dönüştürücüleri, Ders Notları, Trabzon, 2020.
64. Kabalcı, E. ve Canbaz, R., Şebeke bağlantılı tek fazlı dokuz seviyeli asimetrik evirici tasarımı ve analizi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 5 (2017) 512-518.
65. Zhang, L., Sun, K. ve Xing, Y., A system-level control strategy of photovoltaic grid-tied generation systems for European efficiency enhancement, IEEE Transactions on Power Electronics, 29 7 (2014) 3445-3453.
66. IEEE (2018). IEEE application guide for IEEE std 1547 (TM), IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems (IEEE std 1547.2-2008). Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4816078>

6. EKLER

Ek 1: Benzetim sonuçları (2.2.1.1.2. Test-II)

Ek Tablo 6.1. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	V_{giriş} (V_{da,ort})	I_{giriş} (A_{da,ort})	V_{çıkış} (V_{rms})	I_{çıkış} (A_{rms})	P_{çıkış} (W)	THB (%) I_{çıkış}	η (%)
0.6	400	2.4155	172.95	5.4048	842	33.21	96.747
0.7	400	3.2559	201.29	6.2903	1157.1	30.71	97.224
0.8	400	4.2387	230.12	7.1911	1522.6	29.47	97.602
0.9	400	5.3028	257.74	8.0545	1937.4	26.74	97.874
1.0	400	6.3502	282.32	8.8224	2404.4	18.94	98.055
1.1	400	7.1037	298.75	9.3358	2717.8	16.20	98.154
1.2	400	7.6978	311.07	9.7211	2953.8	15.42	98.213
1.5	400	8.7158	331.17	10.349	3297.8	19.82	98.310
1.8	400	9.4646	345.22	10.788	3534.8	23.15	98.373
2.0	400	9.5708	347.15	10.849	3563.2	23.87	98.376

Ek Tablo 6.2. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	V_{giriş} (V_{da,ort})	I_{giriş} (A_{da,ort})	V_{çıkış} (V_{rms})	I_{çıkış} (A_{rms})	P_{çıkış} (W)	THB (%) I_{çıkış}	η (%)
0.6	400	2.3820	171.63	5.3634	845.38	29.81	96.608
0.7	400	3.2467	200.94	6.2793	1156.5	30.16	97.162
0.8	400	4.2305	229.85	7.1827	1523.0	28.98	97.561
0.9	400	5.2373	256.08	8.0024	1933.4	24.48	97.819
1.0	400	6.3478	282.22	8.8193	2398.2	19.46	98.024
1.1	400	7.1540	299.77	9.3679	2727.6	17.20	98.134
1.2	400	7.7042	311.18	9.7244	2941.7	16.93	98.193
1.5	400	8.7483	331.75	10.367	3310.8	19.72	98.286
1.8	400	9.3991	343.96	10.749	3506.1	23.34	98.336
2.0	400	9.6573	348.67	10.896	3583.6	24.53	98.350

Ek Tablo 6.3. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	V_{giriş} (V_{da,ort})	I_{giriş} (A_{da,ort})	V_{çıkış} (V_{rms})	I_{çıkış} (A_{rms})	P_{çıkış} (W)	THB (%) I_{çıkış}	η (%)
0.6	400	2.1908	164.37	5.1366	843.63	2.80	96.357
0.7	400	2.9881	192.52	6.0164	1157.4	2.73	96.910
0.8	400	3.9132	220.77	6.8991	1522.1	2.61	97.320
0.9	400	4.9507	248.78	7.7742	1933.1	2.19	97.668
1.0	400	6.1265	277.15	8.6608	2399.5	1.82	97.944
1.1	400	6.9705	295.84	9.2449	2730.9	3.86	98.086
1.2	400	7.5280	307.55	9.6108	2940.7	7.17	98.158
1.5	400	8.6114	329.11	10.285	3311.0	14.94	98.265
1.8	400	9.2772	341.68	10.678	3505.1	20.22	98.315
2.0	400	9.5999	347.61	10.863	3588.0	22.91	98.336

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.4. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.1838	164.12	5.1288	841.41	2.01	96.349
0.7	400	2.9920	192.68	6.0212	1159.8	1.67	96.910
0.8	400	3.9154	220.88	6.9026	1524.3	1.47	97.328
0.9	400	4.9635	249.12	7.7851	1939.1	1.38	97.658
1.0	400	6.1353	277.35	8.6672	2403.6	1.09	97.928
1.1	400	6.9500	295.40	9.2311	2723.4	3.56	98.077
1.2	400	7.5716	307.82	9.6195	2946.0	7.17	98.153
1.5	400	8.6304	329.48	10.296	3317.2	15.05	98.262
1.8	400	9.2818	341.77	10.680	3506.5	20.23	98.313
2.0	400	9.5982	347.58	10.862	3587.8	22.88	98.335

Ek Tablo 6.5. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.1962	164.60	5.1437	846.15	2.58	96.325
0.7	400	2.9985	192.89	6.0279	1162.3	2.09	96.886
0.8	400	3.9189	220.99	6.9059	1525.7	1.74	97.306
0.9	400	4.9717	249.33	7.7917	1942.3	1.54	97.633
1.0	400	6.1509	277.71	8.6786	2409.7	1.36	97.906
1.1	400	6.9611	295.63	9.2384	2727.6	3.62	98.066
1.2	400	7.5274	307.53	9.6103	2940.8	7.05	98.144
1.5	400	8.6290	329.44	10.295	3316.7	15.06	98.258
1.8	400	9.2808	341.75	10.680	3506.3	20.23	98.310
2.0	400	9.6017	347.64	10.864	3588.6	22.86	98.333

Ek Tablo 6.6. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.1969	164.62	5.1444	845.83	3.65	96.295
0.7	400	2.9604	191.67	5.9896	1147.2	2.76	96.831
0.8	400	3.9261	221.20	6.9125	1528.4	2.30	97.277
0.9	400	4.9325	248.36	7.7613	1927.0	1.88	97.580
1.0	400	6.1549	277.81	8.6817	2411.3	1.65	97.879
1.1	400	6.9648	295.71	9.2409	2728.9	3.66	98.052
1.2	400	7.5209	307.40	9.6063	2938.4	7.09	98.134
1.5	400	8.6234	329.34	10.292	3314.9	14.95	98.252
1.8	400	9.2840	341.80	10.681	3507.0	20.24	98.307
2.0	400	9.6035	347.67	10.865	3589.0	22.88	98.330

