

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİLERDE ANAHTARLAMA AÇILARININ
OPTİMİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Elif Selin DURAK

**OCAK - 2016
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda yapılan bir çalışmadır.

Öncelikle yüksek lisans tezi danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçiminde ve gerekse çalışmaların yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen, akademisyen olma yolunda her türlü bilimsel katkıyı sağlayan sayın hocam Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ' a ve aynı şekilde fikirleri ile çalışmalarımda her zaman destek ve yardımcı olan arkadaşım Arş. Gör. Mehmet Ali USTA' ya çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda durup sabırla bana destek olan ailem ve kız kardeşim Eda Sena KARAAĞAÇLI ile büyük bir hoşgörü ve sevgiyle bana desteğini esirgemeyen sevgili eşim Dr. Serdar DURAK' a da ayrıca sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Elif Selin DURAK

Trabzon 2016

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çok Seviyeli Eviricilerde Anahtarlama Açılarının Optimizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ’ 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
11/01/2016.

Elif Selin DURAK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	16
1.1. Giriş	16
1.2. Literatür Araştırması.....	3
1.3. Eviriciler	6
1.3.1. Eviricilere Giriş	6
1.3.2. Eviricilerde Performans Parametreleri	6
1.3.3. Tek Fazlı Yarım Köprü Eviriciler	8
1.3.3.1. Tek Fazlı Yarım Köprü Eviriciler	8
1.3.3.2. Tek Fazlı Tam Köprü Eviriciler	10
1.3.4. Üç Fazlı Eviriciler	13
1.4. Seçici Harmonik Eliminasyon (SHE).....	14
1.4.1. Yarım Köprü Eviricilerde Harmonik Eliminasyonu	15
1.4.2. Doğrusal Olmayan Denklemleri Çözmek İçin Sayısal Bir Yöntem.....	19
1.4.3. Tek Faz Tam Köprü Eviricilerde Harmonik Eliminasyonu	22
1.5. Çok Seviyeli Eviriciler ve Dalga Şekilleri	27
1.5.1. 7 Seviyeli Tam Köprü Eviricilerde Anahtarlama Şekilleri	27
1.5.2. 11 Seviyeli Tam Köprü Eviricilerde Anahtarlama Şekilleri	30
1.6. Optimizasyon.....	34
1.6.1. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması	36
1.6.2. Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması	37
1.6.3. Sezgisel Algoritmalar	39
1.7. Parçacık Sürü Optimizasyonu	40

1.7.1.	PSO Algoritması.....	41
1.7.2.	Yöntemin Uygulanışı.....	46
1.7.2.1.	Başlangıç Değerleri	46
1.7.2.2.	Konum (x).....	46
1.7.2.3.	Hız (v).....	46
1.7.2.4.	Atalet (W).....	47
1.7.2.5.	Sabit (c)	47
1.7.2.6.	Uygunluk Fonksiyonu	48
1.8.	Genetik Algoritmalar.....	50
1.8.1.	Genetik Algoritmaların Çalıştırılması	51
1.8.1.1.	Parametre Kodlama Operatörü	51
1.8.1.2.	Başlangıç Popülasyon Parametresi.....	53
1.8.1.3.	Üreme Seçim Operatörü	53
1.8.1.4.	Çaprazlama Operatörü.....	55
1.8.1.5.	Mutasyon Operatörü.....	57
1.8.1.6.	Sonlandırma.....	57
1.8.2.	Genetik Algoritmaların Özellikleri.....	58
1.8.2.1.	Avantajları	58
1.8.2.2.	Dezavantajları.....	59
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	61
2.1.	Giriş	61
2.2.	PSO Programı	62
2.2.1.	%2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide PSO Programının Çalıştırılması.....	63
2.2.2.	%4 Hata ile 11. ve 13. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide PSO Programının Çalıştırılması.....	65
2.2.3.	%2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 11 Seviyeli Eviricide PSO Programının Çalıştırılması.....	68
2.3.	GA Programı	70
2.3.1.	%2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide GA Programının Çalıştırılması	71
2.3.2.	%4 Hata ile 11. ve 13. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide GA Programının Çalıştırılması	73
2.3.3.	%2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide GA Programının Çalıştırılması	75

2.4.	Kullanılan Evirici Modelleri.....	78
2.4.1.	7 Seviyeli Evirici Simulink Modeli	78
2.4.2.	11 Seviyeli Evirici Simulink Modeli	80
3.	SONUÇLAR.....	82
3.1.	7 Seviyeli Evirici İçin PSO Algoritması ile Elde Edilen Sonuçlar	82
3.2.	11 Seviyeli Evirici İçin PSO Algoritması ile Elde Edilen Sonuçlar.....	84
3.3.	7 Seviyeli Evirici İçin GA ile Elde Edilen Sonuçlar	86
3.4.	11 Seviyeli Evirici İçin GA ile Elde Edilen Sonuçlar	88
4.	KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİLERDE ANAHTARLAMA AÇILARININ
OPTİMİZASYONU

Elif Selin DURAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ
2016, 95 Sayfa

Bu tez çalışmasında, Seçici Harmoniklerin Eliminasyonu Darbe Genişlik Modülasyon Tekniği (SHEPWM) kullanılarak, farklı seviyelerdeki eviricilerin çıkış dalga şekillerindeki belirli harmonikler elimine edilmiştir. SHEPWM tekniği ile baskın harmonikleri yok etmek için elde edilen anahtarlama açılarının bulunmasını sağlayan lineer olmayan denklem takımları, Parçacık Sürü Optimizasyon (PSO) ve Genetik Algoritmalar (GA) yöntemleri ile optimize edilmiştir. Böylece, çıkış dalga şeklinin toplam harmonik distorsiyon miktarı azaltılmıştır. Optimize edilmiş sonuçlar yedi ve on bir seviyeli bir evirici üzerinde denenmiş ve çıkış dalga işaretleri gözlemlenmiştir. Elde edilen verilere göre genetik algoritma ile yapılan optimizasyon sonuçlarının parçacık sürü optimizasyonu ile yapılan optimizasyon sonuçlarına göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eviriciler, Seçici Harmonik Eliminasyonu, Optimizasyon, Parçacık Sürü Optimizasyonu, Genetik Algoritmalar, Çok Seviyeli Evirici

Master Thesis

SUMMARY

SWITCHING ANGLES OPTIMIZATION IN MULTILEVEL INVERTER

Elif Selin DURAK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical-Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Halil İbrahim OKUMUŞ
2016, 95 Pages

In this study, specific harmonics in output waveforms of multilevel inverters are eliminated by using Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation Technique (SHEPWM). Nonlinear equations, which enable to find switching angles obtained through SHEPWM in order to remove dominant harmonics are optimized with Particle Swarm Optimization (PSO) technique and Genetic Algorithm (GA) methods. Thus output waveform total harmonic distortion value is reduced. Optimized results are tested on a 7-level and 11-level inverters and output wave signals are observed. According to data obtained, it is observed that Genetic Algorithm optimisation results are much better than Particle Swarm Optimization results.

Key Words: Inverter, Selective Harmonic Elimination, Optimization, Particle Swarm Optimization, Genetic Algorithms, Multilevel Inverter

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tek fazlı yarım köprü evirici.....	8
Şekil 2. Tek fazlı yarım köprü evirici şekli ve anahtarları	9
Şekil 3. Tek faz köprü evirici çıkış gerilimi dalga şekilleri.....	10
Şekil 4. Tek fazlı tam köprü evirici	10
Şekil 5. Tek faz tam köprü evirici çıkış gerilimi dalga şekilleri.....	12
Şekil 6. Üç fazlı tam köprü evirici.....	13
Şekil 7. Tek faz yarım köprü evirici faz nötr çıkışı	15
Şekil 8. Tek faz yarım köprü eviricilerde anahtarlama şekilleri.....	22
Şekil 9. Tek faz tam köprü eviricide çıkış dalga gerilimi.....	22
Şekil 10. Tek faz tam köprü eviricilerde anahtarlama şekilleri	25
Şekil 11. 7 seviyeli tam köprü evirici	27
Şekil 12. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde çıkış gerilimi dalga şekli.....	28
Şekil 13. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_1 gerilimi anahtarlama şekilleri.....	28
Şekil 14. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_2 gerilimi anahtarlama şekilleri	29
Şekil 15. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_3 gerilimi anahtarlama şekilleri	29
Şekil 16. 11 Seviyeli tam köprü evirici	30
Şekil 17. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde çıkış gerilimi dalga şekli.....	31
Şekil 18. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_1 gerilimi anahtarlama şekilleri.....	31
Şekil 19. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_2 gerilimi anahtarlama şekilleri	32
Şekil 20. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_3 gerilimi anahtarlama şekilleri	32
Şekil 21. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_4 gerilimi anahtarlama şekilleri.....	33
Şekil 22. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_5 gerilimi anahtarlama şekilleri	33
Şekil 23. Bir fonksiyonun küresel minimum noktaları [21].....	35
Şekil 24. Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması [22].....	37
Şekil 25. Optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması	38
Şekil 26. Parçacığın yer değiştirmesi	45
Şekil 27. PSO akış diyagramı	49
Şekil 28. Rulet seçim yöntemi.....	54
Şekil 29. Çift noktalı çaprazlama yöntemi	56
Şekil 30. Üç noktalı çaprazlama yöntemi.....	56

Şekil 31. Genetik algoritmanın işleyişi.....	58
Şekil 32. MATLAB uygulamasında programlar çalıştırıldıktan sonraki kullanıcı değer giriş ekranı	61
Şekil 33. Her bir parçacık için optimum nokta.....	62
Şekil 34. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	63
Şekil 35. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	64
Şekil 36. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	64
Şekil 37. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	65
Şekil 38. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş).....	66
Şekil 39. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	67
Şekil 40. 11 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	68
Şekil 41. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	68
Şekil 42. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO).....	69
Şekil 43. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	71
Şekil 44. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	72
Şekil 45. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	72
Şekil 46. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	73
Şekil 47. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	74
Şekil 48. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	74
Şekil 49. 11 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	75
Şekil 50. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	76

Şekil 51. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA).....	76
Şekil 52. 7 Seviyeli evirici simulink modeli	78
Şekil 53. 7 Seviyeli eviricide her bir evirici bloğunun içi	78
Şekil 54. PSO ve GA sonucunda bulunan açılış değerlerinin kullanıldığı 7 seviyeli evirici modeli.....	79
Şekil 55. 11 Seviyeli evirici simulink modeli	80
Şekil 56. 11 Seviyeli eviricide her bir evirici bloğunun içi	80
Şekil 57. PSO ve GA sonucunda bulunan açılış değerlerinin kullanıldığı 11 seviyeli evirici modeli.....	81
Şekil 58. Faz gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO)	83
Şekil 59. Yük gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO)	83
Şekil 60. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO).....	84
Şekil 61. Faz gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO)	85
Şekil 62. Yük gerilimi-zaman grafiği (11 seviyeli-PSO)	85
Şekil 63. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (11 seviyeli-PSO).....	86
Şekil 64. Faz gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-GA).....	87
Şekil 65. Yük gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-GA).....	87
Şekil 66. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (7 seviyeli-GA)	88
Şekil 67. Faz gerilimi-zaman grafiği (11 seviyeli-GA).....	89
Şekil 68. Yük gerilimi-zaman grafiği (11 seviyeli-GA).....	89
Şekil 69. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (11 seviyeli-GA)	90

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Tek faz tam köprü eviricinin anahtarlama durumları.....	11
Tablo 2. Üç faz köprü eviricinin anahtarlama durumları	14
Tablo 3. %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (PSO).....	65
Tablo 4. %4 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (PSO).....	67
Tablo 5. %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 11 seviyeli evirici değerleri (PSO).....	70
Tablo 6 %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (GA)	73
Tablo 7. %4 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (GA)	75
Tablo 8. %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 11 seviyeli evirici değerleri (GA)	77

SEMBOLLER DİZİNİ

g_{best}	Küresel en iyi
M_a	Modülasyon indeksi
p_{best}	Kişisel en iyi
V_{aN}	Evirici Faz Gerilimi
V_{an}	Evirici Yük Gerilimi
V_{ab}	Evirici Çıkışındaki Faz-Faz Arası Gerilim
V_d	Evirici giriş gerilimi
C	Sabit katsayı
DF	Bozulma katsayısı
GA	Genetik algoritma
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
SHE	Seçici harmonik eliminasyonu
THD	Toplam harmonik bozunumu
v	Hız
x	Konum
W	Atalet
HF_n	Harmonik faktörü
M_a	Modülasyon indeksi
$V_{çıkış}$	Evirici çıkış gerilimi
V_n	n . harmoniğin etkin değeri
V_a	Ana harmoniğin etkin değeri
ω	Çıkış geriliminin açısal frekansı
V_{a_0}	Tek faz yarım köprü evirici çıkış gerilimi
Q	Transistör
D	Diyot

V_0	Ani çıkış gerilimi
$V_{a,b}$	Tek faz tam köprü evirici yük gerilimi
AC	Alternatif gerilim
DC	Doğru gerilim
NR	Newton Raphson
M	Köşe sayısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Eviriciler günümüzde çoğu endüstriyel uygulama için vazgeçilmez hale gelmiştir. Çeşitli motor tiplerinin denetlenmesinde ve güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. En çok kullanılan evirici topolojileri ise temel evirici topolojisi ve çok seviyeli evirici topolojileridir.

Eviricilerde aranan en önemli özellik, evirici çıkış geriliminin harmonik seviyesinin düşük olması başka bir ifadeyle çıkış dalga şekillerinin olabildiğince sinüsoidal bir işarete benzemesidir. Çok seviyeli eviricilerde çıkış gerilimi dalga işareti merdiven şeklindedir ve bu şekil evirici seviye sayısı arttıkça daha çok sinüs işarete benzer. Böylece çıkış gerilimi kalitesi de artmış olur. Küçük ve orta güçlerin denetiminde, evirici çıkış geriliminin kare dalgaya (merdiven şeklindeki) benzemesi kabul edilebilir. Fakat büyük güçlü sistemlerin denetiminde bu şeklin sinüsoidale yakın olması istenir. Var olan bu harmonikler sistemdeki yüklerde ve elemanlarda kayıpların artmasına yol açar. Bunun yanında, izolasyon malzemelerinin delinmesi, gerilim düşümünün artması, güç faktöründe değişme, koruma elemanlarının hatalı çalışması, kompanzasyon sistemlerinde aşırı reaktif yüklenme, cihazlarda ısınma sorunu, enerji tüketiminde artış, ses ve görüntü sistemlerinde parazitli çalışma gibi bir çok olumsuz durumun meydana gelmesine sebep olurlar.

Bu olumsuz özelliklerin azaltılabilmesi için harmonik analizlerinin iyi yapılması gerekir. Harmonik analizi, bir dalga şeklini meydana getiren sinüs ve kosinüs bileşenlerin frekans ve genliklerini belirlenmesinde Fourier Serisi kullanılarak yapılır. Fourier serisi ile bulunan dönüşüm formülleri ile elde edilen bu bileşenler harmonik eliminasyon yöntemleri kullanılarak, toplam harmonik distorsiyonunu azaltacak şekilde çözümlenir.

Literatürde bu eliminasyon işlemi için kullanılacak birçok yöntem mevcuttur. Bu tez çalışmasında ise harmonik eliminasyon için, Seçici Harmonik Eliminasyonu (SHEPWM) metodu kullanılmıştır. Bu yöntem ile istenilen harmoniklerin eliminasyonu yapılmıştır. Elimine işlemi yapılırken kullanılacak olan anahtarlama açılarının seçiminde ise optimizasyon işlemi yapılmıştır.

İnsanoğlu varoluşundan bugüne kadar gerek yaşadıkları olaylardan yaptıkları çıkarımlarla olsun, gerekse gözlemlerinden yola çıkarak var olan problemlerin çözümlerinin iyileştirilmesi amacıyla sürekli yeni yöntemler bulmaya çalışmıştır. Bilinen

problemlerin var olan çözümlerine ek olarak bulunan yeni çözüm yöntemleri çözüm kalitesini arttırırken, maliyet ve sürenin de azaltılmasını sağlamıştır. Yani bir problemi etkileyen faktörlerin problemin türüne göre maksimize ya da minimize edilmesi daha verimli çözümlerin elde edilmesinde faydalı olmuştur.

Bir problemin çözümünde matematiksel model oluşturulması oldukça önemlidir. Bir sistemin nasıl davranacağını öngörmek amacıyla matematiksel modellemeye başvurulmaktadır. Problemlerin çözümünde kullanılan bu matematiksel modellemeler sayesinde, çözüm için hesaplama sürelerinin azaltılması ve maliyetlerin düşürülmesi sağlanabilmektedir. Problemi etkileyen unsurlar arttıkça zorluk seviyesi ve modelleme sırasında oluşan denklem sayıları artar. Bu da problem sınıfında değerlendirilen çözüm uzayının büyümesi anlamına gelir. Böyle problemlerin çözümünde sezgisel optimizasyon tekniklerinden faydalanılır. Bu teknikler sayesinde çözüm uzayının tamamı taranmadan, sezgisel şekilde çok daha kısa sürede optimum ya da optimuma yakın sonuçlar elde edilebilir. Literatürde çok seviyeli eviricilerde harmonik eliminasyonu optimizasyonu için birçok araştırma mevcuttur. Bu tez kapsamında optimizasyon yöntemleri olarak Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Genetik Algoritma yöntemleri kullanılıp, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Parçacık Sürü Optimizasyonunun mantığı, bir kuş popülasyonunun yiyecek ararken sadece bir bölgede yiyecek olduğunu bilmediği kabul edilirse, yiyeceğin nerede olduğunu bulmak için en iyi çözüm yolunu aramasıdır. Genetik Algoritmaların mantığı ise, biyolojik sistemde en iyi olanın yaşamını sürdürmesi yani doğal yaşama en iyi uyum sağlayan bireylerin varlığını devam ettirebilmesi için üstün nitelikli anne ve babadan yine üstün nitelikli nesillerin yetiştirilmesidir. Hatta oluşan yeni neslin bir öncekine göre daha özel yeteneklere sahip olmasını hedefler. Yani problem çözümünde bilinen problem çözümlerinin çaprazlanması ve daha iyi çözümler üretilebilmesini amaçlar.

Genetik algoritmalar doğadaki evrim yöntemlerini kullanan bir arama yöntemidir. Son yıllarda evrim prensibine dayalı algoritmalara ilgi artmış ve bu alanda oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Genetik algoritmalar kendi arama proseslerini oluşturabildiği için pek çok avantaja sahiptir. Bu algortmada diğer evrimsel algoritmalar gibi başlangıç araştırma uzayındaki çözümlerden bazılarını kullanarak bir başlangıç popülasyonu oluştururlar. Oluşturulan bu popülasyon sırasıyla seçim, üreme, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden geçtikten sonra bulunan son kuşaktaki en uygun yani en kaliteli bireyi problem için

optimal sonucu verecek şekilde belirler. Bu çözüm her zaman optimum olmasa da kesinlikle optimuma yakın sonuçlar verir.

1.2. Literatür Araştırması

Bowes ve Clarck 1992 yılında yaptıkları çalışma ile evirici harmoniklerini donanımsal olarak elimine etmiş ve darbe genişlik modülasyonunu kullanmıştır [1].

Karshenas ve arkadaşları 1995 yılında seçici harmonik eliminasyonunu akım kaynaklı eviricilerde kullanmıştır [2].

Park ve arkadaşları çıkış gerilim ve yük akımlarındaki harmonikleri azaltabilmek için 5 seviyeli bir evirici tasarlamışlardır. Farklı yük durumlarında çıkış gerilimini sinüsoidal halde tutabilmek için denetleyici tasarlamışlardır [3].

Lund ve arkadaşları 1999 yılında, 7 seviyeli hibrit bir eviricinin kontrol tekniklerini incelemişlerdir. Hibrit modülasyon tekniğini detaylı şekilde analiz etmişlerdir [4].

Çok seviyeli eviricilerde kompanzasyon ve aktif filtre uygulamaları alanında çalışmalar yapılmıştır [5-7].