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.7. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-I, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.1740	163.75	5.1171	836.68	4.04	96.258
0.7	400	2.9217	190.35	5.9485	1130.8	3.83	96.791
0.8	400	3.9144	220.92	6.9038	1523.6	3.40	97.200
0.9	400	5.0073	250.26	7.8205	1955.8	2.74	97.539
1.0	400	6.1683	278.13	8.6916	2416.4	2.16	97.848
1.1	400	6.9702	295.83	9.2446	2730.8	3.83	98.036
1.2	400	7.5281	307.55	9.6109	2940.9	7.12	98.123
1.5	400	8.6223	329.31	10.291	3314.6	14.99	98.247
1.8	400	9.2853	341.83	10.682	3507.4	20.29	98.303
2.0	400	9.6011	347.63	10.864	3588.5	22.90	98.327

Ek Tablo 6.8. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.4155	172.95	5.4048	842	33.21	96.747
0.7	400	3.2559	201.29	6.2903	1157.1	30.71	97.224
0.8	400	4.2387	230.12	7.1911	1522.6	29.47	97.602
0.9	400	5.3028	257.74	8.0545	1937.4	26.74	97.874
1.0	400	6.3502	282.32	8.8224	2404.4	18.94	98.055
1.1	400	7.1037	298.75	9.3358	2717.8	16.20	98.154
1.2	400	7.6978	311.07	9.7211	2953.8	15.42	98.213
1.5	400	8.7158	331.17	10.349	3297.8	19.82	98.310
1.8	400	9.4646	345.22	10.788	3534.8	23.15	98.373
2.0	400	9.5708	347.15	10.849	3563.2	23.87	98.376

Ek Tablo 6.9. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.3820	171.63	5.3634	845.38	29.81	96.608
0.7	400	3.2467	200.94	6.2793	1156.5	30.16	97.162
0.8	400	4.2305	229.85	7.1827	1523.0	28.98	97.561
0.9	400	5.2373	256.08	8.0024	1933.4	24.48	97.819
1.0	400	6.3478	282.22	8.8193	2398.2	19.46	98.024
1.1	400	7.1540	299.77	9.3679	2727.6	17.20	98.134
1.2	400	7.7042	311.18	9.7244	2941.7	16.93	98.193
1.5	400	8.7483	331.75	10.367	3310.8	19.72	98.286
1.8	400	9.3991	343.96	10.749	3506.1	23.34	98.336
2.0	400	9.6573	348.67	10.896	3583.6	24.53	98.350

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.10. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1908	164.37	5.1366	843.63	2.80	96.357
0.7	400	2.9881	192.52	6.0164	1157.4	2.73	96.910
0.8	400	3.9132	220.77	6.8991	1522.1	2.61	97.320
0.9	400	4.9507	248.78	7.7742	1933.1	2.19	97.668
1.0	400	6.1265	277.15	8.6608	2399.5	1.82	97.944
1.1	400	6.9705	295.84	9.2449	2730.9	3.86	98.086
1.2	400	7.5280	307.55	9.6108	2940.7	7.17	98.158
1.5	400	8.6114	329.11	10.285	3311.0	14.94	98.265
1.8	400	9.2772	341.68	10.678	3505.1	20.22	98.315
2.0	400	9.5999	347.61	10.863	3588.0	22.91	98.336

Ek Tablo 6.11. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1838	164.12	5.1288	841.41	2.01	96.349
0.7	400	2.9920	192.68	6.0212	1159.8	1.67	96.910
0.8	400	3.9154	220.88	6.9026	1524.3	1.47	97.328
0.9	400	4.9635	249.12	7.7851	1939.1	1.38	97.658
1.0	400	6.1353	277.35	8.6672	2403.6	1.09	97.928
1.1	400	6.9500	295.40	9.2311	2723.4	3.56	98.077
1.2	400	7.5716	307.82	9.6195	2946.0	7.17	98.153
1.5	400	8.6304	329.48	10.296	3317.2	15.05	98.262
1.8	400	9.2818	341.77	10.680	3506.5	20.23	98.313
2.0	400	9.5982	347.58	10.862	3587.8	22.88	98.335

Ek Tablo 6.12. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1962	164.60	5.1437	846.15	2.58	96.325
0.7	400	2.9985	192.89	6.0279	1162.3	2.09	96.886
0.8	400	3.9189	220.99	6.9059	1525.7	1.74	97.306
0.9	400	4.9717	249.33	7.7917	1942.3	1.54	97.633
1.0	400	6.1509	277.71	8.6786	2409.7	1.36	97.906
1.1	400	6.9611	295.63	9.2384	2727.6	3.62	98.066
1.2	400	7.5274	307.53	9.6103	2940.8	7.05	98.144
1.5	400	8.6290	329.44	10.295	3316.7	15.06	98.258
1.8	400	9.2808	341.75	10.680	3506.3	20.23	98.310
2.0	400	9.6017	347.64	10.864	3588.6	22.86	98.333

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.13. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1969	164.62	5.1444	845.83	3.65	96.295
0.7	400	2.9604	191.67	5.9896	1147.2	2.76	96.831
0.8	400	3.9261	221.20	6.9125	1528.4	2.30	97.277
0.9	400	4.9325	248.36	7.7613	1927.0	1.88	97.580
1.0	400	6.1549	277.81	8.6817	2411.3	1.65	97.879
1.1	400	6.9648	295.71	9.2409	2728.9	3.66	98.052
1.2	400	7.5209	307.40	9.6063	2938.4	7.09	98.134
1.5	400	8.6234	329.34	10.292	3314.9	14.95	98.252
1.8	400	9.2840	341.80	10.681	3507.0	20.24	98.307
2.0	400	9.6035	347.67	10.865	3589.0	22.88	98.330

Ek Tablo 6.14. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-II, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1740	163.75	5.1171	836.68	4.04	96.258
0.7	400	2.9217	190.35	5.9485	1130.8	3.83	96.791
0.8	400	3.9144	220.92	6.9038	1523.6	3.40	97.200
0.9	400	5.0073	250.26	7.8205	1955.8	2.74	97.539
1.0	400	6.1683	278.13	8.6916	2416.4	2.16	97.848
1.1	400	6.9702	295.83	9.2446	2730.8	3.83	98.036
1.2	400	7.5281	307.55	9.6109	2940.9	7.12	98.123
1.5	400	8.6223	329.31	10.291	3314.6	14.99	98.247
1.8	400	9.2853	341.83	10.682	3507.4	20.29	98.303
2.0	400	9.6011	347.63	10.864	3588.5	22.90	98.327

Ek Tablo 6.15. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.3820	171.63	5.3635	845.38	29.82	96.611
0.7	400	3.2452	200.93	6.2792	1156.5	30.16	97.168
0.8	400	4.2303	229.84	7.1826	1522.8	28.99	97.560
0.9	400	5.2371	256.07	8.0023	1933.3	24.48	97.821
1.0	400	6.3476	282.22	8.8192	2398.1	19.46	98.026
1.1	400	7.1539	299.77	9.3678	2727.5	17.20	98.135
1.2	400	7.7033	311.15	9.7235	2941.4	16.90	98.189
1.5	400	8.7479	331.74	10.367	3310.8	19.70	98.286
1.8	400	9.3980	343.92	10.748	3505.5	23.33	98.331
2.0	400	9.6571	348.67	10.896	3583.6	24.52	98.350

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.16. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.1813	164.02	5.1255	837.76	5.91	96.358
0.7	400	2.9938	192.75	6.0233	1156.9	5.93	96.947
0.8	400	3.9217	221.09	6.9090	1522.6	5.64	97.374
0.9	400	4.9697	249.30	7.7906	1937.7	4.80	97.699
1.0	400	6.1361	277.38	8.6680	2400.7	3.89	97.958
1.1	400	6.9518	295.44	9.2324	2721.3	4.82	98.091
1.2	400	7.5373	307.74	9.6169	2941.9	7.73	98.162
1.5	400	8.6205	329.29	10.290	3312.1	15.18	98.266
1.8	400	9.2839	341.81	10.682	3505.4	20.39	98.315
2.0	400	9.5995	347.61	10.863	3586.4	22.99	98.337

Ek Tablo 6.17. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.1839	164.12	5.1287	841.36	2.01	96.350
0.7	400	2.9910	192.65	6.0204	1159.6	1.67	96.939
0.8	400	3.9137	220.86	6.9018	1524.0	1.47	97.367
0.9	400	4.9615	249.08	7.7839	1938.5	1.38	97.692
1.0	400	6.1339	277.32	8.6663	2403.1	1.09	97.953
1.1	400	6.9491	295.38	9.2306	2723.1	3.56	98.089
1.2	400	7.5411	307.82	9.6193	2945.9	7.17	98.160
1.5	400	8.6301	329.47	10.296	3317.1	15.05	98.266
1.8	400	9.2816	341.77	10.680	3506.5	20.23	98.316
2.0	400	9.5981	347.58	10.862	3587.8	22.88	98.337

Ek Tablo 6.18. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.1966	164.58	5.1431	845.41	3.66	96.324
0.7	400	2.9576	191.53	5.9853	1145.6	2.76	96.913
0.8	400	3.9235	221.12	6.9099	1527.2	2.31	97.348
0.9	400	4.9277	248.19	7.7560	1924.4	1.88	97.670
1.0	400	6.1517	277.71	8.6786	2409.6	1.65	97.939
1.1	400	6.9632	295.67	9.2396	2728.2	3.66	98.079
1.2	400	7.5196	307.36	9.6051	2937.8	7.09	98.152
1.5	400	8.6227	329.32	10.291	3314.7	14.95	98.261
1.8	400	9.2836	341.80	10.681	3506.9	20.24	98.312
2.0	400	9.6031	347.67	10.865	3588.9	22.88	98.334

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.19. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.2170	165.35	5.1671	852.74	4.65	96.306
0.7	400	3.0182	193.51	6.0471	1168.4	4.09	96.902
0.8	400	3.9489	221.82	6.9320	1535.7	3.77	97.331
0.9	400	4.9948	249.88	7.8088	1949.2	3.39	97.655
1.0	400	6.1704	278.13	8.6915	2415.6	2.83	97.928
1.1	400	6.9751	295.91	9.2472	2731.9	4.10	98.071
1.2	400	7.5373	307.72	9.6163	2943.7	7.25	98.145
1.5	400	8.6302	329.46	10.296	3316.9	15.02	98.256
1.8	400	9.2846	341.81	10.682	3507.2	20.27	98.309
2.0	400	9.6078	347.75	10.867	3590.1	22.90	98.331

Ek Tablo 6.20. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.1775	163.80	5.1188	837.85	3.19	96.266
0.7	400	2.9992	192.86	6.0268	1161.7	2.56	96.878
0.8	400	3.8952	220.26	6.8830	1515.6	2.02	97.307
0.9	400	4.9679	249.17	7.7866	1939.7	1.76	97.633
1.0	400	6.1183	276.91	8.6533	2395.7	1.51	97.911
1.1	400	6.9485	295.32	9.2288	2722.1	3.57	98.061
1.2	400	7.5191	307.33	9.6041	2937.2	7.02	98.138
1.5	400	8.6125	329.11	10.285	3311.3	14.94	98.252
1.8	400	9.2797	341.71	10.678	3505.7	20.23	98.306
2.0	400	9.5989	347.58	10.862	3587.8	22.86	98.328

Ek Tablo 6.21. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-III, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.2057	164.90	5.1531	843.87	9.37	96.272
0.7	400	2.9622	191.64	5.9889	1142.7	6.47	96.865
0.8	400	4.0415	224.42	7.0131	1568.6	6.29	97.306
0.9	400	4.7713	244.10	7.6282	1857.3	5.35	97.608
1.0	400	6.2273	279.41	8.7316	2435.6	4.38	97.913
1.1	400	7.0014	296.46	9.2644	2739.6	5.16	98.058
1.2	400	7.5582	308.14	9.6294	2948.9	7.95	98.135
1.5	400	8.6401	329.64	10.301	3317.7	15.37	98.248
1.8	400	9.2965	342.02	10.688	3509.9	20.39	98.303
2.0	400	9.6139	347.85	10.870	3591.3	22.97	98.326

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.22. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.2399	200.64	6.2699	1132.6	33.26	97.075
0.7	400	4.3975	234.25	7.3202	1555.7	31.95	97.499
0.8	400	5.7197	267.69	8.3654	2043.2	30.96	97.880
0.9	400	7.1287	299.17	9.3490	2598.0	27.67	98.101
1.0	400	8.5612	328.18	10.256	3216.9	21.51	98.284
1.1	400	9.2225	340.73	10.648	3456.8	22.26	98.349
1.2	400	9.5507	346.79	10.837	3558.6	23.68	98.374
1.5	400	9.7938	351.18	10.974	3620.2	25.42	98.382
1.8	400	10.003	354.91	11.091	3668.3	27.03	98.387
2.0	400	11.321	377.58	11.799	3880.9	38.46	98.384

Ek Tablo 6.23. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.1779	198.62	6.2068	1133.5	29.61	96.978
0.7	400	4.4308	235.15	7.3484	1553.0	33.54	97.507
0.8	400	5.7652	268.74	8.3981	2047.6	31.96	97.863
0.9	400	7.0885	298.28	9.3214	2600.4	26.32	98.064
1.0	400	8.5523	327.96	10.249	3213.9	21.40	98.253
1.1	400	9.2318	340.85	10.652	3457.6	22.37	98.319
1.2	400	9.5656	347.00	10.844	3556.3	24.10	98.343
1.5	400	10.195	358.30	11.197	3707.2	28.67	98.380
1.8	400	10.594	365.29	11.415	3781.0	32.07	98.403
2.0	400	10.829	369.35	11.542	3823.4	33.91	98.421