Rodriguez, Lai ve Peng 2002 yılında yapmış oldukları çalışmada diyot kenetlemeli ve kaskat bağlı H köprü modüllü çok seviyeli eviricileri incelemişlerdir. Darbe genişlik modülasyon tekniği ile çok seviyeli eviricilerde harmonik eliminasyonu yapmış, bu eviricilerin bir yükü beslemesi durumundaki sonuçlarını analiz etmişlerdir [8].

Kouzou'nun 2010 yılında yaptığı çalışmada, AC/AC kıyıcılardaki çıkış gerilim kalitesinin artırılması için seçici harmonik eliminasyon darbe genişlik modülasyonu kullanmıştır. SHEPWM'in yönteminin uygulandığı harmoniklerin eliminasyonu için, iki deneysel ve evrimsel algoritma kullanmıştır. Araştırmadaki ana hedef, amaç fonksiyonu için en iyi minimal değeri sunan anahtarlama açılarının vektör çözümlerinin hesaplanmasıdır. Uygulamadan elde edilen sonuç Parçacık Sürü Optimizasyonunun kullanımının etkinliğini göstermiştir. Diğer taraftan PSO'nun SHEPWM ile beraber uygulaması farklı elektronik dönüştürücülerin gelişimi için gelecek vadede çözümler sunmuştur [9].

Azab'ın 2011 yılında yaptığı çalışmada, SHE tekniği kullanılan PSO ile indüksiyon motorları besleyen 3 fazlı PWM eviricilerde nonliner transdantal denklemlerin kesin çözümü sunulmuştur. Önerilen yaklaşım, istenen anahtarlama açıları evirici geriliminin dalga formundaki 23. harmoniklere kadar düşük harmonikleri elimine etmek için etkin

şekilde hesap yapmaktadır. Çalışmanın göze çarpan tarafı parçacık sürü algoritmasının evirici çıkış gerilimindeki istenmeyen düşük seviyedeki harmonikleri zayıflatmasıdır. Bu çalışma PSO'nun, indüksiyon motor sürücülerinde 3 fazlı eviricilerin kontrolü için SHE stratejisi ile uygulanabilecek umut veren bir yaklaşım olduğunu göstermiştir [10].

Jeevabharathi ve Padmathilagam'ın 2012 yılındaki çalışmasında, kaskat bağlı çok seviyeli eviricilerde harmoniklerin, PSO kullanımı ile eliminasyonu sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen metodun yüksek miktarda belirli harmonikleri elimine ettiğini ve çıkış voltajının düşük harmonik distorsiyona sahip olduğunu göstermiştir [11].

Kouzou ve arkadaşlarının 2011 yılında yaptıkları çalışmada ise, PSO temelli SHEPWM tekniği 5 faz-3 seviye nötr noktası bağlantılı (NPC) eviricilerin kontrolü için önerilmiştir. Bu yöntemin amacı çıkış gerilim kalitesini artırmaktır. İstenen temel büyüklükte ve tanımlı sayıda düşük harmoniklerin eliminasyonu için SHEPWM kısıtlı lineer olmayan amaç fonksiyonunun minimizasyonu ile sunulmuştur. Bu, amaç fonksiyonu için en iyi minimal değeri temsil eden anahtarlama açılarının vektör çözümünün hesaplanmasını esas almaktadır. Elde edilen sonuçlar önerilen metodun basitlik ve hızlı yakınsamadan dolayı etkinliğini kanıtlamaktadır [12].

Baharuddin ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmaları kaskat 5 seviye eviriciler için PSO yöntemi kullanan etkili bir SHE methodunu içermektedir. Bu araştırmanın amacı, temel bileşenler etkin şekilde tutulurken, düşük seviye harmoniklerini PSO algoritması kullanarak nonliner denklemlerin çözümüyle elimine etmektir. Önerilen yöntemle istenen anahtarlama açıları PSO ile evirici çıkış voltajı dalga formundaki 17. harmoniklere kadar etkin şekilde hesaplanmaktadır [13].

Kouzou ve arkadaşları 2011'de, PSO 'yu esas alan SHEPWM ile H-köprü çok seviyeli eviricinin çıkış gerilim kalitesinin artırılması için çalışma yapmışlardır. SHEPWM metodu ile problem, minimize edilmesi gereken kısıtlı nonliner amaç fonksiyonu şeklinde gösterilmiştir. Çalışmanın hedefi, amaç fonksiyonu için en iyi minimal değeri sunan anahtarlama açılarının vektör çözümlerinin hesaplanmasıdır [14].

Patel ve Hoft yaptıkları çalışmada evirici çıkış dalga formundaki harmoniklerin eliminasyonunun teorik problemlerini değerlendirmiştir. Genelleştirilmiş metotlar ile yarı-köprü ve tam-köprü evirici çıkış dalga formları için belirli sayıdaki harmoniklerin eliminasyonu yapmış ve 5. harmoniğe kadar olan çözümleri sunmuştur. Problemin doğrusal olmayan denklemlerini bilgisayarda çözmek için numerik teknikler

uygulamışlardır. Sonuçlar çoğu evirici uygulamasında arzu edilen çıkış dalga formunun pratik şekilde uygulanabilir nitelikte olduğunu göstermiştir [15].

Dahidah ve Agelidis; sabit frekanslı ve değişken DC kaynaklı, yüksek gerilim ve güçlü kaskat bağlı çok seviyeli eviricilerde seçici harmonik eliminasyon darbe genişlik modülasyonu kontrolü için genelleştirilmiş formül önermiştir. Söz konusu formül evirici devrelerinde herhangi bir fiziksel değişiklik yapmadan konvansiyonel adımlı dalga formu tekniğine kıyasla maliyet fonksiyonunu belirlemek için daha fazla serbestlik önermiştir. Bu sayede eviricinin performansı yüksek oranda artmıştır. Bu çalışma, doğrusal olmayan denklem sistemlerine optimal çözümü hızlı ve garantili yakınlıkta bulmak için hibrit gerçek kodlu genetik algorithmadan faydalanmaktadır. Tek ve üç fazlı 5 ve 7 seviyeli eviriciler için farklı çalışma noktalarını örneklendirmiş, teorik ve simülasyon sonuçlarıyla araştırmalarını tamamlamışlardır [16].

Du ve arkadaşlarının yaptıkları bu çalışma; değişken DC gerilimli, çok seviyeli eviriciler için herhangi bir belirli harmoniğin aktif harmonik eliminasyon metodu ile elimine edilmesini sunmaktadır. İlk olarak bileşke teorisi, harmonik içeriğini fonksiyonlarla karakterize edip, düşük dereceli harmoniklerin elimine edilmesi ve temel frekans anahtarlama ve tek kutuplu anahtarlama şemalarının anahtarlama açılarını belirlemek için kullanılmıştır. Daha sonra artakalan yüksek harmonikler hesaplanmış ve elimine edilmesi için orijinal gerilim dalga formundan çıkarılmıştır. Simülasyon sonuçlarında bu metot belirli harmonikleri etkili bir şekilde elimine etmiş ve sinüs dalgasına yakın düşük harmonik distorsiyonlu dalga üretebilmiştir. Metodun uygulanması için alan programlanabilir kapı dizi kontrollü (FPGA) deneysel bir 11 seviyeli H-köprü evirici kullanılmıştır [17].

Dargahi ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptıkları çalışmada kaskat bağlı çok seviyeli evirici için seçici harmonik eliminasyonu yöntemi kullanarak uygun aralıkta modülasyon indeksine sahip anahtarlama açıları hesaplamışlardır. Denklemlerin çözümünde Newton Raphson metodu kullanılmıştır. 11 seviyeliden 23 seviyeliye kadar olan eviriciler için yüksek doğrulukta sonuçlara ulaşılmıştır [18].

1.3. Eviriciler

1.3.1. Eviricilere Giriş

Bir DC giriş gerilimini, çıkışta istenilen genlik ve frekansta AC bir gerilime dönüştüren yapılara evirici denir. Çıkış geriliminin frekansı sabit olabileceği gibi değişken olabilir. Değişken çıkış gerilimi iki yolla elde edilebilir. Bunlardan ilki, girişte değişken DC gerilim ve sabit evirici kazancı ile çıkış gerilimi elde edilmesi, ikincisi ise girişte sabit bir DC gerilim ve değişken evirici kazancı ile çıkış gerilimi elde edilmesidir. Evirici kazancı, mevcut evirici topolojilerinin değiştirilmesi ya da anahtarlama tekniklerinin değiştirilmesi ile sağlanır. Evirici kazancı AC çıkış geriliminin DC giriş gerilimine oranı olarak tanımlanabilir.

İdealde evirici çıkışındaki işaretlerin düzgün bir sinüsoidal olması beklenirken, pratikte evirici çıkışındaki dalga şekilleri sinüsoidal değildir ve harmonikler içerir. Düşük ve orta güç uygulamalarında bu harmoniklerin bir kısmı kabul edilebilir seviyede olmasına karşın; yüksek güç uygulamalarında ise bu harmoniklerin azaltılması ve az bozunumlu sinüsoidal dalga şekilleri gereklidir. Yüksek hızlı yarı iletken elemanlarla, çıkış geriliminin harmonikleri anahtarlama teknikleri ile önemli derecede azaltılabilir [45].

Eviriciler genel olarak iki türde sınıflandırılabilirler.

- Tek fazlı eviriciler
- Üç fazlı eviriciler

1.3.2. Eviricilerde Performans Parametreleri

Pratikte, evirici çıkışları harmonikler veya dalgalanmalar içerir ve evirici kalitesi çıkış performans parametreleri cinsinden aşağıdaki parametrelere göre değerlendirilirler [45]:

* Harmonik Faktörü

n. dereceden bir harmoniğin, harmonik kat sayısı;

$$n > 1 \text{ için } HF_n = \frac{V_n}{V_a} \quad (1.1)$$

olarak ifade edilir [45]. Bu denklemde V_n n. harmoniğin etkin değeri, V_a ana harmoniğin etkin değeridir.

* Toplam Harmonik Bozunumu (THD)

Toplam harmonik bozunumu; bir dalga şekli ile bu dalganın ana bileşeni arasındaki şekil benzerliğinin bir ölçüsüdür ve aşağıdaki gibi tanımlanır [45].

$$\text{THD} = \frac{1}{V_a} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2} \quad (1.2)$$

n yerine hesaplanmak istenen harmonik numarası yazılarak denklem çözülür.

* Bozulma Katsayısı (DF)

THD, toplam harmonik bozulmasını verirken, her harmoniğin seviyesini belirtmez. Evirici çıkışında bir filtre kullanılırsa yüksek dereceli harmonikler büyük ölçüde yok edilir. Bu yüzden her harmoniğin frekans ve genlik bilgilerinin bilinmesi gerekir. Bozulma faktörü, harmoniklerin belli bir azaltılmaya uğradıktan sonra (n^2 'ye bölündükten sonra), kalan toplam harmonik bozunumunu belirtir [45].

$$\text{DF} = \frac{1}{V_a} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2} \quad (1.3)$$

n yerine hesaplanmak istenen harmonik numarası yazılarak denklem çözülür. Tek bir harmonik ya da n. harmoniğe ait bozulma ise aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$n > 1 \text{ için } \text{DF}_n = \frac{V_n}{V_a \cdot n^2} \quad (1.4)$$

* **En düşük dereceli harmonik**

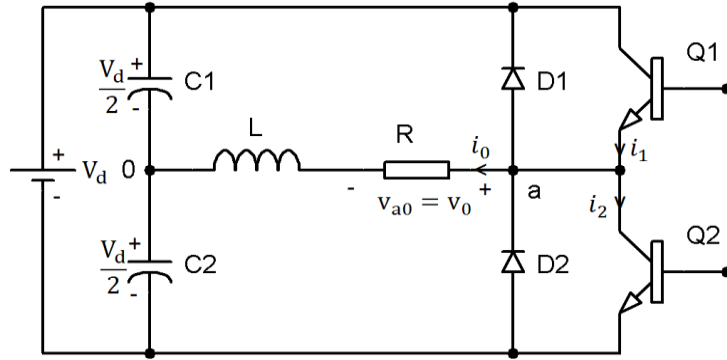
En düşük dereceli harmonik, frekansı ana dalga frekansına en yakın ve genliği ana bileşenin “%3”den büyük ya da eşit olan harmoniktir [45].

1.3.3. Tek Fazlı Yarım Köprü Eviriciler

Tek fazlı köprü eviriciler yarım köprü ve tam köprü olmak üzere ikiye ayrılır.

1.3.3.1. Tek Fazlı Yarım Köprü Eviriciler

Bir fazlı evirici topolojilerinin temeli tek faz yarım köprü evirici Şekil 1'de görülmektedir [45].



Şekil 1. Tek fazlı yarım köprü evirici

Evirici devresi iki adet kısıyıcıdan oluşur. Q_1 transistörü $T_0/2$ süresince iletimde kalırsa yük ($R+L$) üzerinde $V_d/2$, Q_2 transistörü $T_0/2$ süresince iletimde kalırsa yük üzerinde $-V_d/2$ gerilimi gözlemlenir. Şekilde kullanılan D_1 ve D_2 diyotları transistörleri, ters akım akması durumunda yanmaktan korumak amaçlı kullanılmıştır. C_1 ve C_2 kondansatörlerinin değerleri eşittir.

Bu topolojide sabit gerilim değerine ($V_d/2$) sahip iki kondansatör eviricinin nötr noktasını oluşturur. Evirici çıkışındaki harmonikleri azaltmak için kondansatör değerlerinin yüksek seçilmesi gerekir. Devrede dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise Q_1 ve Q_2 anahtarlarının yalnızca birinin iletimde olmasıdır. Bu eviricide çıkış geriliminin etkin değeri:

$$V_0 = \sqrt{\left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_d^2}{4} dt\right)} = \frac{V_d}{2} \quad (1.5)$$

Ani çıkış gerilimi Fourier serisi ile ifade edilebilir.

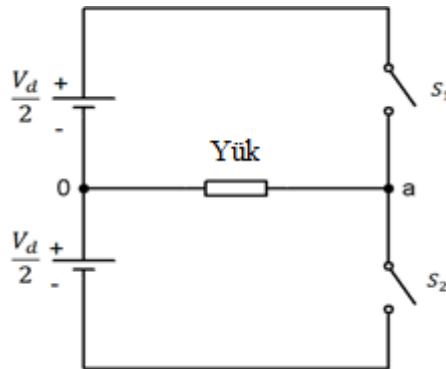
$$V_0 = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (1.6)$$

Bu denklemden a_0 ve a_n çeyrek dalga simetrisinden dolayı sıfır olduğundan ani çıkış gerilimi:

$$V_0 = \begin{cases} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_d}{n\pi} \sin(n\omega t) & , n = \text{tek sayılar} \\ 0 & , n = \text{çift sayılar} \end{cases} \quad (1.7)$$

Burada $\omega = 2\pi f_0$ rad/saniye olarak çıkış geriliminin açısal frekansıdır. Çıkış geriliminin x- eksenini boyunca çeyrek dalga simetrisinden dolayı, çift harmonik gerilimleri yoktur. Çeyrek dalga simetrisi, çıkış geriliminin her yarım periyottaki ilk ve ikinci çeyreklerde genliklerinin simetrik ve ters polarlanmış olması durumudur. $n = 1$ için eşitlik temel bileşenin etkin değerini verir.

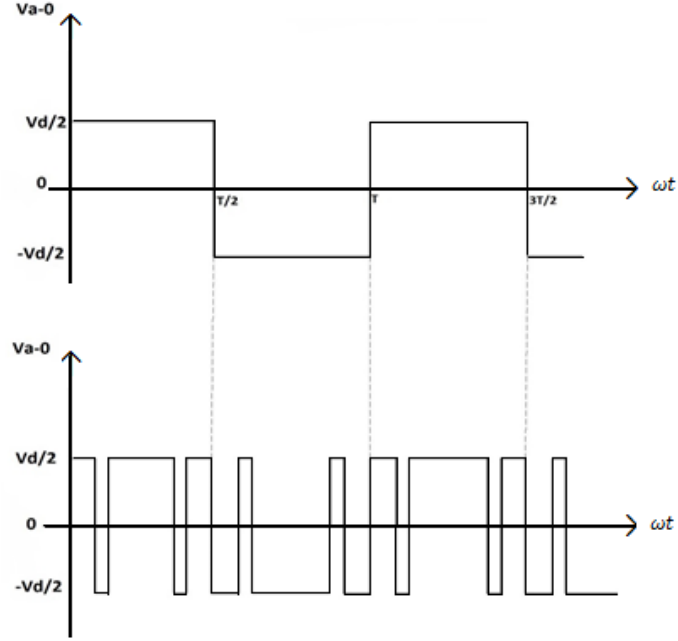
$$V_1 = \frac{2V_d}{\sqrt{2\pi}} = 0,45 V_d \quad (1.8)$$



Şekil 2. Tek fazlı yarım köprü evirici şekli ve anahtarları

Şekil 2'deki tek fazlı yarım köprü eviricilerde iki kontrol durumu vardır. S_1 anahtarı kapalı, S_2 anahtarının açık olduğu durumda $V_{a,0}$ gerilimi pozitif, S_2 anahtarının kapalı

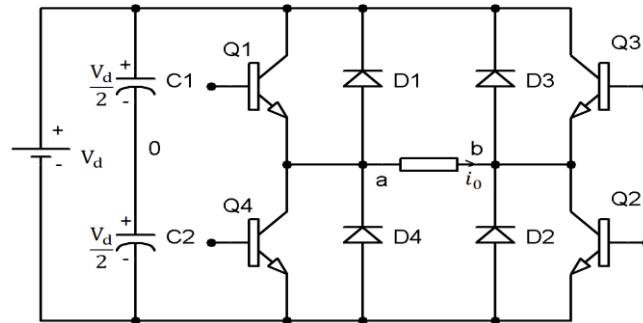
S_1 anahtarının açık olduğu durumda V_{a_0} gerilimi negatif olur. Şekil 3’de ilk grafik tek faz yarım dalga köprü eviricinin kare dalga çıkışı gerilimini, ikinci grafik ise PWM dalga çıkış gerilimi göstermektedir.



Şekil 3. Tek faz köprü evirici çıkış gerilimi dalga şekilleri

1.3.3.2. Tek Fazlı Tam Köprü Eviriciler

Tek fazlı tam köprü evirici Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Tek fazlı tam köprü evirici

Bu eviriciler dört kıyııcıdan oluşmaktadır. Q_1 ve Q_2 transistörleri aynı anda ilettime geçtiğinde, yük uçlarında V_d giriş gerilimi görülür. Q_3 ve Q_4 transistörleri iletimde iken yük uçlarındaki gerilim $-V_d$ olur [45].

Tablo 1. Tek faz tam köprü eviricinin anahtarlama durumları

DURUM	V_{a0}	V_{b0}	V_0	İLETİMDEKİ ELEMANLAR
Q_1 ve Q_2 iletimde Q_3 ve Q_4 kesimde	$V_d/2$	$-V_d/2$	V_d	Eğer $i_0 > 0$ ise Q_1 ve Q_2 Eğer $i_0 < 0$ ise D_1 ve D_2
Q_3 ve Q_4 iletimde Q_1 ve Q_2 kesimde	$-V_d/2$	$V_d/2$	$-V_d$	Eğer $i_0 > 0$ ise D_3 ve D_4 Eğer $i_0 < 0$ ise Q_3 ve Q_4
Q_1 ve Q_3 iletimde Q_2 ve Q_4 kesimde	$V_d/2$	$V_d/2$	0	Eğer $i_0 > 0$ ise Q_1 ve D_3 Eğer $i_0 < 0$ ise D_1 ve Q_3
Q_2 ve Q_4 iletimde Q_1 ve Q_3 kesimde	$-V_d/2$	$-V_d/2$	0	Eğer $i_0 > 0$ ise D_4 ve Q_2 Eğer $i_0 < 0$ ise Q_4 ve D_2
Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 'ün hepsi kesimde	$-V_d/2$ $V_d/2$	$V_d/2$ $-V_d/2$	$-V_d$ V_d	Eğer $i_0 > 0$ ise D_3 ve D_4 Eğer $i_0 < 0$ ise D_1 ve D_2

Tablo 1 eviricinin anahtarlama durumunu gösterir. Devre üzerindeki transistörler anahtarlama elemanı gibi davranırlar. Çıkış gerilimi $\pm V_d$ olacak şekilde biri üstte diğeri altta bulunan iki anahtar aynı zamanda iletirse anahtar durumu 1, aynı anda kesimdeyse anahtar durumu 0 olur.

Çıkış geriliminin etkin değeri;

$$V_0 = \sqrt{\left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_d^2 dt\right)} = V_d \quad (1.9)$$

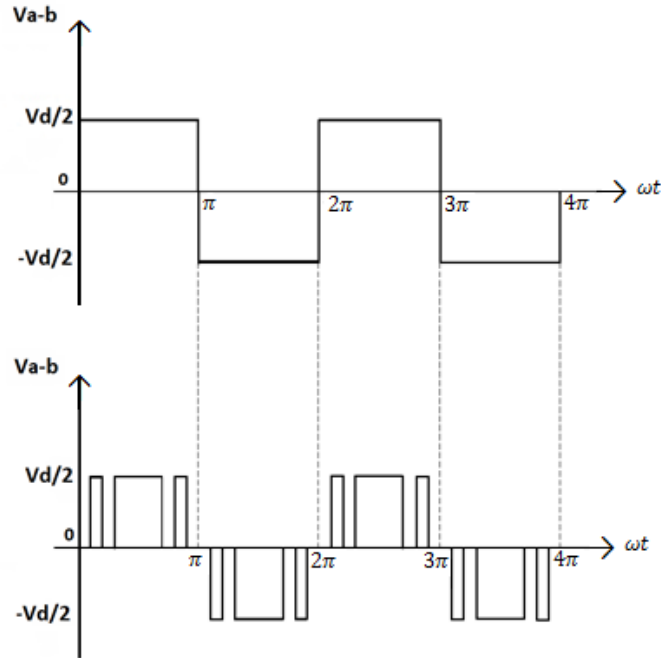
Ani çıkış gerilimini Fourier serisi ile ifade etmek istersek:

$$V_0 = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_d}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (1.10)$$

$n=1$ için ana bileşenin etkin değeri:

$$V_{01} = \frac{4V_d}{\sqrt{2\pi}} = 0,90 V_d \quad (1.11)$$

olur. Yarım ve tam köprü eviricilerde çıkış geriliminin kalitesi aynıdır. Fakat tam köprü eviricilerde, çıkış gücü dört kat daha fazladır ve ana bileşen yarım köprü eviricilerin iki katıdır. Şekil 5'te ilk grafikte tek faz tam köprü eviricinin kare dalga çıkış gerilimi, ikinci grafikte PWM dalga çıkış gerilimini göstermektedir.



Şekil 5. Tek faz tam köprü evirici çıkış gerilimi dalga şekilleri

Tam köprü evirici topolojileri yarım köprü topolojilerinden türetilir. Bu eviricilerde 4 anahtarlama elemanı bulunduğu ve her anahtarın (açık-kapalı) iki anahtarlama seçimi olduğundan $2^4=16$ tane anahtarlama kombinasyonu mevcuttur. Bu kombinasyonlardan yalnızca 4 tanesi yük üzerinde alternatif gerilim oluşmasını sağlar. Bu dört durum aşağıdaki gibidir:

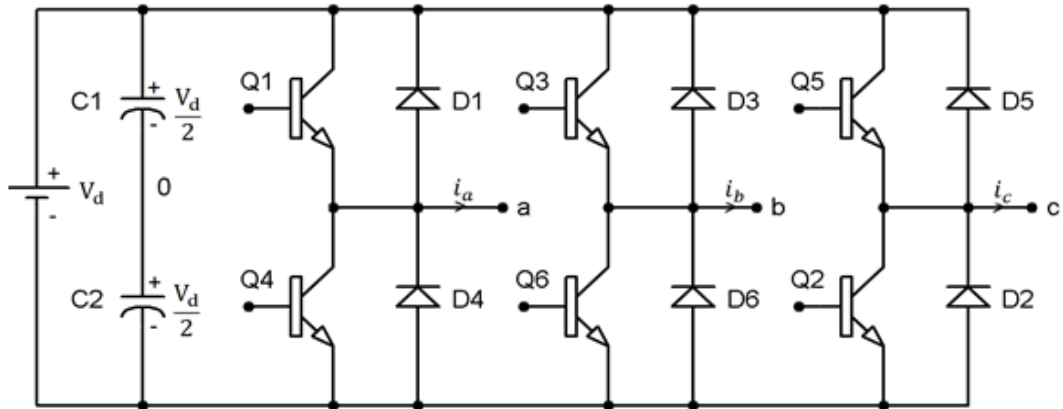
Anahtarlar	Yük Gerilimi
Q_1, Q_2	$+V_d$
Q_3, Q_4	$-V_d$
Q_1, Q_3	0
Q_2, Q_4	0

Böylece yük gerilimi olan $V_{a,b}$ için 3 durum söz konusu olur. Yük gerilimi $V_{a,b}$ aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$V_{a,b} = V_{a,0} - V_{b,0} \quad (1.12)$$

1.3.4. Üç Fazlı Eviriciler

Üç fazlı eviriciler yüksek güç uygulamalarında kullanılır. Üç adet tek fazlı yarım (veya tam) köprü eviricinin paralel bağlanmasıyla oluşturulurlar. Tek fazlı eviricinin anahtarlama işaretleri çıkışta üç fazlı dengeli gerilimler elde etmek için aralarında 120° farklarla iletme alınmalıdır. Şekil 6'da üç fazlı tam köprü evirici şekli gösterilmiştir.



Şekil 6. Üç fazlı tam köprü evirici

Üç fazlı bir çıkış altı transistör ve altı diyotun farklı iletimde olma durumlarına göre elde edilir. Transistörlere uygulanan iki tür kontrol işareti vardır. 180° iletim ve 120° iletim. 180° iletim de anahtarlar daha iyi kullanılır ve tercih edilen bir yöntemdir [45].

Tablo 2. Üç faz köprü eviricinin anahtarlama durumları

DURUM	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
Q_1, Q_2 ve Q_6 iletimde ve Q_3, Q_4 ve Q_5 kesimde	V_d	0	$-V_d$
Q_1, Q_2 ve Q_3 iletimde ve Q_4, Q_5 ve Q_6 kesimde	0	V_d	$-V_d$
Q_2, Q_3 ve Q_4 iletimde ve Q_1, Q_5 ve Q_6 kesimde	$-V_d$	V_d	0
Q_3, Q_4 ve Q_5 iletimde ve Q_1, Q_2 ve Q_6 kesimde	$-V_d$	0	V_d
Q_4, Q_5 ve Q_6 iletimde ve Q_1, Q_2 ve Q_3 kesimde	0	$-V_d$	V_d
Q_1, Q_5 ve Q_6 iletimde ve Q_2, Q_3 ve Q_4 kesimde	V_d	$-V_d$	0
Q_1, Q_3 ve Q_5 iletimde ve Q_2, Q_4 ve Q_6 kesimde	0	0	0
Q_2, Q_4 ve Q_6 iletimde ve Q_1, Q_3 ve Q_5 kesimde	0	0	0

Tablo 2’de sekiz anahtar durumu gösterilmiştir. $Q_1 - Q_6$ transistörleri anahtarlama elemanı olarak davranır. Anahtarlardan ikisi biri üstte diğeri altta, çıkış gerilimini $\pm V_d$ olacak şekilde aynı anda iletirse anahtar durumu 1, aynı anda kesimde olursa anahtar durumu 0 olur.

1’den 6’ya kadarki durumlarda çıkış gerilimi üretilirken, 7 ve 8 durumlarında sıfır hat gerilimi üretilir. Sonuç olarak çıkışta V_d , 0 ve $-V_d$ gerilimlerinden oluşan bir AC gerilim oluşur [45].

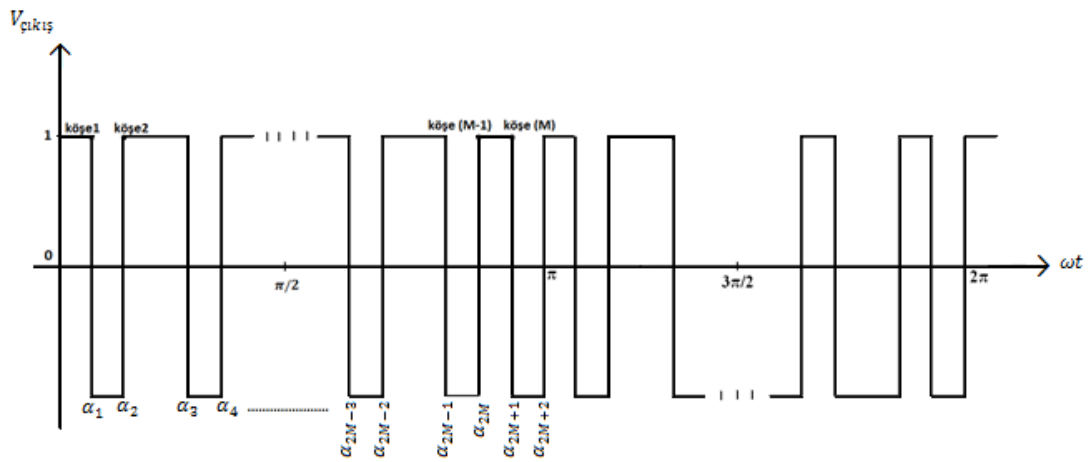
1.4. Seçici Harmonik Eliminasyon (SHE)

Günümüz endüstrisinde oldukça sık kullanılan eviricilerin çıkış dalga şekilleri genellikle birçok harmonik içermektedir. Eviricilerde anahtarlama harmoniklerinin ortadan kaldırılması için yıllardır pek çok araştırma yapılmış ve çeşitli PWM teknikleri

geliştirilmiştir. Evirici için anahtar kayıpları önemsenmiyorsa, yüksek anahtarlama frekanslı PWM'ler yardımıyla düşük harmonik bozunumlu ve istenilen genlikte çıkış gerilimleri elde edilebilir. Fakat sistem için yüksek anahtarlama verimliliği önemli ise anahtarlama frekansı düşük tutulmalıdır. Seçici Harmonik Eliminasyonu (SHE) ise düşük frekanslarda, çıkıştaki gerilimin ana harmoniğini ve diğer küçük harmonikleri elimine edebilmemizi sağlayan bir PWM tekniğidir. Bu teknikteki asıl amaç temel bileşeni istenilen şekilde belirli bir aralık içinde ayarlanabilen ve özel olarak seçilen harmoniklerin elimine edildiği sinüsoidal AC çıkış gerilim dalga şekli elde etmektir. Elimine işlemi yapıldıktan sonra kalan diğer küçük harmonikler ise küçük pasif bir filtre kullanılarak yok edilebilir [19,20].

SHEPWM tekniğinde farklı modülasyon indeksleri (M_a) için lineer olmayan denklemler çözülerek optimum N tane anahtarlama açısı bulunur. Bu lineer olmayan denklem takımlarının çözümlerinde Newton Raphson (NR), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Genetik Algoritmalar (GA) gibi bir çok metot kullanılmaktadır. Fakat Newton Raphson metodunda başlangıç değerinin doğru atanması oldukça önemlidir aksi takdirde sonuç doğru bulunamayabilir. Sabit bir denklem takımında çözüm yapılmadığı için bu oldukça zor bir iştir. Ayrıca çok seviyeli eviricilerde, evirici seviyesine bağlı olarak çözüm yapılması gereken denklem takımlarının sayısı ve bilinmeyen değer sayısı arttığı için Newton Raphson metodu bu bilinmeyenler çözmekte yeterli olamamaktadır [20].

1.4.1. Yarım Köprü Eviricilerde Harmonik Eliminasyonu



Şekil 7. Tek faz yarım köprü evirici faz nötr çıkışı

Şekil 7’de yarım köprü eviricilerin SHEPWM yöntemi ile elde edilmiş çıkış dalga şekli gösterilmiştir. Burada ‘M’ köşe sayılarının toplamını ifade eder. İlk yarım periyottaki dalga şekilleri, ikinci yarım periyottaki dalga şekillerinin genlik olarak simetrisi şeklindedir [46]. Bu nedenle;

$$f(\omega t) = -f(\omega t + \pi) \quad (1.13)$$

olarak ifade edilebilir.

İlk yarım periyotta M tane köşe olduğunu varsayarsak; anahtarlama açılarının sayısı köşe sayısının iki katı kadardır ve a_1, a_2, \dots, a_{2M} şeklinde tanımlanır. Evirici çıkış faz-nötr gerilimi dalga şeklini Fourier Serisi ile tanımlamak istersek aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$f(\omega t) = -f(\omega t + \pi) \quad (1.13)$$

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (1.14)$$

Burada;

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (1.15)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} -f(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (1.16)$$

Denklem (1.15)’de $f(\omega t)$ ’yi yerine yazarsak,

$$a_n = \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{2m} (-1)^k \int_{a_k}^{a_{k+1}} \sin(n\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (1.17)$$

Anahtarlama açılarının değerleri, $a_0 = 0$, $a_{2M+1} = \pi$ ve $a_0 < a_1 < a_2 < \dots < a_{2M+1}$ 'dir. Buna göre denklem (1.17)'yi düzenleyecek olursak,

$$a_n = \frac{2}{n\pi} \left[\cos na_0 - \cos na_{2m+1} + 2 \sum_{k=1}^{2m} (-1)^k \cdot \cos na_k \right] \quad (1.18)$$

$a_0 = 0$ ve $a_{2M+1} = \pi$ olduğundan burada;

$$\cos na_0 = 1 \quad (1.19)$$

$$\cos na_{2m+1} = (-1)^n \quad (1.20)$$

olur. Denklem (1.18)'i bu eşitliklere göre tekrar yazarsak,

$$a_n = \frac{2}{n\pi} \left[1 - (-1)^n + 2 \sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \cos(na_k) \right] \quad (1.21)$$

olur. Ve aynı şekilde; b_n aşağıdaki gibi bulunur.

$$b_n = -\frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \sin(na_k) \quad (1.22)$$

Her pozitif n değeri için $a_n = 0$ ve $b_n = 0$ olurken, negatif n değerleri için denklem (1.21) ve denklem (1.22) yeniden düzenlenirse aşağıdaki formüller elde edilir.

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + \sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \cos(na_k) \right] \quad (1.23)$$

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[- \sum_{k=1}^{2M} (-1)^k \sin(na_k) \right] \quad (1.24)$$

Denklem (1.23) ve denklem (1.24) kullanılarak bulunan anahtarlama açıları ile istenilen tüm harmonikleri elimine etmek mümkün olacaktır.

Yarım dalga simetrisini kullanarak denklem (1.23) ve denklem (1.24) de ki $\cos na_k$ ve $\sin na_k$ değerlerini hesaplamak istersek,

$$f(\omega t) = f(\pi - \omega t) \quad (1.25)$$

$$a_k = \pi - a_{2M-k+1} \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (1.26)$$

Yarım dalga simetrisi özelliğini ifade eden denklem (1.25) ve (1.26) ile, $\sin na_k$;

$$\begin{aligned} \sin na_k &= \sin n(\pi - a_{2M-k+1}) \\ &= [\sin n\pi \cdot \cos na_{2M-k+1} - \cos n\pi \cdot \sin na_{2M-k+1}] \end{aligned} \quad (1.27)$$

olarak bulunur. Tek n değeri için, $\sin n\pi = 0$, $\cos n\pi = -1$ için denklem (1.27) düzenlenirse,

$$\sin na_k = \sin n(\pi - a_{2M-k+1}) \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (1.28)$$

Denklem (1.28) denklem (1.24)'de yerine yazılırsa,

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^m (\sin na_k - \sin na_{2M-k+1}) = 0 \quad (1.29)$$

eşitliği elde edilir. Aynı şekilde $\cos na_k$ değerini bulmak için ise denklem (1.26)'dan faydalanılır.

$$\cos na_k = \cos n(\pi - a_{2M-k+1}) \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (1.30)$$

Tek sayılar için Denklem (1.30) yeniden düzenlenirse;

$$\cos na_k = -\cos na_{2M-k+1} \quad k = 1, 2, \dots, M \quad (1.31)$$

elde edilir ve denklem (1.31) ve (1.23) beraber çözüldüğünde;

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos(na_k) \right] \quad (1.32)$$

olarak bulunur. Harmonikleri elimine etme problemlerinde denklem (1.29) ve denklem (1.32) kullanılır.

1.4.2. Doğrusal Olmayan Denklemleri Çözmek İçin Sayısal Bir Yöntem

Doğrusal olmayan denklemlere sahip, M tane farklı anahtarlama açısına sahip sistemler aşağıdaki gibi temsil edilebilir [46].

$$f_i(a_1, a_2, \dots, a_M) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1.33)$$

$M \times M$ boyutlu katsayılar matrisi oluşturularak, harmoniklerin genliklerini sıfırlayarak anahtarlama açıları elde edilmiş olur.

$$f(a) = 0$$

$$f = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_M]^T \quad M \times 1 \text{ matris} \quad (1.34)$$

$$a = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_M]^T \quad M \times 1 \text{ matris}$$

olmak üzere, denklem (1.34) doğrusallaştırma tekniği ile çözülebilir. Bu teknik ile doğrusal olmayan denklemler yardımıyla çözüme yakın sonuçlar elde edilebilir. Çözüm için aşağıdaki adımlar takip edilir [46].

- 1) a için bir dizi değer atanır.

$$a^0 = [a_1^0, a_2^0, \dots, a_M^0]^T \quad (1.35)$$

- 2) Atanan bu değerler f fonksiyonunda yerine yazılır.

$$f(a^0) = f^0 \quad (1.36)$$

- 3) Denklem (1.34) kullanılarak a° açısı değerlendirme yapılır.

$$f^0 + \left[\frac{\partial f}{\partial a} \right]^0 d_a = 0 \quad (1.37)$$

$$\left[\frac{\partial f}{\partial a} \right]^0 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_1} & \frac{\partial f_1}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial a_M} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_1} & \frac{\partial f_2}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial a_M} \\ \frac{\partial f_M}{\partial a_1} & \frac{\partial f_M}{\partial a_2} & \dots & \frac{\partial f_M}{\partial a_M} \end{bmatrix}$$

- 4) d_a için denklem (1.37) çözülür.
5) 1 ve 4. Adımlar her bir a açısı için tekrarlanır.

$$a^1 = a^0 + d_a \quad (1.38)$$

Bu adımlar doğrulukta tatmin edici dereceye gelene kadar tekrar edilir ($f(a) = 0$). Eğer sonuçta önceki tahminden uzaklaşma olursa yeni bir başlangıç değeri atanması gerekir. Yeni değer de tahmini bir şekilde atanır. Bu yöntem deneme yanılma metodu denir. Doğru sonuç aşağıdaki değerleri sağlamalıdır.

$$0 < a_1 < a_2 < \dots < a_M < \pi/2 \quad (1.39)$$

Üç fazlı sistemlerde 3 ve 3'ün katları harmonikler olmadığından tek faz dalga formlarında bunların elimine edilmesine gerek yoktur.