Ek Tablo 6.24. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0058	192.90	6.0283	1134.0	15.98	96.755
0.7	400	4.1185	226.16	7.0675	1556.9	16.33	97.136
0.8	400	5.3837	259.23	8.1010	2044.3	16.51	97.579
0.9	400	6.8072	292.13	9.1292	2597.6	16.32	97.951
1.0	400	8.4245	325.43	10.170	3224.5	16.24	98.208
1.1	400	9.1280	338.89	10.590	3462.9	19.09	98.295
1.2	400	9.4676	345.18	10.787	3554.2	21.83	98.322
1.5	400	10.147	357.43	11.170	3710.0	27.59	98.368
1.8	400	10.518	363.95	11.373	3778.7	30.87	98.389
2.0	400	10.720	367.45	11.483	3811.2	32.72	98.400

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.25. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0073	193.04	6.0325	1134.3	16.30	96.781
0.7	400	4.0945	225.77	7.0552	1551.9	16.30	97.249
0.8	400	5.3726	259.14	8.0982	2043.2	16.45	97.638
0.9	400	6.8146	292.32	9.1351	2600.7	16.38	97.947
1.0	400	8.4416	325.77	10.180	3230.0	16.32	98.195
1.1	400	9.1285	338.90	10.591	3463.1	19.10	98.291
1.2	400	9.4717	345.26	10.789	3555.5	21.86	98.321
1.5	400	10.141	357.33	11.166	3709.0	27.56	98.366
1.8	400	10.533	364.21	11.382	3781.5	31.01	98.389
2.0	400	10.710	367.29	11.478	3809.9	32.65	98.398

Ek Tablo 6.26. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0483	194.39	6.0746	1153.5	15.22	96.773
0.7	400	4.1447	227.23	7.1010	1574.4	15.76	97.244
0.8	400	5.3871	259.54	8.1105	2051.6	16.19	97.615
0.9	400	6.8151	292.35	9.1359	2601.1	16.42	97.914
1.0	400	8.4129	325.22	10.163	3218.2	16.49	98.169
1.1	400	9.1276	338.82	10.588	3462.1	19.08	98.286
1.2	400	9.4718	345.26	10.789	3555.5	21.82	98.317
1.5	400	10.138	357.27	11.165	3708.3	27.51	98.365
1.8	400	10.519	363.96	11.374	3779.1	30.91	98.387
2.0	400	10.704	367.19	11.475	3809.0	32.59	98.397

Ek Tablo 6.27. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0709	195.11	6.0972	1163.1	15.08	96.761
0.7	400	4.0150	223.64	6.9889	1519.3	17.02	97.176
0.8	400	5.4556	261.21	8.1627	2052.0	15.33	97.596
0.9	400	6.7247	290.43	9.0758	2565.0	16.65	97.866
1.0	400	8.4838	326.67	10.209	3251.9	16.11	98.142
1.1	400	9.1205	338.74	10.586	3460.9	19.02	98.281
1.2	400	9.4826	345.45	10.795	3558.3	21.90	98.313
1.5	400	10.137	357.26	11.165	3708.2	27.48	98.362
1.8	400	10.525	364.08	11.378	3780.2	30.94	98.386
2.0	400	10.711	367.31	11.478	3810.1	32.63	98.396

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.28. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-IV, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.9647	191.65	5.9890	1117.5	16.44	96.745
0.7	400	3.9318	221.19	6.9123	1484.6	17.27	97.148
0.8	400	5.3260	258.18	8.0680	2023.2	17.24	97.465
0.9	400	6.8957	294.18	9.1930	2634.3	16.50	97.781
1.0	400	8.5529	328.01	10.250	3282.7	15.39	98.122
1.1	400	9.1264	338.86	10.589	3462.6	19.05	98.275
1.2	400	9.4808	345.42	10.794	3557.9	21.90	98.309
1.5	400	10.138	357.28	11.165	3708.4	27.49	98.360
1.8	400	10.527	364.10	11.378	3780.4	30.94	98.384
2.0	400	10.706	367.22	11.476	3809.3	32.55	98.395

Ek Tablo 6.29. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.2399	200.64	6.2699	1132.6	33.26	97.075
0.7	400	4.3975	234.25	7.3202	1555.7	31.95	97.499
0.8	400	5.7197	267.69	8.3654	2043.2	30.96	97.880
0.9	400	7.1287	299.17	9.3490	2598.0	27.67	98.101
1.0	400	8.5612	328.18	10.256	3216.9	21.51	98.284
1.1	400	9.2225	340.73	10.648	3456.8	22.26	98.349
1.2	400	9.5507	346.79	10.837	3558.6	23.68	98.374
1.5	400	9.7938	351.18	10.974	3620.2	25.42	98.382
1.8	400	10.003	354.91	11.091	3668.3	27.03	98.387
2.0	400	11.321	377.58	11.799	3880.9	38.46	98.384

Ek Tablo 6.30. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.1779	198.62	6.2068	1133.5	29.61	96.978
0.7	400	4.4308	235.15	7.3484	1553.0	33.54	97.507
0.8	400	5.7652	268.74	8.3981	2047.6	31.96	97.863
0.9	400	7.0885	298.28	9.3214	2600.4	26.32	98.064
1.0	400	8.5523	327.96	10.249	3213.9	21.40	98.253
1.1	400	9.2318	340.85	10.652	3457.6	22.37	98.319
1.2	400	9.5656	347.00	10.844	3556.3	24.10	98.343
1.5	400	10.195	358.30	11.197	3707.2	28.67	98.380
1.8	400	10.594	365.29	11.415	3781.0	32.07	98.403
2.0	400	10.829	369.35	11.542	3823.4	33.91	98.421

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.31. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	3.0058	192.90	6.0283	1134.0	15.98	96.755
0.7	400	4.1185	226.16	7.0675	1556.9	16.33	97.136
0.8	400	5.3837	259.23	8.1010	2044.3	16.51	97.579
0.9	400	6.8072	292.13	9.1292	2597.6	16.32	97.951
1.0	400	8.4245	325.43	10.170	3224.5	16.24	98.208
1.1	400	9.1280	338.89	10.590	3462.9	19.09	98.295
1.2	400	9.4676	345.18	10.787	3554.2	21.83	98.322
1.5	400	10.147	357.43	11.170	3710.0	27.59	98.368
1.8	400	10.518	363.95	11.373	3778.7	30.87	98.389
2.0	400	10.720	367.45	11.483	3811.2	32.72	98.400

Ek Tablo 6.32. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	3.0073	193.04	6.0325	1134.3	16.30	96.781
0.7	400	4.0945	225.77	7.0552	1551.9	16.30	97.249
0.8	400	5.3726	259.14	8.0982	2043.2	16.45	97.638
0.9	400	6.8146	292.32	9.1351	2600.7	16.38	97.947
1.0	400	8.4416	325.77	10.180	3230.0	16.32	98.195
1.1	400	9.1285	338.90	10.591	3463.1	19.10	98.291
1.2	400	9.4717	345.26	10.789	3555.5	21.86	98.321
1.5	400	10.141	357.33	11.166	3709.0	27.56	98.366
1.8	400	10.533	364.21	11.382	3781.5	31.01	98.389
2.0	400	10.710	367.29	11.478	3809.9	32.65	98.398