ÖRNEK: Tek faz yarım köprü bir eviricide, 3, 5, 7 ve 9. Harmonikleri elimine etmek için;

Denklem (1.29) ve (1.32) ile beraber çıkış gerilimini fourrier serisi ile açarsak;

$$V(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos(na_k) \right] \quad (1.40)$$

elde edilir. İdealde temel gerilim değeri V_1 anahtarlama açılarının bulunmasında kullanılır.

$$V(\omega t) = V_1 \sin(\omega t) \quad (1.41)$$

Burada amaç ilk harmonik değerini istenilen temel gerilim değeri olan V_1 değerine eşitlemek ve $V(\omega t)$ gerilimindeki belirli yüksek harmonikleri sıfıra eşitleyebilmek için anahtarlama açılarını seçmektir. Anahtarlama açıları $0 < a_1 < a_2 < \dots < a_M < \pi/2$ aralığı arasında seçilir. a açılarını bulmak için kullandığımız denklem takımı yukarıdaki veriler ile aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{4V_{dc}}{\pi} [1 - 2 \cos a_1 + 2 \cos a_2 - \dots - 2 \cos a_5] = V_1 \quad (1.42)$$

$$1 - 2 \cos(3a_1) + 2 \cos(3a_2) - \dots - 2 \cos(3a_5) = 0$$

$$1 - 2 \cos(5a_1) + 2 \cos(5a_2) - \dots - 2 \cos(5a_5) = 0$$

$$1 - 2 \cos(7a_1) + 2 \cos(7a_2) - \dots - 2 \cos(7a_5) = 0$$

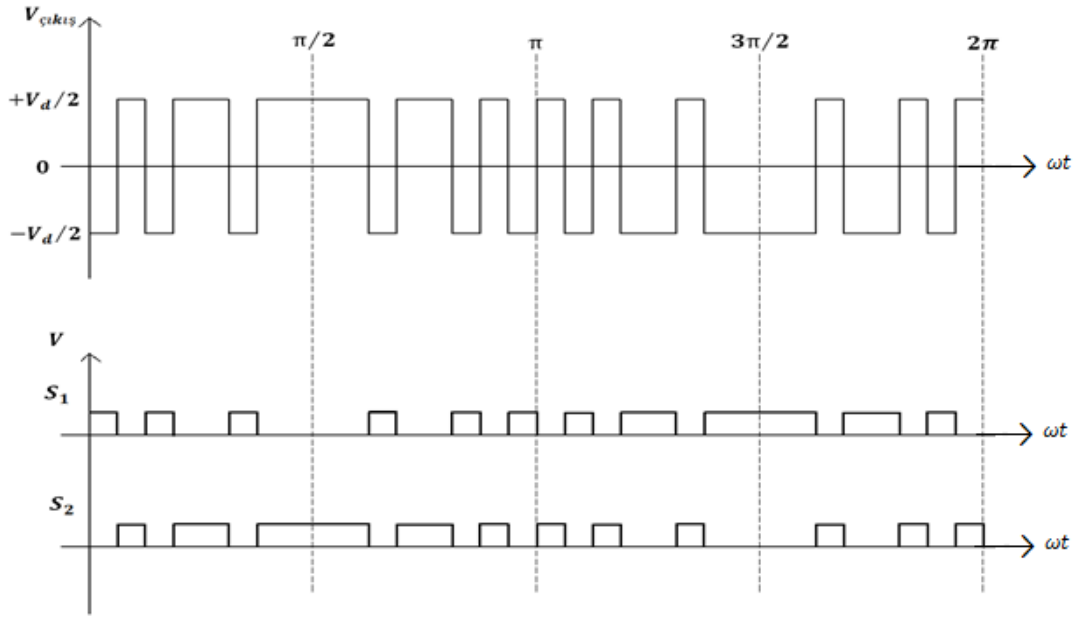
$$1 - 2 \cos(9a_1) + 2 \cos(9a_2) - \dots - 2 \cos(9a_5) = 0$$

Modülasyon indeksi ise;

$$M_a = \frac{V_1 \pi}{4V_{dc}} \text{ formülü ile bulunur [46]. Görüldüğü gibi burada beş tane, beş}$$

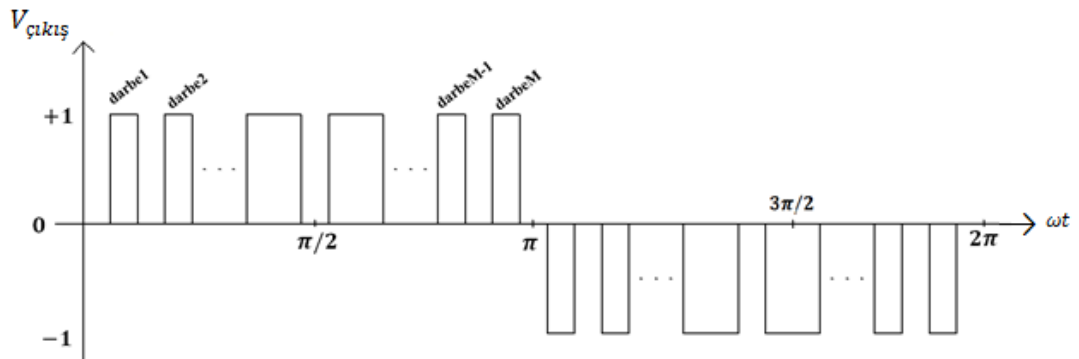
bilinmeyenli $(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ denklem vardır. Bu denklem takımlarının çözümünde

linear olmayan çözümler kullanılabilir. Newton Raphson'da bu çözümlerden biri olmasına karşın bilinmeyen ve denklem sayısı fazla olduğundan çözüm için yeterli olamaz. Bu tez kapsamında bu denklem takımlarını çözmek için parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritmalar yöntemi kullanılmıştır. Şekil 8'da SHEPWM yöntemi ile elde edilmiş çıkış gerilimi ve bu gerilimi elde edebilmek için oluşturulan anahtarlama şekilleri verilmiştir.



Şekil 8. Tek faz yarım köprü eviricilerde anahtarlama şekilleri

1.4.3. Tek Faz Tam Köprü Eviricilerde Harmonik Eliminasyonu



Şekil 9. Tek faz tam köprü eviricide çıkış dalga gerilimi

Her 180° periyotluk dalga şekillerinde tek faz yarım köprü eviricilerdeki köşe sayısı yerine tek faz tam köprü eviricilerde darbe işaretleri vardır. İlk yarım periyottaki darbe işaretleri ikinci yarım periyottaki darbe işaretlerinin genlikleri bakımından ters polarlanmış halidir. Şekil 7'dekin aksine şekil 9'daki elimine edilecek harmonik sayısı darbe sayısı kadar olması bir avantajdır. Gerilimin yön değiştirme sayısına N dersek tam bir periyotta tek faz yarım köprü eviricilerde N_1 ;

$$N_1 = 2(2M + 1) = 4M + 2 \quad (1.43)$$

Tek faz tam köprü eviricilerde ki gerilim yön değiştirme sayısı N_2 ;

$$N_2 = 2(2M) = 4M \quad (1.44)$$

olarak yazılabilir. Denklem (1.43) ve denklem (1.44)'den de anlaşılacağı gibi yarım köprü eviriciler için bir tam periyot süresince fazlardan iki tane daha gerilim yön değiştirmesi vardır.

Şekil 11'deki dalga formlarını tek çeyrek dalga simetrisine göre Fourier Serisinde n 'in tek değerleri için denklem halinde yazılırsa [46];

$$a_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (1.45)$$

elde edilir. n 'in pozitif değerleri için ise;

$$a_n = 0 \text{ ve } b_n = 0 \quad (1.46)$$

olur. Tüm n değerleri için denklem (1.45) ve denklem (1.46) yeniden düzenlenirse;

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) \quad (1.47)$$

olur. Denklem (1.45)'i tek n ve tek M değerleri için yazarsak;

$$\begin{aligned}
a_n &= \frac{4}{\pi} \left[\int_{a_1}^{a_2} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \int_{a_3}^{a_4} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \dots + \int_{a_m}^{\frac{\pi}{2}} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \right] \\
&= \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} \cos(na_k) \tag{1.48}
\end{aligned}$$

Tek n değerleri için $\cos n \frac{\pi}{2} = 0$ olacaktır.

Tek n ve tüm M değerleri için;

$$\begin{aligned}
a_n &= \frac{4}{\pi} \left[\int_{a_1}^{a_2} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \int_{a_3}^{a_4} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \dots + \int_{a_M}^{\frac{\pi}{2}} \sin(n\omega t) d(\omega t) + \right] \\
&= \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} \cos(na_k) \tag{1.49}
\end{aligned}$$

Denklem (1.48) ve (1.49) aynı olduğu için genel olarak a_n denklemi

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^m (-1)^{k+1} \cos(na_k) \tag{1.50}$$

olur. Buradaki a değerleri de; $0 < a_1 < a_2 < \dots < a_M < \pi/2$ aralığındadır. Her M harmoniği; denklem (1.50)'de anahtarlama açılarının (a_1, a_2, \dots, a_M) yerine yazılmasıyla sıfıra eşitlenir. Böylece;

$$f_i(a) = \frac{4}{n_i\pi} \sum_{k=1}^M (-1)^{k+1} \cos(n_i a_k) = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \tag{1.51}$$

ÖRNEK: Tek faz tam köprü eviricilerde 3, 5, 7 ve 9. harmonikleri elimine etmek için; denklem (1.29) ve (1.50) yardımıyla, çıkış gerilimini fourrier serisi ile açarsak;

$$V(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^{k+1} \cos(na_k) \right] \sin(n\omega t) \quad (1.52)$$

$$V(\omega t) = V_1 \sin(n\omega t) \quad (1.53)$$

$$\frac{4V_{dc}}{\pi} [\cos a_1 - \cos a_2 + \cos a_3 - \cos a_4 + \cos a_5] = V_1 \quad (1.54)$$

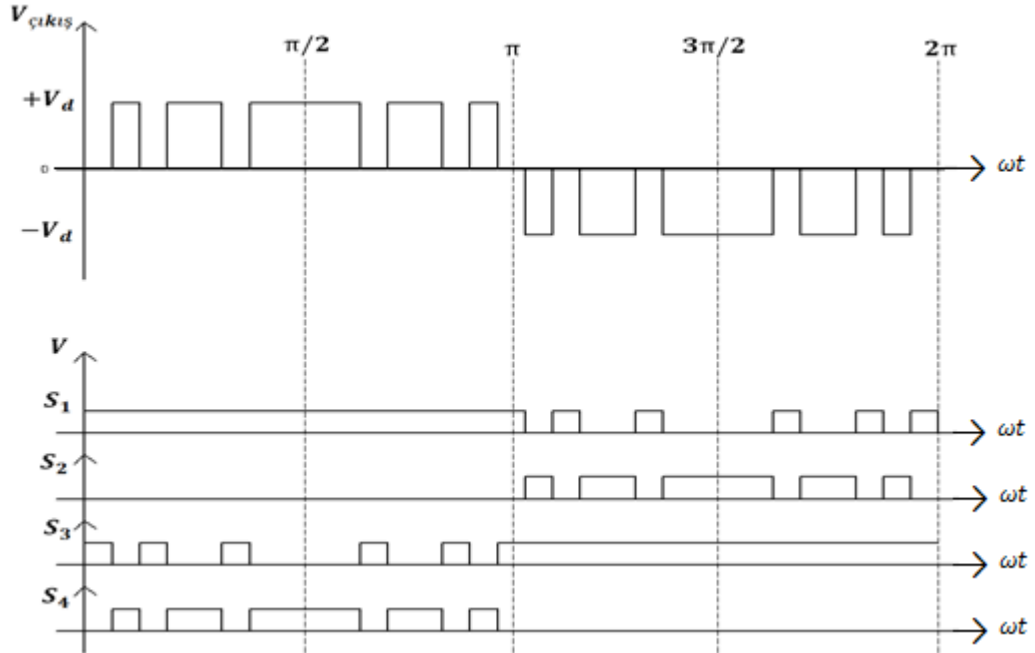
$$\cos(3a_1) - \cos(3a_2) + \cos(3a_3) - \cos(3a_4) + \cos(3a_5) = 0$$

$$\cos(5a_1) - \cos(5a_2) + \cos(5a_3) - \cos(5a_4) + \cos(5a_5) = 0$$

$$\cos(7a_1) - \cos(7a_2) + \cos(7a_3) - \cos(7a_4) + \cos(7a_5) = 0$$

$$\cos(9a_1) - \cos(9a_2) + \cos(9a_3) - \cos(9a_4) + \cos(9a_5) = 0$$

Modülasyon indeksi ise; $M_a = \frac{V_1\pi}{4V_{dc}}$ formülü ile bulunur.



Şekil 10. Tek faz tam köprü eviricilerde anahtarlama şekilleri

ÖRNEK: Üç fazlı bir sistemi oluşturabilmek için üç tane tek fazlı yarım köprü doğrultucu kullanılabilir. Üç fazlı bir gerilim elde edebilmek için üç tane anahtarlama açısı

gereklidir. Aynı üç anahtarlama açısını $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ kaydırarak A, B, C fazlarını oluşturmak için bütün üç fazlarda kullanabiliriz.

Üç fazlı sistemlerde hat gerilimi üzerinde üç ve üçün katları harmoniklerin olmaması bir avantajdır. Faz gerilimi üzerinde yalnızca üç ve üçün katı olmayan harmonikler elimine edilir. Tek fazlı dalga formlarında 3, 5, 7 ve 9. harmonikler elimine edilebilirken üç fazlı sistemlerde 5, 7, 11 ve 13. harmonikler elimine edilebilir. Üç fazlı bir sistemde hat üzerindeki gerilimde 17. Harmonik en zayıf harmonik bileşenidir. 5, 7, 11 ve 13. harmonikleri elimine etmek için denklem (1.29) ve (1.32)'yi kullanarak;

$$V(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_{dc}}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos(nak) \right] \sin(n\omega t) \quad (1.55)$$

$$\frac{4V_{dc}}{\pi} [1 - 2 \cos a_1 + 2 \cos a_2 - \dots - 2 \cos a_5] = V_1 \quad (1.56)$$

$$1 - 2 \cos(5a_1) + 2 \cos(5a_2) - \dots - 2 \cos(5a_5) = 0$$

$$1 - 2 \cos(7a_1) + 2 \cos(7a_2) - \dots - 2 \cos(7a_5) = 0$$

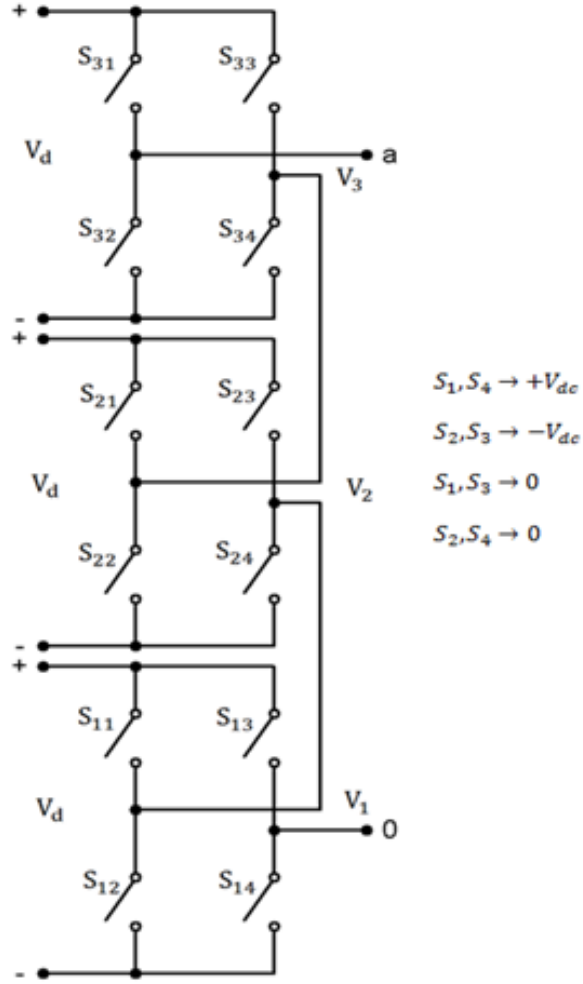
$$1 - 2 \cos(11a_1) + 2 \cos(11a_2) - \dots - 2 \cos(11a_5) = 0$$

$$1 - 2 \cos(13a_1) + 2 \cos(13a_2) - \dots - 2 \cos(13a_5) = 0$$

denklemleri elde edilir. Modülasyon indeksi ise; $M_a = \frac{V_1 \pi}{4V_{dc}}$ formülü ile bulunur.

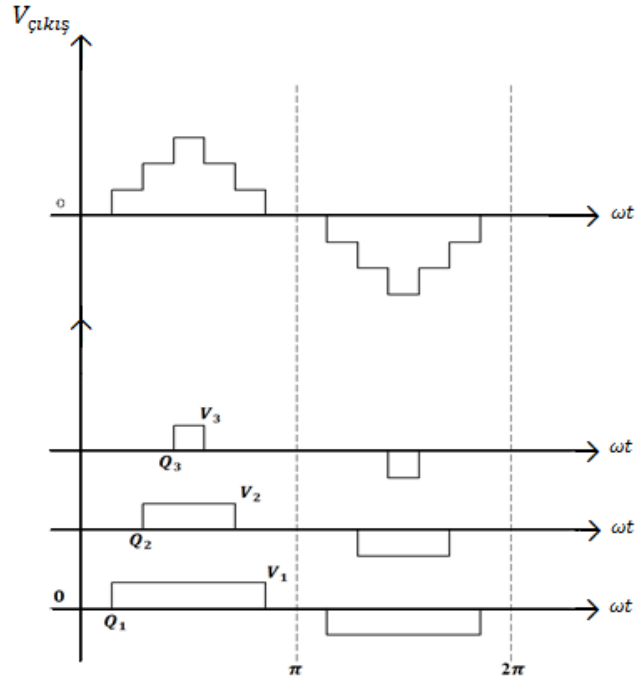
1.5. Çok Seviyeli Eviriciler ve Dalga Şekilleri

1.5.1. 7 Seviyeli Tam Köprü Eviricilerde Anahtarlama Şekilleri



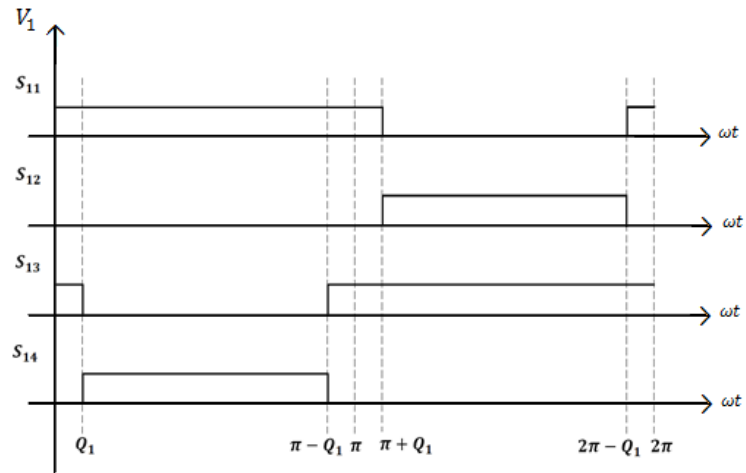
Şekil 11. 7 seviyeli tam köprü evirici

Şekil 11'de V_1, V_2, V_3 çıkış gerilimleri elde edilirken her birinde, 1. ve 4. anahtarların anahtarlanması durumunda çıkış $+V_d$, 2. ve 3. anahtarların anahtarlanması durumunda çıkış $-V_d$, 1. ve 3. anahtarlar ile 2. ve 4. anahtarların anahtarlanması durumunda ise çıkış '0'a eşit olacaktır.

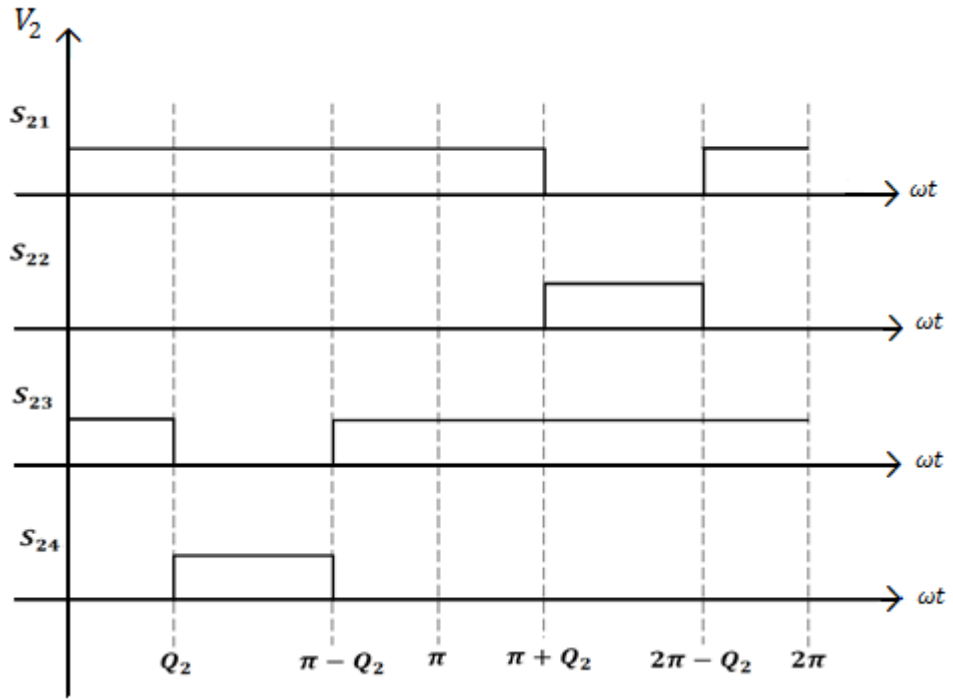


Şekil 12. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde çıkış gerilimi dalga şekli

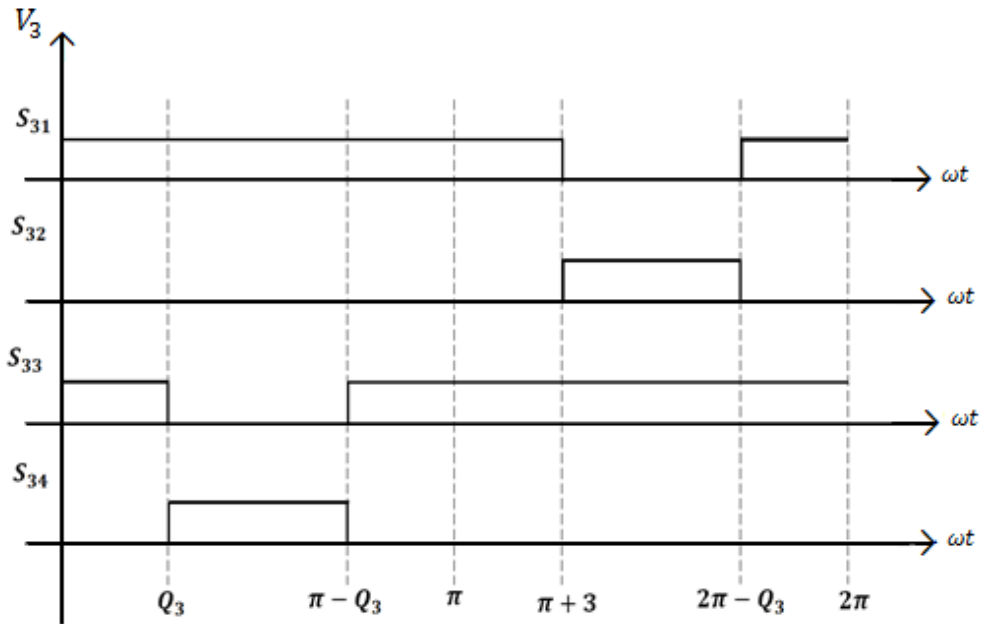
Şekil 12’te evirici çıkış geriliminin V_1, V_2 ve V_3 gerilimlerinin toplamı olduğu görülmektedir. V_1 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 13, V_2 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 14 ve V_3 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 15’deki gibi anahtarlanmalıdır.



Şekil 13. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_1 gerilimi anahtarlama şekilleri

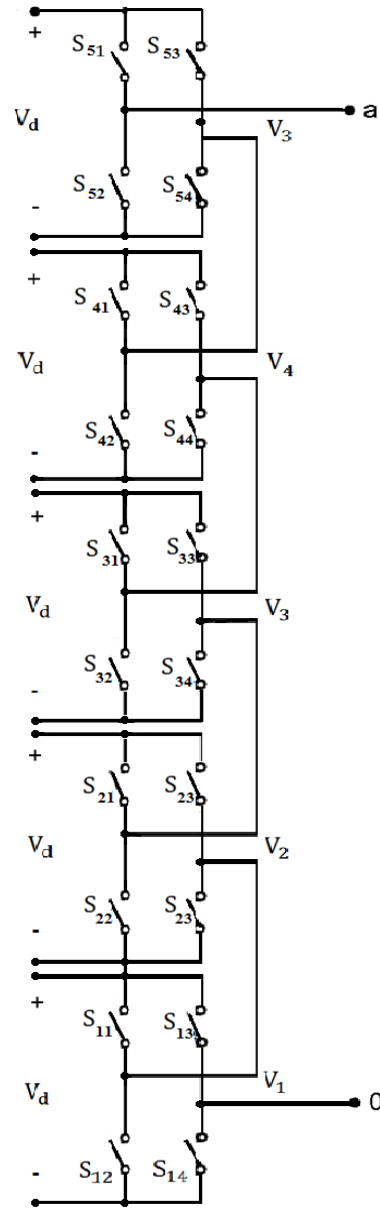


Şekil 14. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_2 gerilimi anahtarlama şekilleri



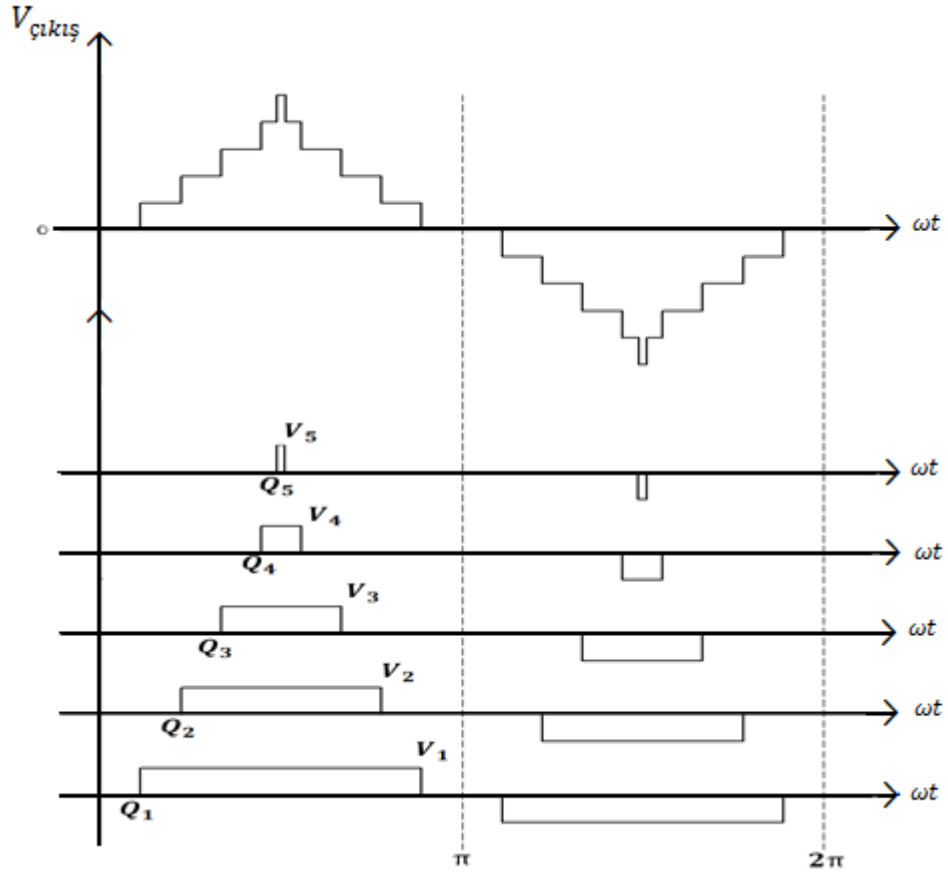
Şekil 15. 7 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_3 gerilimi anahtarlama şekilleri

1.5.2. 11 Seviyeli Tam Köprü Eviricilerde Anahtarlama Şekilleri

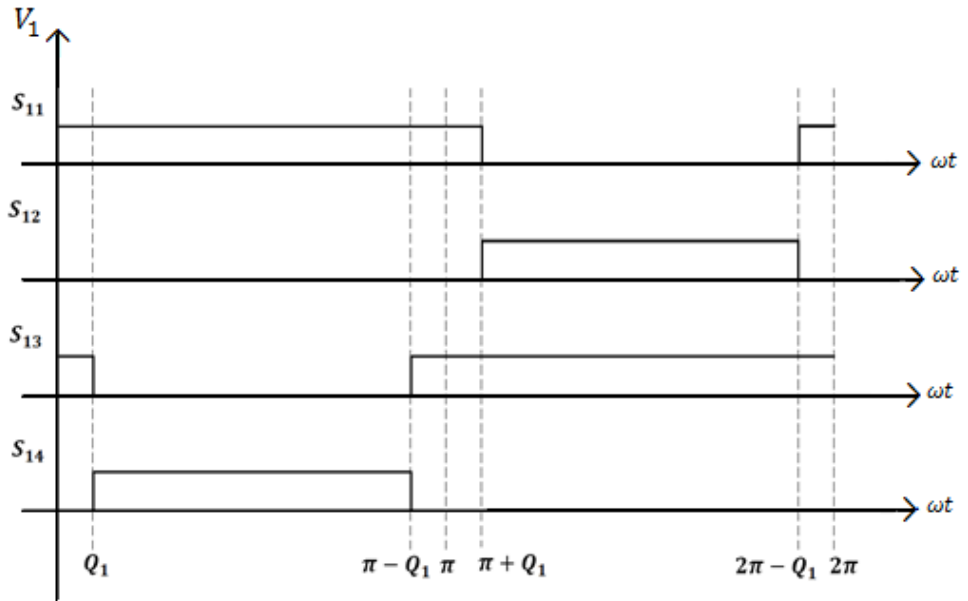


Şekil 16. 11 Seviyeli tam köprü evirici

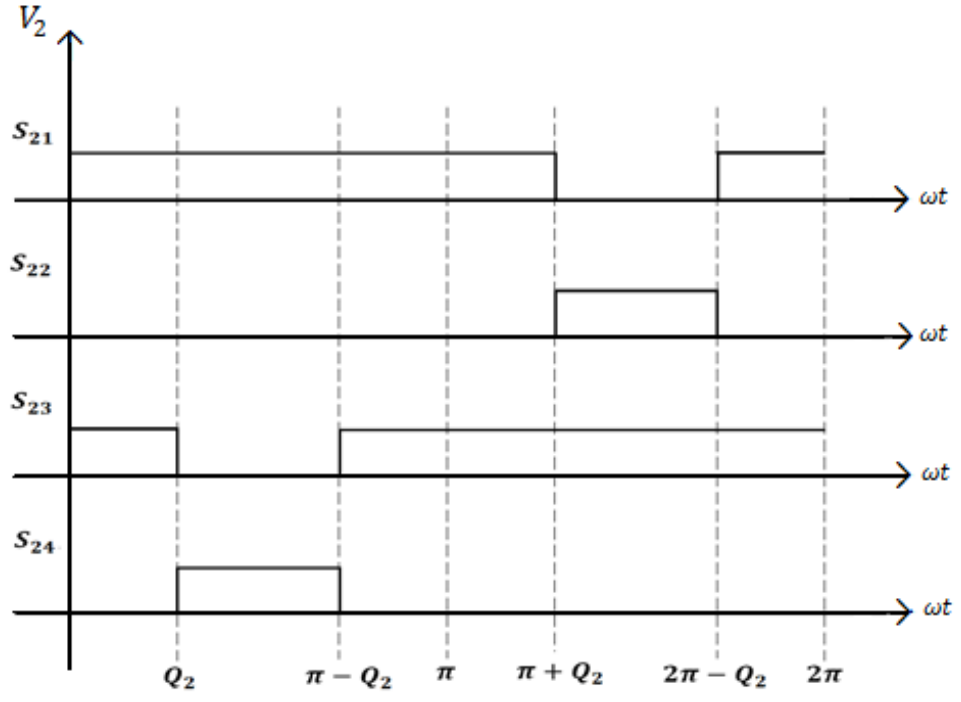
Şekil 17’de evirici çıkış geriliminin V_1, V_2, V_3, V_4 ve V_5 gerilimlerinin toplamı olduğu görülmektedir. V_1 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 18, V_2 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 19, V_3 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 20, Şekil 16, V_4 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 21, V_5 gerilimini oluşturabilmek için anahtarlar sırasıyla Şekil 22’teki gibi anahtarlmalıdır.



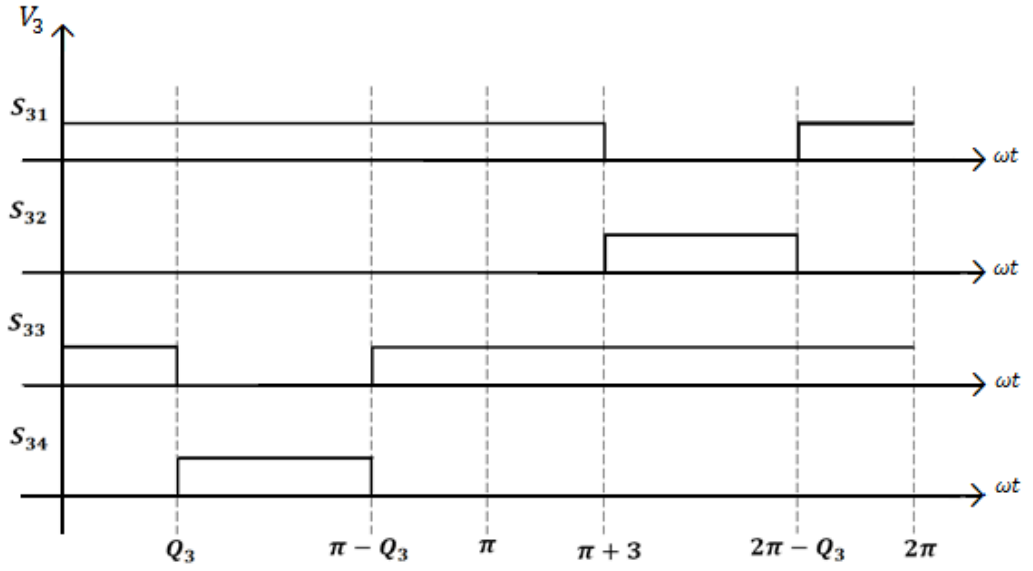
Şekil 17. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde çıkış gerilimi dalga şekli



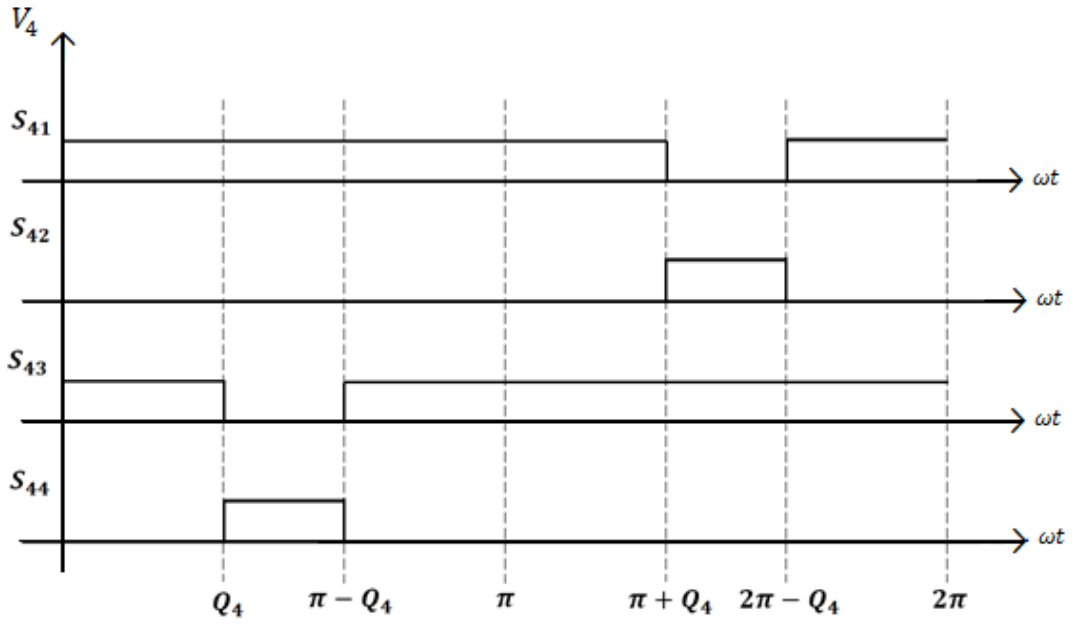
Şekil 18. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_1 gerilimi anahtarlama şekilleri



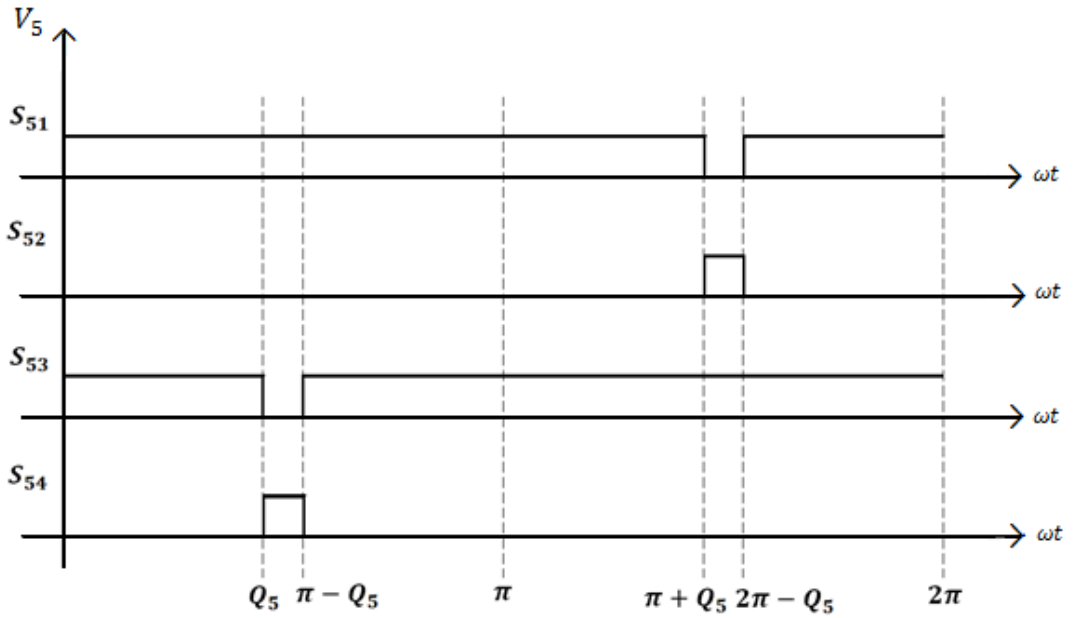
Şekil 19. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_2 gerilimi anahtarlama şekilleri



Şekil 20. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_3 gerilimi anahtarlama şekilleri



Şekil 21. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_4 gerilimi anahtarlama şekilleri



Şekil 22. 11 Seviyeli tam köprü eviricilerde V_5 gerilimi anahtarlama şekilleri

1.6. Optimizasyon

Bir sistemin tasarlanmasında var olan tüm çözümler içinden en iyisinin bulunmasına optimizasyon denir. İnsanlar her zaman en iyileme yani optimizasyon uygulamalarına yönelmiştir. Değişkenler içerisinde bulunan alternatifler arasından en iyisini seçmek için gerekli olan optimizasyon, çözümlerin modellemesinin yapılmasını sağlayarak gerçek hayat ile ilişkilendirilmesine imkan vermektedir.

Optimizasyon işleminde ilk olarak karar (tasarım) parametreleri belirlenmelidir. Sonra bu parametrelere bağlı olarak minimize edilecek bir maliyet fonksiyonu veya maksimize edilecek bir kâr fonksiyonu ve problemle ilgili sınırlama fonksiyonu tanımlanmalıdır.

Maliyet fonksiyonu, optimum parametre değerleri kullanılması durumunda daha da düşük değerler elde ederken kâr fonksiyonu ise daha yüksek değerler elde eder. Sınırlamalar ise parametrelerin alamayacağı değerleri belirler [21].