Ek Tablo 6.33. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	3.0483	194.39	6.0746	1153.5	15.22	96.773
0.7	400	4.1447	227.23	7.1010	1574.4	15.76	97.244
0.8	400	5.3871	259.54	8.1105	2051.6	16.19	97.615
0.9	400	6.8151	292.35	9.1359	2601.1	16.42	97.914
1.0	400	8.4129	325.22	10.163	3218.2	16.49	98.169
1.1	400	9.1276	338.82	10.588	3462.1	19.08	98.286
1.2	400	9.4718	345.26	10.789	3555.5	21.82	98.317
1.5	400	10.138	357.27	11.165	3708.3	27.51	98.365
1.8	400	10.519	363.96	11.374	3779.1	30.91	98.387
2.0	400	10.704	367.19	11.475	3809.0	32.59	98.397

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.34. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0709	195.11	6.0972	1163.1	15.08	96.761
0.7	400	4.0150	223.64	6.9889	1519.3	17.02	97.176
0.8	400	5.4556	261.21	8.1627	2052.0	15.33	97.596
0.9	400	6.7247	290.43	9.0758	2565.0	16.65	97.866
1.0	400	8.4838	326.67	10.209	3251.9	16.11	98.142
1.1	400	9.1205	338.74	10.586	3460.9	19.02	98.281
1.2	400	9.4826	345.45	10.795	3558.3	21.90	98.313
1.5	400	10.137	357.26	11.165	3708.2	27.48	98.362
1.8	400	10.525	364.08	11.378	3780.2	30.94	98.386
2.0	400	10.711	367.31	11.478	3810.1	32.63	98.396

Ek Tablo 6.35. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-V, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.9647	191.65	5.9890	1117.5	16.44	96.745
0.7	400	3.9318	221.19	6.9123	1484.6	17.27	97.148
0.8	400	5.3260	258.18	8.0680	2023.2	17.24	97.465
0.9	400	6.8957	294.18	9.1930	2634.3	16.50	97.781
1.0	400	8.5529	328.01	10.250	3282.7	15.39	98.122
1.1	400	9.1264	338.86	10.589	3462.6	19.05	98.275
1.2	400	9.4808	345.42	10.794	3557.9	21.90	98.309
1.5	400	10.138	357.28	11.165	3708.4	27.49	98.360
1.8	400	10.527	364.10	11.378	3780.4	30.94	98.384
2.0	400	10.706	367.22	11.476	3809.3	32.55	98.395

Ek Tablo 6.36. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.1778	198.62	6.2068	1133.5	29.60	96.979
0.7	400	4.4288	235.12	7.3476	1553.1	33.50	97.519
0.8	400	5.7642	268.70	8.3970	2047.4	31.93	97.857
0.9	400	7.0850	298.23	9.3195	2600.1	26.26	98.071
1.0	400	8.5513	327.93	10.248	3213.8	21.38	98.252
1.1	400	9.2317	340.85	10.652	3457.6	22.37	98.319
1.2	400	9.5648	346.98	10.843	3556.0	24.09	98.340
1.5	400	10.194	358.29	11.197	3707.3	28.66	98.380
1.8	400	10.586	365.02	11.407	3778.9	31.93	98.366
2.0	400	10.805	368.60	11.519	3816.4	33.58	98.318

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.37. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0027	192.92	6.0287	1131.0	16.85	96.836
0.7	400	4.1013	226.06	7.0642	1551.7	17.05	97.342
0.8	400	5.3863	259.55	8.1110	2046.0	17.03	97.710
0.9	400	6.7969	291.98	9.1244	2591.7	16.75	97.991
1.0	400	8.4064	325.09	10.159	3215.2	16.49	98.219
1.1	400	9.1269	338.87	10.590	346.08	19.22	98.297
1.2	400	9.4777	345.37	10.793	355.53	22.03	98.323
1.5	400	10.134	357.21	11.163	3705.8	27.56	98.367
1.8	400	10.530	364.15	11.380	3778.7	31.09	98.388
2.0	400	10.734	367.69	11.490	3811.0	32.95	98.396

Ek Tablo 6.38. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0053	193.00	6.0314	1133.8	16.30	96.829
0.7	400	4.0897	225.73	7.0539	1551.3	16.30	97.333
0.8	400	5.3682	259.10	8.0970	2042.7	16.45	97.702
0.9	400	6.8119	292.30	9.1342	2600.3	16.38	97.984
1.0	400	8.4400	325.74	10.179	3229.5	16.32	98.214
1.1	400	9.1281	338.89	10.590	3463.0	19.10	98.295
1.2	400	9.4712	345.25	10.789	3555.5	21.86	98.323
1.5	400	10.140	357.32	11.166	3708.9	27.56	98.367
1.8	400	10.533	364.21	11.382	3781.5	31.01	98.390
2.0	400	10.710	367.29	11.478	3809.9	32.65	98.399

Ek Tablo 6.39. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0694	195.07	6.0960	1162.7	15.07	96.821
0.7	400	4.0079	223.40	6.9813	1516.1	17.01	97.311
0.8	400	5.4505	261.09	8.1590	2080.2	15.33	97.690
0.9	400	6.7167	290.19	9.0685	2561.0	16.64	97.963
1.0	400	8.4778	326.47	10.202	3247.6	16.11	98.205
1.1	400	9.1199	338.73	10.585	3460.7	19.02	98.291
1.2	400	9.4820	345.44	10.795	3558.1	21.90	98.320
1.5	400	10.137	357.26	11.164	3708.2	27.48	98.365
1.8	400	10.525	364.08	11.377	3780.2	30.94	98.388
2.0	400	10.711	367.30	11.478	3810.1	32.63	98.398

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.40. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.0796	195.39	6.1061	1165.7	15.39	96.810
0.7	400	4.2022	228.82	7.1507	1598.9	15.29	97.311
0.8	400	5.4972	262.20	8.1937	2099.7	15.26	97.676
0.9	400	6.9685	295.62	9.2381	2669.0	15.24	97.952
1.0	400	8.6113	329.07	10.283	3306.9	15.24	98.204
1.1	400	9.1219	338.77	10.586	3461.3	19.06	98.287
1.2	400	9.4820	345.44	10.795	3558.2	21.92	98.316
1.5	400	10.139	357.29	11.165	3708.6	27.50	98.363
1.8	400	10.532	364.20	11.381	3781.4	30.98	98.386
2.0	400	10.713	367.33	11.279	3810.3	32.65	98.396