Bu fonksiyonlar ve sınırlamalar şu şekilde tanımlanabilir:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_a) \quad (1.57)$$

a değişkenli ' X ' vektörü tanımlı olsun. X_i parametre değerini göstermektedir. Maliyet fonksiyonu $f(x)$ ise,

$$f(x) = f(X_1, X_2, \dots, X_a) \quad (1.58)$$

şeklinde tanımlanır. ' k ' ve ' p ' tane eşitlik sınırlamalarına bağlı olarak,

$$\phi_j(x) = \phi_j(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0; \quad 1 \leq j \leq k \quad (1.59)$$

$$\psi_i(x) = \psi_i(X_1, X_2, \dots, X_n) \leq 0; \quad 1 \leq i \leq p \quad (1.60)$$

denklemleri yazılabilir.

Yani, problem birden fazla en küçük yapılacak fonksiyon içerebilir. Böyle problemlere çok amaçlı optimizasyon problemleri denir. Optimum çözüm en küçük yapılacak problemlerden en düşük maliyete, en büyük yapılacak problemlerde en yüksek kâr değerine sahip çözümdür.

Denklem (1.57)'de X tasarımının herhangi bir X_i bileşeni tasarım değişkenidir. Denklem (1.59) ve (1.60)'daki $\phi_j(x)$ ve $\psi_i(x)$ ise optimizasyon problemi kısıtlayıcılarıdır.

$\phi_j(x)$ ve $\psi_i(x)$ optimizasyon probleminin kısıtlayıcı sayıları k ve p toplamı sıfır ise problem kısıtlamasız optimizasyon, $p = 0$ ve $k > 1$ ise eşitlik kısıtlayıcı, $p \geq 1$ ve $k = 0$ ise eşitsizlik kısıtlayıcı problem olarak adlandırılır.

$f(x)$ maliyet fonksiyonu, $X' = (X'_1, X'_2, \dots, X'_a)$ çözümü için denklem (1.61)'de verilen şartı uygun bölge (S) içindeki tüm çözümler için sağlıyorsa $f(x)$ fonksiyonu X' 'de küresel minimuma sahiptir.

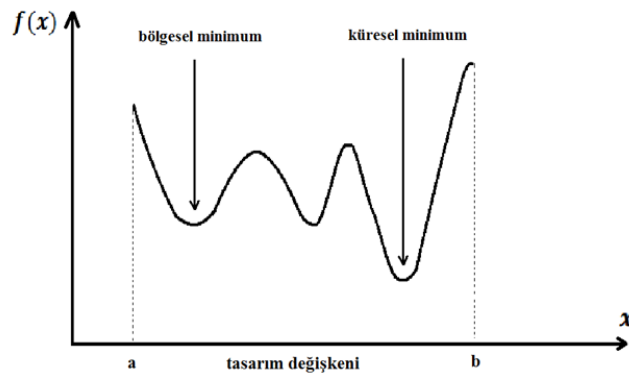
$$f(x') \leq f(x) \quad (1.61)$$

Eğer denklem (1.61)'e uygun bölge içinde X' 'in küçük bir komşuluğu (N) içindeki tüm çözümler için sağlanıyorsa $f(x)$ fonksiyonu X' 'de bölgesel minimuma sahiptir.

$$N = \{x \mid x \in S \text{ ve } \|x - x'\| < \delta\} \quad (1.62)$$

$\delta =$ çok küçük bir değer şeklinde tanımlanabilir [21].

Küresel minimum ve bölgesel minimum noktaları Şekil 23'te gösterilmektedir.



Şekil 23. Bir fonksiyonun küresel minimum noktaları [21]

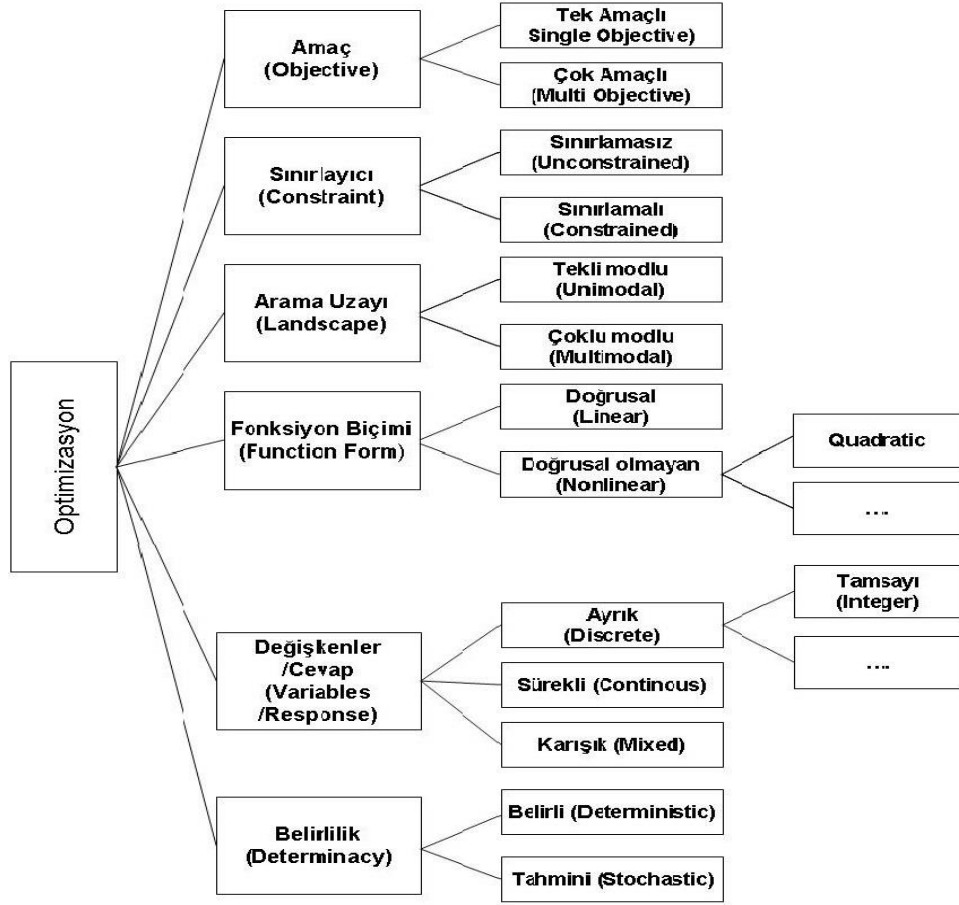
Optimum noktada sağlanması gereken şartlar, zorunlu şartlardır. Zorunlu şartları sağlamayan noktalar optimum olamaz. Fakat sadece zorunlu şartları sağlıyor olması da o noktanın optimum olduğunu kesin olarak kanıtlamaz. Bu yüzden zorunlu şartları sağlayan noktaların optimum veya optimum olmayan noktalar mı olduklarını belirlemek için yeter şartlar kullanılır. Zorunlu ve yeter şartlar aynı anda sağlanıyorsa bu noktalar optimum noktalardır.

1.6.1. Optimizasyon Problemlerinin Sınıflandırılması

$f(x)$ fonksiyonu, x ile ilgili herhangi bir kısıtlaması yoksa sınırlamasız optimizasyon, x ile ilgili bazı sınırlamalar varsa sınırlamalı optimizasyon olarak adlandırılır.

Tasarım değişkenlerinin değerleri de sınıflandırma için kullanılabilir. Ayrık niceliklerin optimal olarak düzenlenmesi ya da seçilmesi problemi ayrık optimizasyon problemi olarak isimlendirir. Burada tüm tasarım değişkenlerinin değerleri ayrıktır. Tasarım değişkenlerinin veya parametrelerinin aldığı değerler sürekli ya da ondalıklı değerler ise bu tür problemlere sürekli optimizasyon problemleri denir. Tasarım değişkenleri hem ayrık hem de sürekli olan problemlere ise karışık optimizasyon problemi denir.

Optimizasyon problemlerinin diğer bir sınıflandırması ise amaç fonksiyonları ve kısıtlamalarla ilgili fonksiyonların lineer olup olmamasına göre yapılabilir. $\phi_j(x)$ ve $\psi_i(x)$ optimizasyon problemlerinin sınırlayıcılarının her ikisi de doğrusal ise problem doğrusal programlama problemi, bu fonksiyonlardan herhangi biri doğrusal olmayan ise doğrusal olmayan programlama problemi olarak adlandırılır. Değişkenleri pozitif tam sayı değerler olan doğrusal problemlere tam sayı programlama problemi denir. Yine quadratic amaç fonksiyonuna ve doğrusal kısıtlama fonksiyonlarına sahip problemler ise quadratic programlama problemi olarak adlandırılır [20-22]. Şekil 24'da optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 24. Optimizasyon problemlerinin sınıflandırılması [22]

1.6.2. Optimizasyon Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Optimizasyon problemlerinin çözüm metotları genel olarak ikiye ayrılır. Doğrudan (direct) metotlar ve dolaylı (indirect) metotlar. Bir fonksiyonun minimum noktalarının sağlanması gereken şartları yerine getirerek çözüm bulmaya çalışan optimizasyon metotları dolaylı metotlar olarak adlandırılır.

Araştırma metotları tahmini bir başlangıç ile çözümü araştırmaya başlar. Fakat genelde ilk başlangıç sonuçları optimallik şartlarını sağlayamayacağından bu şartlar sağlanana kadar arama işlemi art arda (iterative) yeniden tekrarlanır. Optimum çözümler bulabilmek için çözüm uzayı araştırılır [21].

İteratif araştırma işlemi algoritması aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Başlangıç çözümü al (X_0) iterasyon sayacını sıfırla ($t=0$)

Adım 2: Çözüm uzayında bu seçilen nokta için bir yön belirle $d(t_1)$

Adım 3: Araştırma yakınsamasını kontrol et, yakınsadıysa sonlandır yoksa devam et.

Adım 4: Pozitif bir adım büyüklüğü $(e(t))$ bul.

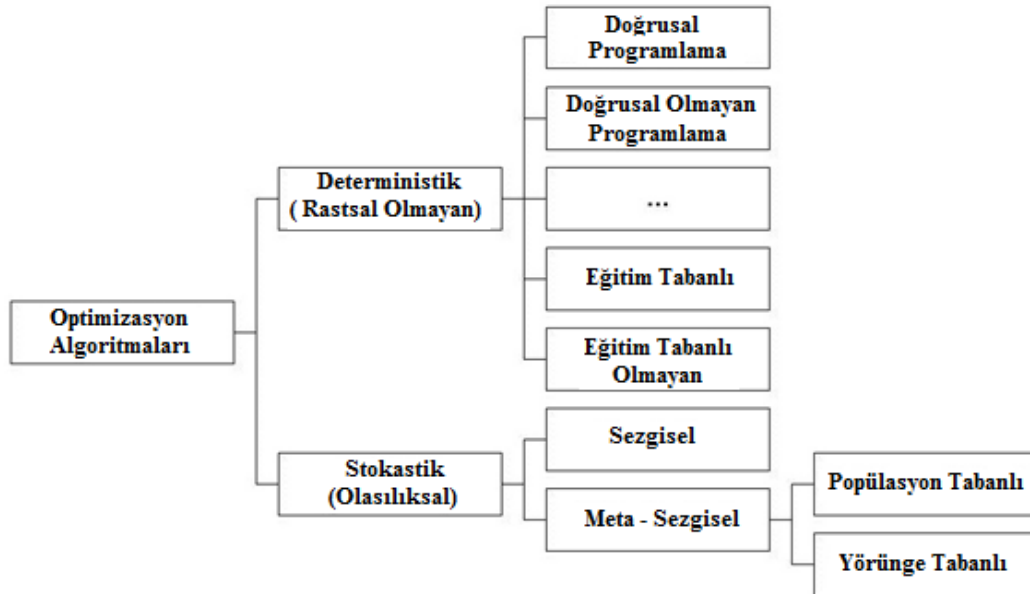
Adım 5: Yeni noktayı belirle.

$$X(t + 1) = X(t) + e(t)d(t) \quad (1.63)$$

Adım 6: İterasyon sayacını bir arttır ($t=t+1$) ve 2. adıma git.

Problem çözümünde belirli bir prosedürü takip eden algoritmalara deterministik (rastgele olmayan, belirli) algoritmalar denir. Yani algoritma ne zaman çalıştırılırsa çalıştırılsın aynı sonuçları sürekli üretebilen algoritmalarlardır. Bunun aksine içinde rastsallığı barındıran algoritmalara ise stokastik (olasılıksal) algoritmalar denir. Bu iki algoritmanın da beraber kullanıldığı algoritmalara ise hibrit yaklaşımlı algoritmalar denir.

Tez kapsamında kullanılan yöntemler stokastik algoritmalar başlığı altında olduğundan kısaca stokastik algoritmalarından bahsedilecektir. Şekil 27'de optimizasyon algoritmasının sınıflandırılması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 25. Optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması

1.6.3. Sezgisel Algoritmalar

Sezgisel algoritmalar, problem çözümlerinde çeşitli alternatif hareketleri en optimum sonuca ulaşmak için kullanan algoritmalarlardır. Bu algoritmalar optimum çözüme yakınsama özelliğine sahiptir fakat her zaman optimum çözümü garanti edemezler. Yalnızca kesin çözüm yakınındaki bir çözümü garanti edebilirler.

Sezgisel algoritmalar, öğrenme amaçlı ve kesin çözümü bulma işlemi için kullanılabilirliği gibi, anlaşılabilirlik açısından da daha kolay olduğundan daha yaygın olarak kullanılır. Sezgisel algoritmaların değerlendirilmesinde kullanılan kriterler aşağıdaki gibidir [21]:

- * Çözüm kalitesi ve Hesaplama Zamanı: Bir algoritmanın veri seti üzerinde hesaplama hızı ve doğruluk oranı algoritmanın değerlendirilmesinde önemli kriterlerdendir. İyi algoritmalar değiştirilebilir parametrelere sahip olmalı ve kullanıcının kendi problemine göre bu değerleri değiştirerek, özelleştirmesine aynı zamanda doğruluk oranını yükseltebilmesine imkân sağlamalıdır. Böylece doğruluk oranı ve hesaplama hızı arasındaki ilişki karşılaştırılabilir olabilmelidir.
- * Kod Basitliği ve Gerçeklenebilirlik: Kullanıcıların algoritmayı kolayca uygulayabilmesi için genel prensipleri belli olmalıdır. Problem yapısı ile ilgili çok fazla bilgi bilinmese bile kolayca yeni alan, özellik ve özniteliklere göre uyarlanabilir olmalıdır.
- * Esneklik: Algoritmalar tasarımda, hedef fonksiyonlarda ve sınır çizgilerinde yapılacak olan değişikliklerden etkilenmemelidir.
- * *Gürlük (Robustness): Belirlenmiş ilk ayarlarla dahi bir problem setine uygulandığında kabul edilebilir bir hız ve kalitede çalışabilmelidir.
- * *Basitlik ve Analiz Edilebilirlik: Algoritma her ne kadar karmaşık olsa da, kolayca irdelenebilir. Büyük notasyonlar ve diğer analizler kolayca yapılabilir olmalıdır.
- * *Etkileşimli Hesaplama ve Teknoloji Değişimleri: Kullanıcılar algoritmalar ve programlarla, ara yüzler aracılığı ile etkileşime girer. Ara yüzlerin iyi olması kullanıcılar için algoritmaları ve programları daha kullanışlı ve çekici yapar.

Sezgisel ve bölgesel araştırma algoritmalarının bazılarında olduğu gibi, iteratif olarak çalışan algoritmalar da genelde karşılaşılan durum başlangıç işlemlerine bağlı olarak bölgesel uygun değer çözümleri üretir. Bölgesel çözüm sonuçları küresel çözüm sonuçlarından çok farklı olabilir [21].

1.7. Parçacık Sürü Optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması kuş ve balık sürülerinin toplu hareketlerinden yola çıkarak doğrusal olmayan nümerik problemlere en uygun sonuçları bulmak için hazırlanmış popülasyon tabanlı evrimsel bir algoritmadır. Parçacık Sürü Optimizasyonu 1995-1996 yıllarında Russell Eberhart ve James Kennedy tarafından ortaya atılmış bir optimizasyon algoritmasıdır [23].

Günlük yaşantıda sosyal varlıklar karşılaştıkları problemlerin üstesinden ortak hareket ederek daha kolay gelebilmektedir. Bir topluluğa ait bireyler, karşılaşılabilecekleri problemlerin çözümünde en iyi bireyin ya da diğer bireylerin davranışlarından, daha önceki deneyimlerinden yararlanarak bir çözüm geliştirebilmektedir. Örneğin, kuş toplulukları yiyeceğin nerde ve ne kadar uzakta olduğunu öğrenmek için sürüdeki tüm kuşlarla beraber aynı zamanda ani hareketlerle yön değiştirerek farklı bölgelerde yiyecek arayışı yaptıktan sonra elde ettikleri verileri tekrar bir araya gelerek paylaşırlar. Bu şekilde sürüdeki diğer kuşlar da yiyeceğin ne kadar mesafede olduğunu, yiyeceğe en yakın olan kuşun pozisyonunu bilirler. Sürü bu bilgileri kullanarak yiyeceğe en yakın olan kuşu izleyerek yiyeceğe ulaşır [24].

Bahsedilen olayda; PSO'da her bir kuş parçacığı, kuş topluluğu sürüyü, her bir parçacığın pozisyon bilgisi de bir çözümü temsil eder. Parçacık hareket ettiğinde yiyeceğe ne kadar uzak olduğu yani koordinatları hesaplanırken, parçacığın pozisyon değiştirme miktarı ise parçacığın hızı olarak hesaplanır. Her bir parçacığın pozisyon değerlerinin uygunluk değeri, yani yiyeceğe olan uzaklığı hesaplanır. Bütün parçacıklar kendi en iyi pozisyon değerlerini ve sürüdeki diğer en iyi değerleri karşılaştırarak bir çözüme ulaşmaya çalışırlar. Çözüm bu en iyi koordinatların birleşiminden elde edilen hız ve yönün ne kadar değişeceğinden, komşuların ve kendi kişisel en iyilerin sürüdeki keşfedilen en iyi pozisyon değerine sahip parçacık ile karşılaştırılmasından elde edilir.

Her hangi bir matematiksel modeli çıkarılamayan sistemlerde uygun maliyetlerle problemlere sonuç alınabilmesi, uygulamasının kolay olması, hesaplama gücünün yüksek

olması, herhangi bir problem için yazılmış bir programın başka problemlerin çözümünde de kullanılabilir olması sebebiyle son yapılan çalışmalarda sezgisel yöntemler sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. PSO'nun önemli özelliği uygulama kolaylığıdır. Genetik Algoritma kullanılarak çözülebilen çoğu problemi içeren farklı optimizasyon problemlerinin çözümünde de PSO kullanılabilir. Genetik Algoritma ve PSO'nun çözüm kalitesi aynı olmasına karşın PSO'nun hesapsal olarak daha etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca PSO'da ayarlanması gereken parametre sayısının az ve uygulaması da daha kolaydır. PSO, hata fonksiyonundan türetilen eğim bilgisine ihtiyaç duymayan stokastik bir algoritmadır. Bu özellik, PSO'nun, eğim bilgisinin elde edilemediği ya da elde edilmesinin hesapsal olarak çok maliyetli olduğu problemlerde kullanılmasını sağlar [20]. Bir başka özelliği ise PSO'da parçacıklar hem kendi en iyi pozisyon değerlerini, hem sürüdeki diğer komşularının en iyi pozisyon değerini hatırlarlar. Çözüm sırasında en iyi pozisyona sahip parçacığın değerinden yararlanır ve arama uzayında herhangi bir değişiklik yapmaz. Arama uzayında herhangi bir değişikliğe ya da kısıtlamaya gitmemek PSO'nun yerel optimumlara takılmasını engeller [25].

1.7.1. PSO Algoritması

Tüm optimizasyon problemlerinin temel amacı istenen $f(x)$ fonksiyonunu maksimum ya da minimum yapmaktır. x vektörü n boyutlu karar vektörü ya da reel sayılardan oluşan bir karar değeridir.

Algoritmanın ana fikri kuş ve hayvan sürülerinin 'bilgi paylaşma' yaklaşımını kullanarak yiyecek kaynağı bulmaları, avcılardan kaçabilmeleri yeteneklerine dayanır. Bu fikir birçok alandaki problemlere çözüm aramak için de kullanılmıştır. Temelde, popülasyondaki parçacıklar rastgele dağılmış bilgiler edinmiş ve bu bilgiler paylaşılıp, sonuç için en iyi çözüm aranmıştır. Bu davranış devam eden süreçte belirli bir alanda bir sonuca ulaşıncaya kadar devam etmektedir.

PSO algoritmasında bahsedilen sürü (S), sürünün içerisindeki her bir bireye (parçacık) (x_i) denmektedir. ' k ' sürü içerisindeki birey sayısını göstermektedir. Problem için örnek uzay ' E ' olsun ve ' E ' tanım kümesinin her problem için uygun uzaydan alındığı varsayıldığında, sürü ve parçacıkları ise şu şekilde göstermek mümkündür:

$$S = \{x_1, x_2, \dots, x_k\} \quad (1.64)$$

Farklı sürülerdeki bireyler farklı olabildiği gibi, bireyler de birden fazla parametreye bağlı olabilir. Bu durumda parametre sayısı (boyut) şu şekilde tanımlanır.

$$x_1 = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}\} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1.65)$$

PSO'da parçacıklar rast gele pozisyon ve hız değerleri olarak arama işlemine başlar. Her iterasyonda parçacıkların uygunluk fonksiyonları hesaplanıp, en iyi uygunluk değerine sahip parçacık belirlenir. Ayrıca her parçacık elde ettiği tüm en iyi değerini sürekli hafızasında tutar. Sürüdeki en iyi uygunluk değeri ve her parçacığın kendi en iyi değeri karşılaştırılarak bütün parçacıkların hız ve pozisyon değerleri güncellenir. İstenilen iterasyon adımı sağlanana kadar döngü devam ederken tüm parçacıklar çözüm uzayında en iyi çözümü bulmaya çalışırlar. Bu durumda parçacıkların her bir adım için bir en iyi pozisyon (p_{best}) değeri bulunur.

i. parçacığın yer değişim vektörü yani hız vektörü:

$$v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}\} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1.66)$$

kişisel en iyi pozisyon (p_{best}) denklemi ise şu şekilde tanımlanabilir:

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$$

$$v_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik}\} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1.67)$$

f sembolü minimize edilen amaç fonksiyonunu göstermek üzere kişisel en iyi pozisyon için güncelleme denklemi t zaman aralığına bağlı olarak (1.68)'de gösterilmiştir [20].

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t), & f(y_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ y_i(t+1), & f(y_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (1.68)$$

PSO' nun global ve lokal olarak iki çeşidi bulunmaktadır. İki algoritma arasındaki fark verilen bir parçacığın direkt olarak etkileşim içinde olduğu parçacıkların kümesine bağlıdır [24]. Global modelde sürünün en iyi parçacığı diğer bir deyişle sürüde en iyi uygunluğa sahip parçacık (global en iyi) ' g_{best} ' olarak adlandırılır.

$$g_{best} \in \{y_0(t), y_1(t), \dots, y_s(t) \mid f((g_{best})) \quad (1.69)$$

$$= \min\{f(y_0(t)), f(y_1(t)), \dots, f(y_s(t))\}$$

$$v_{ij}(t+1) = \underbrace{v_{ij}(t)}_{\text{Atalet}} + \underbrace{c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)]}_{\text{Kişisel Hafıza}} + \underbrace{c_2 r_{2j}(t)[\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)]}_{\text{Sosyal Hafıza}} \quad (1.70)$$

Denklem (1.70)'de 'Atalet' olarak belirtilen $v_{ij}(t)$ ifadesi hız değerinin atalet ağırlığını göstermektedir. Bu parametre parçacıkların hızlarında ani bir değişim olmamasını, parçacıkların hız güncellemesi yaparken bir önceki hızlarına bağlı kalarak çözüm uzayında parçacıkların ani hız değişimlerini engellemektedir. 'Kişisel Hafıza' olarak belirtilen $c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)]$ ile parçacıkların c_1 ve $r_{1j}(t)$ ile ölçeklendirilerek parçacıkların yeni hızlarının belirlenmesinde geçmişteki en iyi konuma (y_i) yakınsaması sağlanmaktadır. 'Sosyal Hafıza' olarak belirtilen $c_2 r_{2j}(t)[\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)]$ kısmı ile ise bir önceki gibi parçacıkların c_2 ve $r_{2j}(t)$ ile ölçeklendirilerek parçacıkların sürünün en iyisine (g_{best}) yakınsaması sağlanmaktadır. Görüldüğü gibi parçacığın mevcut konumundan bir sonraki konumuna geçmesini sağlayan hızın bulunmasında parçacığın en iyi değeri ve popülasyonun en iyisinden faydalanılmaktadır.

Bu denklemde (1.70)'de r_1 ve r_2 [0,1] aralığında rassal değerler alan ve PSO'nun rassallığını sağlayan parametrelerdir. c_1 ve c_2 katsayıları öğrenme faktörleridir. c_1 kişisel en iyi pozisyonun yönünde adım büyüklüğünü, c_2 global en iyi parçacığın yönünde maksimum adım büyüklüğünü ayarlar. Ayrıca hızlandırma katsayıları olarak da adlandırılırlar. Bu katsayılar bir iterasyonda bir parçacığın alabileceği adımın maksimum boyutuna etki eder. Değerlerin küçük seçilmesi, parçacıkların hedef bölgeye doğru çekilmeden önce bu bölgeden uzak yerlerde dolaşmalarını sağlarken hedefe ulaşma sürelerini uzatabilir. Değerlerin büyük seçilmesi ise hedefe ulaşma süresini kısaltsa da beklenmedik hareketlere ya da hedef bölgeye ulaşamamasına sebep olabilir. Bu yüzden c_1

ve c_2 değerleri $0 < c_1, c_2 < 2$ sabit değerleri ile sınırlandırılır. Ancak c_1 'in biraz daha büyük ve $c_1 + c_2 = 4$ durumunu sağlaması halinde iyi sonuçlar alınabildiği gözlemlenmiştir [20].

Parçacıkların hızlarının büyüklükleri kontrolsüz şekilde arttığı takdirde sürü içerisinde kopmalar olur. Bu durum PSO'nun zor problemlere vereceği çözümü olumsuz etkiler. Parçacığın arama uzayından ayrılma olasılığını azaltmak için v_i değerleri $[-v_{max}, v_{max}]$ değerleri arasına sıkıştırılmıştır.

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (1.71)$$

t : iterasyon sayısı

i : 1, 2, ..., k ;

Denklem (1.71) sonucunda t. iterasyonda, i. parçacığın, (t+1). iterasyondaki hız vektörü bulunmuş olur. Yani her parçacığın pozisyonu, bu parçacık için yeni hız vektörü kullanarak güncellenmiş olur.

Global model hızlı bir yakınsama sunmaktadır. Yalnız bu modelde sadece tek bir en iyi çözüm 'global en iyi parçacık' vardır. Diğer bütün parçacıklar er geç bu pozisyona doğru hareket edeceklerdir ve eğer düzenli olarak güncellenmezse problem erken yakınsayabilir [20].

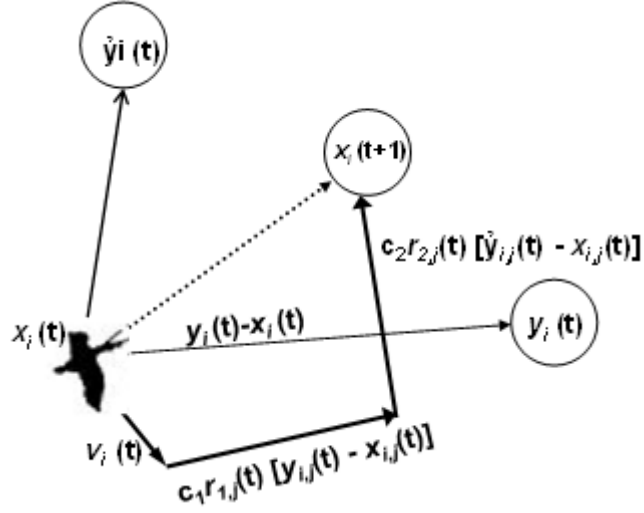
Lokal modelde ise erken yakınsama problemi önlenmeye çalışılmıştır. Her parçacık için lokal 'kişisel' en iyi parçacık, \hat{y}_i 'nin seçildiği parçacıkların alt kümesi tanımlanır. \hat{y}_i lokal en iyi pozisyon ya da en iyi komşuluk olarak adlandırılır. l büyüklüğünde bir komşuluk için, parçacık indisinin s olduğunu varsayarsak, güncelleme denklemi aşağıdaki gibi olur [20]:

$$N_i = \{y_{i-l}(t), y_{i-l+1}(t), \dots, y_{i-1}(t), y_i(t), y_{i+1}(t), \dots, y_{i-1}(t), y_{i+l}(t)\} \quad (1.72)$$

$$\hat{y}_i(t + 1) \in N_i \mid f(\hat{y}_i(t + 1)) = \min\{f(a)\}, \quad \forall a \in N_i \quad (1.73)$$

Bu denklemler yardımıyla hız güncelleme denklemi yazılırsa:

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \quad (1.74)$$



Şekil 26. Parçacığın yer değiştirmesi

Şekil 28'de bir parçacığın yer değiştirmesi sırasındaki izlediği yol gösterilmiştir. Parçacığın $x_i(t)$ anındaki konumu belirlendikten sonra bir sonraki konumunu ($x_i(t+1)$) bulabilmek için hız, kişisel ve sosyal hafıza bilgilerinden faydalanılır. Sürüdeki en iyi konuma sahip parçacığın konumu ($\hat{y}_i(t)$), başta belirlenen $x(t)$ konumları arasından seçilir. Global model hızlı bir sonuç almak için, lokal modelde araştırmayı derinletmek için kullanılabilir.

$x(t)$: Sürüdeki tüm parçacıkların konumları toplamı

$x_i(t)$: i. parçacığın t. iterasyondaki konumu,

$v_i(t)$: i. parçacığın t. iterasyondaki hızı,

$y_i(t)$: i. parçacığın kişisel en iyi konumu,

$\hat{y}_i(t)$: Sürüdeki en iyi konuma sahip parçacığın konumu,

$x_i(t+1)$: i. Parçacığın (t+1). iterasyondaki konumu,

$v_i(t+1)$: i. Parçacığın (t+1). iterasyondaki hızı'dır.

1.7.2. Yöntemin Uygulanışı

1.7.2.1. Başlangıç Değerleri

Sürü içerisinde toplam p tane parçacık olduğu kabul edilsin. Bu p tane parçacığın başlangıç, konum ve hız değerleri kısıtlara uygun şekilde üretilir. Bu üretilen başlangıç değerleri ile p_{best} 'leri oluşturacaktır.

1.7.2.2. Konum (x)

Sürü içerisindeki parçacıkların konumu başlangıçta rastgele belirlenir. Fakat bu başlangıç değerleri oluşturulurken sapmayı azaltmak için bazı kısıtlamalar getirilmiştir. Bu kısıtlamalar aşağıdaki gibidir [27]:

Eğer $x_i > x_{max}$ ise $x_i = x_{max}$ ve $V_i = 0$;

Eğer $x_i < x_{min}$ ise $x_i = x_{min}$ ve $V_i = 0$;

Eğer $x_i > x_{max}$ veya $x_i < x_{min}$ ise $V_i = -V_i$

Eğer $x_i > x_{max}$ veya $x_i < x_{min}$ ise x_i 'nin uygunluk değerini en kötü uygunluk değeri yap.

x_{max} : Arama uzayının üst sınırı

x_{min} : Arama uzayının alt sınırı

1.7.2.3. Hız (v)

Sürü içerisindeki parçacıkların t anındaki hızı bir sonraki iterasyondaki yeni hızın belirlenmesinde etkilidir.

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1) \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (1.75)$$

Hız değeri pozitif ve negatif değerleri alabilmektedir. Bu sayede çok yönlü hareketlilik sağlanabilmektedir. Parçacıkların hızlarının büyüklüklerinin kontrolsüz

biçimde artıp çözüm uzayının dışına çıkmasını önlemek için hız değerlerinin kontrolünde bazı kısıtlamalar getirilmiştir. v_{max} gibi kısıtlayıcı bir limit konulmuştur. Bazı uygulamalarda $v_{max} = x_{max}$ olarak kullanılmıştır [28]. Bazı uygulamalarda ise v_{max} değeri parçacığın konum vektörünün alabileceği maksimum ve minimum değerlerinin farkının %10-20'si aralığında bir değer almıştır [27].

Hız değeri için getirilen sınırlar ise şu şekilde belirlenmiştir:

$$v_{ij}(t + 1) = \begin{cases} v_i > v_{max} & \text{ise } v_i = v_{max} \\ v_i < v_{min} & \text{ise } v_i = v_{min} \end{cases} \quad (1.76)$$

1.7.2.4. Atalet (W)

Atalet ağırlığı hız değişkenine etki eden bir parametredir. Atalet ağırlığının büyük değerler alması daha genel (global) aramalar yapmasına, küçük değerler alması ise daha bölgesel aramalar yapılmasına sebep olur.

Bu parametre hız değerlerinde ani değişme olmamasını ve güncelleme yapılırken bir önceki iterasyondaki hız değerine bağlı kalarak hesap yapılmasını sağlar. Genel olarak uygulamalarda atalet ağırlığının (W) en büyük değeri $W_{up} = 0.9$, en küçük değeri ise $W_{low} = 0.4$ olarak alınır.

$$W_i = W_{up} - (W_{up} - W_{low}) \times p \quad p = \text{iterasyon sayısı} \quad (1.77)$$

1.7.2.5. Sabit (c)

Çok karmaşık problemlerde doğru sonucu bulabilmek için bir sabit katsayıya ihtiyaç duyulmuştur. Bu sabit sapma sayısını azaltır.

$$v_{ij}(t + 1) = c \left[v_{ij}(t) + c_1 r_1 (y_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_2 (\hat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)) \right] \quad (1.78)$$

$$x_{ij}(t + 1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1.79)$$

Kappa sabiti belirlenirken c_1 ve c_2 , 2 'den büyük sayılar olarak alınmalıdır.

$$c = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} ; \quad \varphi = c_1 + c_2 \quad (1.80)$$

1.7.2.6. Uygunluk Fonksiyonu

Uygunluk fonksiyonu parçacığın pozisyon vektörünü kullanarak kısıtlamaları da göz önünde bulundurarak, uygunluk değeri üreten bir fonksiyondur. Bu fonksiyon çözüm kalitesini de belirler. p_{best} ve g_{best} değerleri de en iyi olan parçacıklardan seçilir.

PSO algoritması biçimsel olarak aşağıdaki gibidir:

```

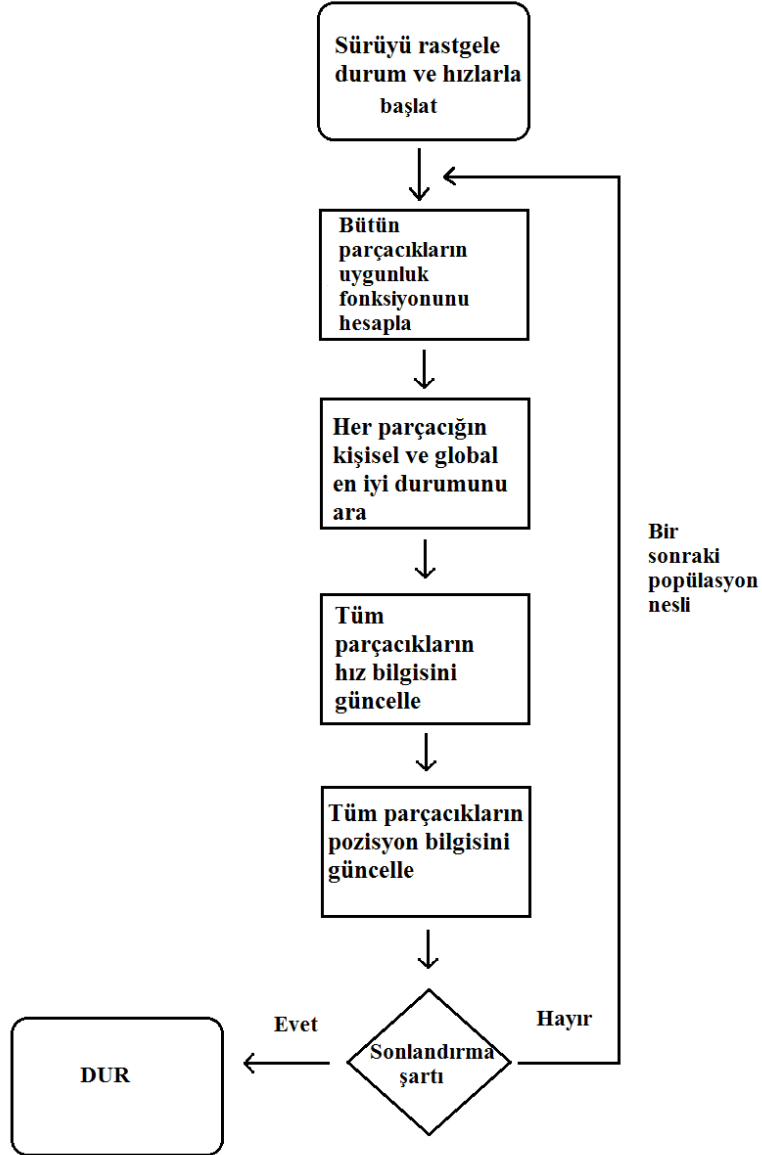
BEGIN
   $x_{ij}$  ve  $v_{ij}$ 'ye gelişi güzel değerler vererek başlangıç parametrelerini ayarla.
Do
  For i=1 to Parçacık Sayısı
    if  $f(x_i) < f(y_i)$  then  $y_i = x_i$  // P best güncellemesi her parçacık için kişisel en
    iyiyi hesapla
     $y_i = \min(x_{komşular})$  // tüm parçacıkların bulunduğu  $p_{best}$  değerlerinin en
    iyisini, tüm parçacıkların  $g_{best}$ 'i olarak ata
  End
  For j=1 to her parçacık için
     $v_{i,j}(t+1) = v_{i,j}(t) + c_1 r_{1,j}(t) [y_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)] + c_2 r_{2,j}(t) [\dot{y}_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)]$  // parçacık
    hızını güncelle
     $x_{i,j} = x_{i,j} + v_{i,j}$  //parçacık konumunu güncelle
  Next j
Next i
END (Sonlandırma)

```

Algoritmanın çalışması özet olarak şöyledir: Başlangıçta bir parçacık belirlenen kriterlere göre sürü içindeki en iyi parçacık olarak tanımlanır. Sonra diğer tüm parçacıklar

bu parçacık yönünde ve kendi en iyi çözümleri yönünde hızlanır. En iyi parçacığın yönünde ilerlerken parçacıkların yolda daha iyi parçacıklar keşfetme olasılıkları da vardır. Bulunan en iyi çözümler değerlendirilerek, seçilen en iyi problemin çözümünde kullanılacaktır.

PSO'nun temel adımlarını gösteren akış diyagramı Şekil 27'de gösterilmiştir.



Şekil 27. PSO akış diyagramı

1.8. Genetik Algoritmalar

Hızlı çalışan mantıklı algoritmaların oluşturulamadığı birçok farklı problem vardır. Üzerinde çokça çalışılan optimizasyon problemlerinin büyük bir kısmını bu problemler oluşturmaktadır.

Zor optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan algoritmalar genellikle ideale yakın sonuçlar verse de bazı zor optimizasyon problemlerinin çözümünde ideal değeri garanti edemeyen, olasılığa dayalı algoritmalar kullanılmaktadır. Küçük çözüm uzayları için klasik ayrıntılı metotlar yeterli olabilir. Ancak büyük çözüm uzayları için yapay zekâ teknikler kullanılmalıdır [29]. Genetik Algoritmalar (GA)'da bu tekniklerden biridir.

Genetik algoritmalar insanın karar alma yeteneğinin bilgisayarlar kullanılarak benzetilmesine dayanan bir tür yapay zekâ tekniğidir. Zor problemleri, bir aday çözüm kümesinin tekrarlanan bir süreç kullanılarak evrilmesi yoluyla, çözüm uzayındaki daha iyi çözümlere ulaşmaya çalışarak çözmeye çalışırlar.