Ek Tablo 6.41. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	2.9522	191.21	5.9752	1110.9	17.08	96.777
0.7	400	4.1479	227.27	7.1023	1575.7	15.36	97.290
0.8	400	5.3146	257.71	8.0533	2019.6	16.72	97.647
0.9	400	6.8530	293.08	9.1589	2616.9	15.84	97.928
1.0	400	8.3709	324.32	10.135	3201.0	16.45	98.186
1.1	400	9.1182	338.68	10.584	3459.8	18.98	98.282
1.2	400	9.4740	345.28	10.790	3555.9	21.84	98.313
1.5	400	10.137	357.25	11.164	3708.1	27.49	98.360
1.8	400	10.518	363.94	11.373	3778.8	30.88	98.384
2.0	400	10.710	367.27	11.477	3809.8	32.60	98.395

Ek Tablo 6.42. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VI, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{giriş}$ ($V_{da,ort}$)	$I_{giriş}$ ($A_{da,ort}$)	$V_{çıkış}$ (V_{rms})	$I_{çıkış}$ (A_{rms})	$P_{çıkış}$ (W)	THB (%) $I_{çıkış}$	η (%)
0.6	400	3.1152	196.53	6.1415	1176.6	16.99	96.795
0.7	400	3.9558	221.88	6.9337	1490.8	17.97	97.271
0.8	400	5.8077	269.56	8.4236	2228.1	13.92	97.658
0.9	400	6.2940	280.72	8.7726	2378.6	18.81	97.897
1.0	400	8.6491	329.78	10.306	3318.5	15.58	98.198
1.1	400	9.1484	339.25	10.602	3467.9	19.29	98.280
1.2	400	9.4968	345.71	10.803	3561.5	22.05	98.311
1.5	400	10.147	357.44	11.170	3710.3	27.58	98.359
1.8	400	10.533	364.22	11.382	3781.6	31.01	98.383
2.0	400	10.713	367.32	11.479	3810.2	32.67	98.394

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.43. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.6542	181.34	5.6668	953.10	27.96	96.795
0.7	400	3.4469	207.16	6.4738	1237.5	28.94	97.272
0.8	400	4.2793	231.22	7.2256	1555.0	27.27	97.605
0.9	400	5.2433	256.28	8.0088	1938.3	24.27	97.864
1.0	400	6.3724	282.84	8.8387	2402.9	20.09	98.076
1.1	400	7.1377	299.50	9.3594	2715.0	18.01	98.181
1.2	400	7.7011	311.20	9.7248	2946.0	16.52	98.243
1.5	400	8.2268	321.71	10.054	3143.9	16.96	98.288
1.8	400	9.0154	336.77	10.524	3395.3	20.94	98.281
2.0	400	9.0240	336.93	10.529	3396.9	21.05	98.279

Ek Tablo 6.44. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.6021	179.44	5.6075	939.06	26.74	96.679
0.7	400	3.3535	204.23	6.3821	1198.6	29.57	97.169
0.8	400	4.2722	230.96	7.2175	1537.1	29.06	97.550
0.9	400	5.2579	256.57	8.0177	1937.8	24.80	97.810
1.0	400	6.3732	282.78	8.8367	2404.7	19.78	98.020
1.1	400	7.1593	299.88	9.3712	2726.5	17.52	98.133
1.2	400	7.6350	309.77	9.6804	2916.3	16.83	98.190
1.5	400	8.4658	326.31	10.197	3233.5	17.05	98.260
1.8	400	8.8602	333.88	10.434	3364.9	18.78	98.291
2.0	400	8.8707	334.07	10.440	3368.4	18.82	98.291

Ek Tablo 6.45. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.4649	174.55	5.4546	939.76	11.40	96.578
0.7	400	3.1056	196.36	6.1362	1200.0	6.34	97.008
0.8	400	3.9539	222.00	6.9376	1538.2	3.49	97.390
0.9	400	4.9606	249.07	7.7833	1937.5	2.29	97.705
1.0	400	6.1270	277.17	8.6616	2399.9	1.85	97.962
1.1	400	6.9479	295.36	9.2299	2722.0	3.88	98.094
1.2	400	7.4822	306.61	9.5815	2922.8	7.16	98.161
1.5	400	8.3969	324.97	10.155	3237.3	13.92	98.253
1.8	400	8.7820	332.38	10.387	3352.7	17.25	98.283
2.0	400	8.8604	333.87	10.433	3373.1	18.09	98.286

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.46. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.4676	174.64	5.4575	940.67	11.39	96.586
0.7	400	3.1217	196.87	6.1520	1206.5	6.17	97.014
0.8	400	3.9615	222.1	6.9439	1541.7	2.88	97.393
0.9	400	4.9609	249.06	7.7833	1938.1	1.40	97.704
1.0	400	6.1164	276.92	8.6537	2396.1	1.07	97.961
1.1	400	6.9515	295.43	9.2321	2724.0	3.60	98.093
1.2	400	7.4896	306.76	9.5861	2926.4	6.97	98.161
1.5	400	8.3952	324.93	10.154	3237.1	13.91	98.254
1.8	400	8.7655	332.07	10.377	3347.4	17.15	98.283
2.0	400	8.8546	333.76	10.430	3371.9	18.00	98.287

Ek Tablo 6.47. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.4649	174.53	5.4542	939.81	11.26	96.585
0.7	400	3.1133	196.59	6.1434	1203.4	5.93	97.012
0.8	400	3.9484	221.82	6.9320	1536.5	2.70	97.391
0.9	400	4.9591	249.00	7.7813	1937.2	1.35	97.701
1.0	400	6.1114	276.79	8.6496	2393.8	1.15	97.960
1.1	400	6.9385	295.14	9.2231	2718.8	3.57	98.090
1.2	400	7.4796	306.54	9.5795	2922.6	6.96	98.158
1.5	400	8.3869	324.76	10.149	3234.4	13.89	98.252
1.8	400	8.7722	332.20	10.381	3349.4	17.22	98.283
2.0	400	8.8530	333.73	10.429	3371.5	17.97	98.286

Ek Tablo 6.48. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.4647	174.52	5.4539	939.77	11.25	96.585
0.7	400	3.1075	196.40	6.1374	1201.0	5.86	97.012
0.8	400	3.9469	221.77	6.9304	1535.8	2.70	97.389
0.9	400	4.9476	248.70	7.7718	1932.4	1.40	97.696
1.0	400	6.1137	276.83	8.6511	2394.6	1.22	97.958
1.1	400	6.9411	295.19	9.2246	2719.6	3.60	98.088
1.2	400	7.4690	306.32	9.5724	2918.5	6.93	98.156
1.5	400	8.4012	325.04	10.157	3239.0	13.92	98.251
1.8	400	8.7803	332.35	10.386	3351.8	17.24	98.282
2.0	400	8.8544	333.76	10.430	3371.8	17.98	98.285

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.49. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VII, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.4396	173.61	5.4252	929.11	11.65	96.591
0.7	400	3.1155	196.64	6.1450	1203.8	6.05	97.021
0.8	400	3.9390	221.53	6.9229	1532.4	2.85	97.386
0.9	400	4.9303	248.24	7.7575	1925.3	1.65	97.697
1.0	400	6.1149	276.85	8.6516	2394.9	1.27	97.956
1.1	400	6.9388	295.13	9.2229	2718.7	3.57	98.086
1.2	400	7.4762	306.46	9.5769	2921.2	6.97	98.154
1.5	400	8.3982	324.98	10.155	3237.9	13.92	98.249
1.8	400	8.7753	332.25	10.383	3350.2	17.23	98.281
2.0	400	8.8560	333.78	10.431	3372.1	17.99	98.285

Ek Tablo 6.50. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	3.5884	211.88	6.6212	852.50	80.27	97.746
0.7	400	4.2695	231.25	7.2264	1166.6	65.75	97.855
0.8	400	4.9409	248.86	7.7769	1528.9	51.57	97.927
0.9	400	5.8543	271.08	8.4714	1941.6	42.72	98.067
1.0	400	6.8778	294.02	9.1881	2411.1	34.71	98.197
1.1	400	7.6132	309.44	9.6699	2731.9	30.87	98.263
1.2	400	8.0828	318.88	9.9649	2946.9	27.96	98.287
1.5	400	9.0206	336.99	10.531	3311.4	26.76	98.352
1.8	400	9.6001	347.62	10.863	3502.5	27.97	98.360
2.0	400	9.8350	351.93	10.998	3587.3	28.10	98.386

Ek Tablo 6.51. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	3.1824	199.27	6.2272	852.91	67.52	97.480
0.7	400	3.8596	219.62	6.8631	1161.7	54.52	97.630
0.8	400	4.6265	240.62	7.5194	1527.7	42.89	97.772
0.9	400	5.5363	263.44	8.2325	1939.9	34.38	97.935
1.0	400	6.6175	288.28	9.0086	2403.5	28.37	98.110
1.1	400	7.3870	304.68	9.5212	2729.1	25.09	98.186
1.2	400	7.9127	315.43	9.8573	2942.1	23.85	98.244
1.5	400	8.9172	334.98	10.468	3314.1	24.12	98.315
1.8	400	9.5252	346.30	10.822	3506.0	26.26	98.358
2.0	400	9.8364	351.94	10.998	3588.7	28.03	98.376

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.52. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	4.1036	226.09	7.0652	878.98	90.48	97.320
0.7	400	4.6736	241.53	7.5479	1183.0	73.51	97.550
0.8	400	5.2608	256.40	8.0125	1540.5	57.77	97.675
0.9	400	6.0322	274.83	8.5883	1950.4	45.80	97.849
1.0	400	6.9926	296.21	9.2564	2412.6	36.91	98.033
1.1	400	7.7143	311.29	9.7279	2743.3	32.23	98.136
1.2	400	8.1767	320.58	10.018	2950.1	29.73	98.192
1.5	400	9.0792	337.96	10.561	3318.9	27.50	98.278
1.8	400	9.6301	348.14	10.879	3510.7	28.09	98.322
2.0	400	9.8918	352.87	11.027	3591.5	28.88	98.343

Ek Tablo 6.53. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1966	164.55	5.1422	843.19	5.94	96.293
0.7	400	2.9932	192.66	6.0206	1157.2	4.81	96.875
0.8	400	3.9131	220.79	6.8996	1521.1	3.88	97.327
0.9	400	4.9641	249.11	7.7848	1937.4	3.15	97.664
1.0	400	6.1364	277.35	8.6672	2402.2	2.63	97.934
1.1	400	6.9605	295.60	9.2375	2726.0	4.13	98.076
1.2	400	7.5219	307.40	9.6063	2937.6	7.27	98.149
1.5	400	8.6215	329.29	10.290	3313.6	15.07	98.259
1.8	400	9.2849	341.82	10.682	3506.8	20.31	98.311
2.0	400	9.6020	347.64	10.864	3588.3	22.94	98.332

Ek Tablo 6.54. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1983	164.60	5.1437	845.96	2.98	96.273
0.7	400	2.9997	192.85	6.0267	1161.6	2.47	96.856
0.8	400	3.9153	220.85	6.9014	1523.5	2.06	97.315
0.9	400	4.9689	249.22	7.7882	1940.4	1.74	97.652
1.0	400	6.1537	277.74	8.6793	2410.1	1.54	97.926
1.1	400	6.9735	295.87	9.2461	2731.9	3.67	98.070
1.2	400	7.5244	307.45	9.6079	2939.2	7.11	98.144
1.5	400	8.6227	329.31	10.291	3314.5	14.98	98.255
1.8	400	9.2853	341.82	10.682	3507.3	20.25	98.309
2.0	400	9.6001	347.61	10.863	3588.2	22.89	98.331

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.55. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1806	163.90	5.1217	839.10	1.96	96.241
0.7	400	2.9849	192.34	6.0107	1155.8	1.68	96.827
0.8	400	3.9012	220.42	6.8881	1517.9	1.49	97.296
0.9	400	4.9523	248.77	7.7742	1933.7	1.33	97.634
1.0	400	6.1233	277.02	8.6569	2397.8	1.16	97.913
1.1	400	6.9493	295.34	9.2294	2722.4	3.56	98.062
1.2	400	7.5296	307.55	9.6109	2941.0	7.05	98.138
1.5	400	8.6223	329.30	10.291	3314.3	14.94	98.252
1.8	400	9.2885	341.88	10.684	3508.1	20.23	98.306
2.0	400	9.6055	347.70	10.866	3589.4	22.88	98.328

Ek Tablo 6.56. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-a, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1766	163.72	5.1163	836.40	4.06	96.214
0.7	400	2.9266	190.39	5.9496	1131.2	3.85	96.793
0.8	400	3.9122	220.72	6.8975	1520.9	3.42	97.281
0.9	400	5.0075	250.16	7.8176	1954.3	2.77	97.622
1.0	400	6.1585	277.83	8.6820	2411.1	2.18	97.907
1.1	400	6.9659	295.70	9.2405	2728.4	3.84	98.056
1.2	400	7.5368	307.69	9.6154	2943.6	7.14	98.134
1.5	400	8.6200	329.25	10.289	3313.5	14.99	98.249
1.8	400	9.2850	341.81	10.682	3507.1	20.26	98.304
2.0	400	9.6026	347.95	10.864	3588.7	22.89	98.327

Ek Tablo 6.57. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 1$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.4115	172.75	5.3985	843.55	32.50	96.681
0.7	400	3.2744	2.0185	6.3079	1158.2	31.49	97.211
0.8	400	4.2536	2.3051	7.2035	1523.1	29.99	97.591
0.9	400	5.2729	2.5699	8.0309	1936.3	25.63	97.851
1.0	400	6.3744	282.84	8.8387	2403.0	20.03	98.046
1.1	400	7.1552	299.81	9.3691	2725.1	17.51	98.147
1.2	400	7.6977	311.07	9.7209	2939.9	16.86	98.208
1.5	400	8.7287	331.38	10.356	3309.5	19.21	98.289
1.8	400	9.3644	343.12	10.722	3498.4	22.73	98.269
2.0	400	9.6728	348.88	10.903	3579.4	25.00	98.332

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.58. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 2$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.3802	171.49	5.3591	846.40	29.28	96.527
0.7	400	3.2574	201.23	6.2883	1158.4	30.37	97.119
0.8	400	4.2494	230.33	7.1977	1525.0	29.48	97.531
0.9	400	5.2449	256.24	8.0074	1936.5	24.39	97.799
1.0	400	6.3279	281.74	8.8042	2400.2	18.25	98.001
1.1	400	7.1143	298.91	9.3411	2726.1	15.58	98.119
1.2	400	7.6625	310.32	9.6974	2940.6	15.27	98.182
1.5	400	8.7223	331.24	10.351	3313.0	18.71	98.277
1.8	400	9.3731	343.45	10.733	3506.1	22.63	98.318
2.0	400	9.6750	348.97	10.905	3588.0	24.63	98.340

Ek Tablo 6.59. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 5$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.1900	164.36	5.1362	842.02	5.04	96.363
0.7	400	2.9941	192.76	6.0237	1158.2	4.98	96.949
0.8	400	3.9770	220.98	6.9055	1522.5	4.77	97.374
0.9	400	4.9606	249.07	7.7833	1935.4	4.02	97.699
1.0	400	6.1349	277.35	8.6672	2401.3	3.28	97.958
1.1	400	6.9705	295.84	9.2450	2729.4	4.56	98.092
1.2	400	7.5323	307.64	9.6137	2940.9	7.53	98.162
1.5	400	8.6234	329.34	10.292	3313.6	15.17	98.267
1.8	400	9.2870	341.87	10.683	3506.6	20.36	98.317
2.0	400	9.6060	347.73	10.866	3588.4	23.03	98.338

Ek Tablo 6.60. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 10$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	THB (%) $I_{\text{çıkış}}$	η (%)
0.6	400	2.1860	164.20	5.1311	841.29	3.75	96.347
0.7	400	2.9961	192.81	6.0254	1160.2	3.65	96.933
0.8	400	3.9176	220.96	6.9051	1524.1	3.31	97.361
0.9	400	4.9607	249.06	7.7830	1936.8	2.85	97.690
1.0	400	6.1248	277.11	8.6597	2398.4	2.23	97.951
1.1	400	6.9516	295.43	9.2321	2723.4	3.88	98.088
1.2	400	7.5157	307.29	9.6029	2935.9	7.16	98.158
1.5	400	8.6276	329.42	10.294	3316.0	15.03	98.264
1.8	400	9.2847	341.82	10.682	3507.2	20.28	98.314
2.0	400	9.5969	347.56	10.861	3587.4	22.91	98.336

Ek 1'in devamı

Ek Tablo 6.61. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 15$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1932	164.46	5.1392	844.61	2.69	96.330
0.7	400	2.9924	192.68	6.0213	1159.7	2.20	96.921
0.8	400	3.9180	220.96	6.9051	1525.2	1.88	97.351
0.9	400	4.9641	249.13	7.7854	1939.1	1.61	97.675
1.0	400	6.1478	277.63	8.6759	2408.2	1.43	97.941
1.1	400	6.9620	295.64	9.2388	2727.8	3.63	98.081
1.2	400	7.5227	307.43	9.6071	2938.9	7.07	98.153
1.5	400	8.6203	329.27	10.290	3313.9	14.97	98.262
1.8	400	9.2827	341.78	10.681	3506.7	20.25	98.313
2.0	400	9.6012	347.63	10.863	3588.4	22.88	98.335

Ek Tablo 6.62. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 20$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1772	163.82	5.1195	838.12	2.59	96.307
0.7	400	2.9785	192.21	6.0066	1154.0	2.06	96.906
0.8	400	3.9088	220.68	6.8963	1521.5	1.80	97.337
0.9	400	4.9535	248.84	7.7763	1934.6	1.55	97.662
1.0	400	6.1169	276.90	8.6532	2395.6	1.40	97.930
1.1	400	6.9504	295.39	9.2308	2723.1	3.65	98.074
1.2	400	7.5265	307.50	9.6094	2940.1	7.08	98.148
1.5	400	8.6220	329.30	10.291	3314.3	14.94	98.259
1.8	400	9.2713	341.57	10.674	3503.6	20.22	98.311
2.0	400	9.5997	347.60	10.863	3588.1	22.87	98.333

Ek Tablo 6.63. Benzetim çalışması sonuç değerleri (Durum-VIII-b, $f_{sw} = 25$ kHz)

m_{indeks}	$V_{\text{giriş}} (V_{\text{da,ort}})$	$I_{\text{giriş}} (A_{\text{da,ort}})$	$V_{\text{çıkış}} (V_{\text{rms}})$	$I_{\text{çıkış}} (A_{\text{rms}})$	$P_{\text{çıkış}} (W)$	$THB (\%)$ $I_{\text{çıkış}}$	$\eta (\%)$
0.6	400	2.1732	163.66	5.1145	835.77	4.04	96.295
0.7	400	2.9200	190.26	5.9457	1129.8	3.81	96.888
0.8	400	3.9119	220.76	6.8988	1521.4	3.42	97.326
0.9	400	5.0023	250.07	7.8147	1952.8	2.76	97.653
1.0	400	6.1646	277.99	8.6872	2413.9	2.18	97.927
1.1	400	6.9695	295.79	9.2435	2730.1	3.85	98.070
1.2	400	7.5294	307.56	9.6111	2841.1	7.13	98.145
1.5	400	8.6202	329.26	10.290	3313.8	14.98	98.256
1.8	400	9.2851	341.82	10.682	3507.3	20.26	98.309
2.0	400	9.6010	347.62	10.863	3588.4	22.89	98.331

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Kars'ta tamamladı. 2014 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne başladı ve 2019 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

YAYINLARI

1. Çavli N., ve Özkop E., 5-Seviyeli H-Köprü Diyot Kenetlemeli Evirici için SDGM ve ÜHEDGM Tekniğinin Benzetim İncelemesi, 2nd International Conference on Access to Recent Advances in Engineering and Digitalization, ARACONF 2021, Kayseri, Türkiye, 10-12 Mart 2021, ss. 202-211.