Genetik algoritma, doğal biyolojik evrimi taklit eder. Doğaya daha iyi uyum sağlayan bireylerin türlerini devam ettirebilmesi ve üstün özellikli anne ve babalardan yine üstün özellikli nesiller yetiştirip bir önceki nesilden daha yetenekli nesiller elde edilebilmesi, karmaşık problemlerin çözümlerinde var olan çözümlerin çaprazlanması ile daha iyi çözümler üretilebileceği fikrini doğurmuştur. Bu fikir sayesinde genetik algoritmalar geliştirilmiştir.

Genetik algoritmalar ilk olarak 1958'de Bremermann tarafından önerilmiştir [30]. Daha sonra John Holland tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilmiştir [31]. Holland'ın geliştirdiği bu algoritmalar doğal seçim ve genetik mekaniğine dayalı arama algoritmalarıdır. Canlılarda oluşan genetik işlemleri bilgisayar ortamında gerçekleştirmeyi düşünmüştür. Geliştirilen bu algoritmalar lineer olmayan, çok değişkenli, çok amaçlı optimizasyon problemlerinin çözümünde oldukça başarılı olmuştur.

Günümüzde genetik algoritmalar birçok değişik problemlerin çözümünde farklı biçimler almıştır. Araştırmalar kendi çözümleri için farklı tiplerdeki kodlama, çaprazlama ve mutasyon operatörleri ve seçim için farklı yöntemler geliştirmektedir. Genetik algoritmaların farklı birçok biçimi olsa da temel yapısı itibarıyla diğer arama ve optimizasyon teknikleriyle arasında bazı farklılıklar vardır [32-33].

Bunların yanı sıra genetik algoritmalar kullanılırken bazı zorluklarla da karşılaşılabilir. Bu zorluklar şöyledir [34]:

- * Uygun olmayan çözüme (premature) yakınsayabilir.
- * İşlem zamanı uzun sürer.
- * Parametre ayarları çok fazla sayısal deney gerektirir.

1.8.1. Genetik Algoritmaların Çalıştırılması

Genetik algoritma, stokastik arama tekniklerini kullanarak parametrelerin kodlandırılmasına dayalı bir algoritmadır. Problemlerin çözümüne göre uygun parametreler kullanılarak gerçeğe yakın sonuçlar bulunabilmektedir. Bu yüzden parametrelerin seçimi çok önemlidir.

Genetik algoritmalarda kullanılan parametreler şöyledir:

- 1) Kodlama yönteminin belirlenmesi (Parametre kodlama operatörü)
- 2) İlk nesil (Başlangıç popülasyonu parametresi)
- 3) İlk nesilde oluşturulan her bireyin performansının amaç fonksiyonuna göre hesaplanması (Üreme/seçim operatörü)
- 4) Yeni üretilecek nesillerdeki bireylerin seçilip, seçilen bireylere genetik işlemler uygulayarak yeni neslin elde edilmesi (Çaprazlama operatörü)
- 5) Yeni seçilen bireylerin performansının uygunluk fonksiyonuna göre hesaplanması (Mutasyon operatörü)
- 6) Bitiş (istenilen) koşul sağlanmışsa en iyi bireyin sonuç olarak dönülmesi (Sonlandırma operatörü)

1.8.1.1. Parametre Kodlama Operatörü

Genetik algoritmaların temel özelliği çözüm ve kod uzayında çalışmasıdır. Herhangi bir problemin genetik algoritmalarla çözülebilmesi için ilk başta aday çözümlerin kodlanması gereklidir.

Genetik algoritmalarda karar değişkenlerinin n boyutlu E vektörü, bir birey olarak n uzunlukta ki a dizisi olarak aşağıdaki gibi temsil edilir [31].

$E: a = a_1, a_2 \dots a_j \dots a_n$; a dizisi n tane gen içeren bir kromozomdur.

Kodlanan bu aday çözümler sınırlı bir değer kümesinden değer alabilen gen dizilerini oluşturur. Bu diziler de kromozomları oluşturmaktadır. Bu durumda kromozomlar problemin aday bir çözümünü gösterirken, kromozomları oluşturan genler de aday çözümlerin özelliklerini göstermektedir.

Genetik algoritmalarda her problem için uygun tek bir gösterim şekli yoktur. Gerçek sayılar, tam sayılar, harfler, semboller, şifrelemek için kullanılabilirdiği halde genellikle Holland tarafından ilk olarak kullanılan, çözümün her bir elemanının 1 veya 0 değerlerini alabildiği ikil değerlerin kullanıldığı sabit uzunluklu diziler halinde kodlanır. Bunun yanı sıra gösterim ve çözümlerin kodlanması için diziler, ağaç yapıları listeler veya herhangi bir nesne de kullanılabilir.

Problemlerin çözümünde şifreleme işlemi anahtar niteliğinde bir konudur. Başarılı problem çözümleri için en kısa şifreleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Genetik algoritmalarda şifreleme işlemi yapılırken üç hususa dikkat edilmelidir. Bunlar [31]:

1. Kromozom uygunluğu kontrol edilmelidir.
2. Kromozomun belirlenen kısıtlamaları sağlaması gerekir. Bu şartı düzgün sağlayamayan kromozomlar araştırma uzayındaki değerleri doğru şifreleyemez.
3. Kodlama haritasında kromozomun tek olup olmadığı kontrol edilmelidir.

Genetik algoritmalarda çeşitli kodlama yöntemleri vardır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir.

- * Karışık kodlama
- * Liste önceliğine dayalı kodlama
- * Operasyona dayalı kodlama
- * Öncelik kuralına dayalı kodlama
- * Rassal anahtarlı kodlama
- * İşe dayalı kodlama
- * Tamamlama zamanına dayalı kodlama

1.8.1.2. Başlangıç Popülasyon Parametresi

Bu aşamada ilk başta kodlanan bireylerden oluşan bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Bu popülasyonu oluşturan bireyler (kromozomlar) rastgele veya çözülecek probleme ait bilgiler kullanılarak kodlanır. Popülasyondaki birey sayısı genellikle sabit tutulur. Popülasyonun boyutları genetik algoritmanın verimliliğini ve çalışma performansını doğrudan etkiler.

Popülasyonun büyüklüğünün belirlenmesinde net bir kural yoktur. Fakat başlangıç popülasyonunun olası çözümlerin hemen hemen tamamını kapsayacak şekilde farklı çözümleri içinde bulunduracak kadar geniş olmalıdır. Diğer yandan büyük popülasyonlar her nesil için daha fazla değerlendirme yapmayı gerektirir. Böyle bir durumda genetik algortmada sonuca ulaşmak fazla vakit alabilir. Bu yüzden popülasyon sayısının fazla artırılmasının yararı yoktur.

Genetik algoritmaların esas amacı karmaşık optimizasyon problemlerini en iyi, en kısa sürede ve en doğru şekilde çözüme ulaştırmaktır. Bunun için var olan çözümler bir uygunluk (amaç) fonksiyonu kullanılarak ölçümler yapılır ve en iyi çözüme ulaşmaya çalışılır[35].

1.8.1.3. Üreme Seçim Operatörü

Bu süreç popülasyon içinden belli bir seçim kriteri ile uygunluk değerlerine göre kromozomların seçilmesidir. Seçim aşamasında genetik algoritmalar çözüm uzayında en iyi çözümü bulabilmek için genetik işlemlere başlar.

Genetik işlemlerin ilk basamağı seçim (üreme) operatörüdür. Bu operatör bir sonraki nesil oluşturulurken kullanılacak olan bireyleri seçer. Seçilen bireyler yeni neslin ataları olacaktır. Üreme işlemine yapay seçme işlemi de denilebilir.

Seçme işleminin hedefi, seçim yapılırken çözüme daha yakın bireylerin yüksek olasılıkla seçilmesidir. Fakat sadece en iyi bireyler seçilirse popülasyon kısa sürede bu bireye yakınsar. Bu yüzden sadece en iyileri seçmek yerine arada en iyi olmayan fakat genetik açıdan faydalı olabilecek bireyler de seçilmelidir.

Birkaç tane seçim yöntemi vardır. Bunlar:

- 1) Rassal Seçim: Popülasyondaki kromozomların rastgele seçildiği seçim yöntemidir.

2) Rulet Tekerleği (Rulet-Wheel) Seçimi: Seğilecek olan kromozomlar uygunluklarına göre seğilirler. Yani performansı daha iyi kromozomların seçilme şansı daha yüksek olur. Ancak küçük popülasyonlarda oransal olarak daha kötü performanstaki bireylerin seçilme olasılığı da yüksektir.

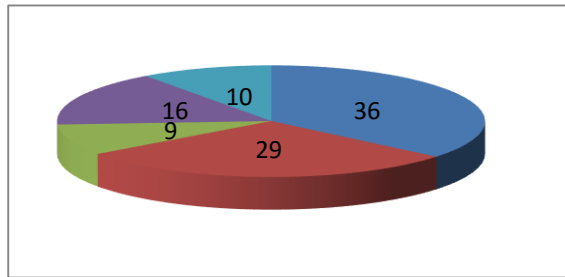
Rulet tekerleği tüm kromozomların üzerine yerleştirildiği bir yer olarak düşünülürse, performansı iyi olan kromozomlar bu tekerlek üzerinde daha geniş bir kısma sahip olur. Rastgele yapılan bir seğimde de pay sahibi fazla olan kromozomun seçilme olasılığı daha yüksektir. Bu sreğ bir algoritma ile anlatılmak istenirse;

a) Popülasyondaki tüm kromozomların uygunluğunun toplamı hesaplanır. (A)

b) (0, A) aralığında rastgele bir sayı üretilir. (p)

c) Nesil üzerinde gidip 0'dan itibaren uygunlukların toplamı alınır. (a)

$a > p$ ise seçim durur ve bulduğu kromozomu alır ve bu kromozomu bir sonraki zamandaki nesil için seçer. şekil 30'da rulet seçim yöntemi grafiksel olarak verilmiştir.



şekil 28. Rulet seçim yöntemi

3) Sıralama Seçimi: Bir nceki rulet seçimi düzeneğinde uygunluk değerleri arasında büyük farklılıklar olursa sorun oluşabilmektedir. Örneğin en iyi kromozomun uygunluğu %90 ise diğer kromozomların seçilme şansı çok az olacaktır. Bu durumda sıralı seçim poplasyondaki tüm kromozomların uygunluk değerlerini, beklenen değerlerine göre en iyiden en kötüye olacak şekilde sıralar. Uygunlukları ölçeklendirmeye gerek duymaz. Uygunluk sıraya göre belirlendiğinde tüm kromozomların seçilme şansı olur.

4) Sabit Durum Seçimi: Özellikle seçilen bir kromozom yoktur. Var olan kromozomların büyük kısmının yeni nesillere aktarılması istenir. Bu yöntemde yüksek uygunluk değerine sahip bireylerin yavruları seçilip, düşük uygunluktaki bireylerin yavruları yerine konulur.

5) Turnuva Seçimi: Rulet-tekerlek yöntemindeki sorunları giderebilmek için alternatif bir yöntem olarak kullanılabilen bir yöntemdir. Mevcut popülasyonda seçim yapılarak orta nesil yaratılır. Bu orta nesilde seçilen adaylardan performansı en iyi olan seçilir. Böylece en kötü bireyin bir sonraki nesillere aktarılması önlenmiş olur.

Bu yöntemde A adet kromozom olduğu düşünölsün. Rast gele bir p sayısı belirlenir ($p < A$). Popölasyondan rastgele k adet kromozom seçilecekse, seçilen p sayısı kadar kromozomdan en iyi olan seçilip bir havuza alınır. Sonra kalan kromozomlardan tekrar p tane seçilir ve bunların içinden de en iyi olan seçilip aynı havuza yollanır. Bu şekilde havuzda k tane kromozom birikene kadar işlem devam eder ve eşleşme havuzuna alınan kromozomlar eşleştirilir.

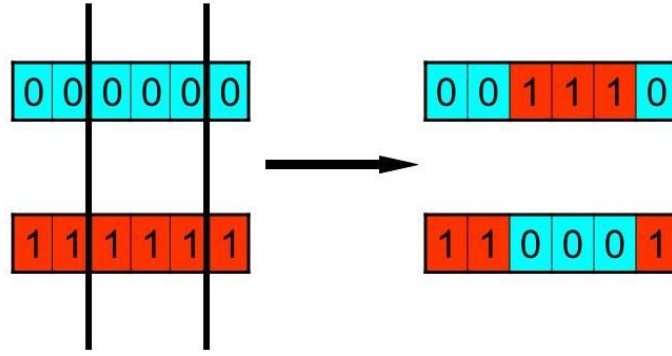
6) Seçkinlik (Elitizm): Çaprazlama ve mutasyon işlemleri sırasında en iyi bireyin kaybolma riski vardır. En uygun birey seçilmezse bu bireyin ölmesi anlamına gelir. Bu durumda bir sonraki nesillere en iyi kromozomlar aktarılamaz. Bu durumda en iyi çözüme ulaşmak için geçen süre artacaktır. Seçkinlik; en iyi kromozomların (ya da bir kısmının) çaprazlama ve mutasyon sonrası oluşan yeni kuşağa kopyalanıp, yeni nesillere aktarılmasıdır. Seçkinlik genetik algoritmaların başarımını artırır ve en iyi çözümün kaybolmasını önler.

Yukarda verilen seçim yöntemlerinden başka yöntemlerde vardır. Bunlardan hangisinin verimli olduğu çözülecek olan probleme göre değişiklik gösterir.

1.8.1.4. Çaprazlama Operatörü

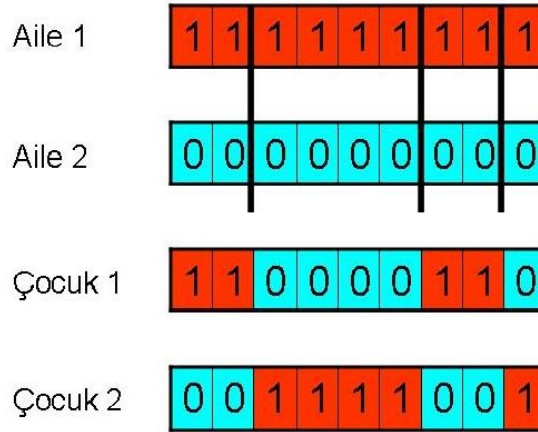
Çaprazlama iki bireyden yeni bir nesil oluşturma sürecidir. Asıl amaç, seçim operatöründe seçilen en iyi performansa sahip bireylerin çaprazlama işlemi ile birleştirilip, popölasyondaki farklı bireylerdeki parçaların kombine edilip yeni nesiller oluşturmaktır. Bu operatörde oluşan bireyler yeni olup arama uzayının araştırılmaya başladığını gösterir. Çaprazlama işlemi ile popölasyon en iyiye yakınsamaya başlar. Burada iki çözüm noktasının sayısal değerlerinin bazı haneleri aralarında çaprazlama yaparak çözüm için yeni noktalar oluşturulur. Çaprazlama işlemi uygulanacak bireyler rastgele veya bazı yöntemlerle seçildikten sonra, çaprazlama işlemi başlatılıp değiştirilecek genler de rastgele seçilir.

Çaprazlama işlemi birçok şekilde yapılabilir. Bunlardan çift noktadan çaprazlama yöntemi Şekil 29'da gösterilmiştir.



Şekil 29. Çift noktalı çaprazlama yöntemi

Şekil 29'da görüldüğü gibi iki ebeveyn seçildikten sonra rastgele bir kesme noktası alınıp bu noktadan önceki bilgiler ilk atadan, sonraki bilgiler de ikinci atadan alınarak yeni yavrular oluşturulmaktadır. Şekil 32'de de üç noktalı bir çaprazlama örneği gösterilmektedir.



Şekil 30. Üç noktalı çaprazlama yöntemi

Çaprazlama yöntemleri de problemin farklılıklarına göre çeşitlilik göstermektedir. Örnek çaprazlama yöntemleri aşağıda verilmiştir.

- * Tek Kesimli Çaprazlama
- * Çift Kesimli Çaprazlama
- * Çok Kesimli Çaprazlama
- * Üniform Çaprazlama

- * Tersleme
- * Karşılaştırmalı Çaprazlama
- * Ara Birleşmeli Çaprazlama

Çaprazlama işlemi sonucunda her iki atanın da kısmi özelliklerine sahip yeni bir birey elde edilmiş olur.

1.8.1.5. Mutasyon Operatörü

Üreme ve çaprazlama işlemleri başarılı şekilde tamamlansa da küçük bir olasılıkla bazı değerli genetik özelliklerin kaybolma riski vardır. Mutasyonla bu özelliklerin geri kazandırılması sağlanır.

Mutasyon işleminde seçilen bir bireyin genetik bilgisi rastgele değiştirilir. İkili kodlama sistemi ile kodlanmış bir bireyin '0' olan genini '1' ile ya da tam tersi '1' olan genin '0' ile değiştirilmesi buna örnek olarak verilebilir.

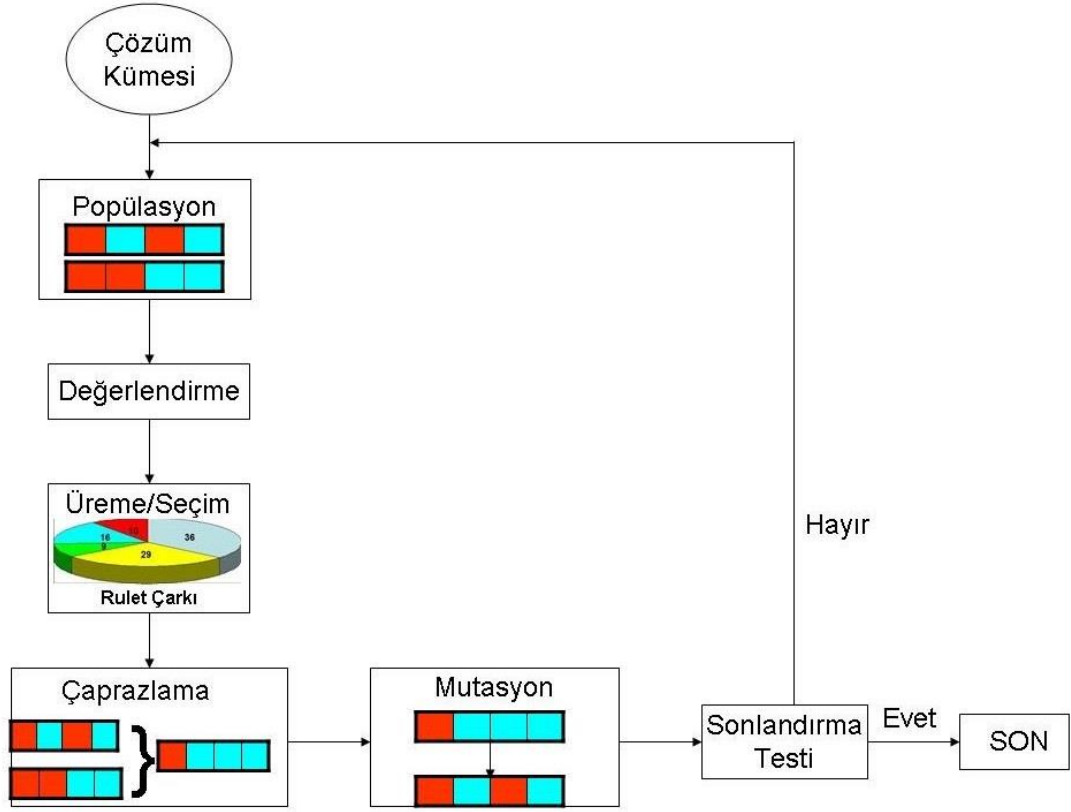
Mutasyon olasılığı (P_m) kaç kere mutasyon işlemi yapılacağını ve değişikliğe uğrayacak birey sayısını belirtir. P_m çok düşükse faydalı olabilecek genlerin geri dönüş olasılığı oldukça azalacakken çok fazlaysa oluşturulan bireylerin atalarına olan benzerlikleri azalır.

Mutasyon işlemi için de kullanılan farklı yöntemler vardır. Bunlar:

- * Ters Mutasyon
- * Yerinden Çıkarma Mutasyon
- * Ekleme Mutasyon
- * Taşınarak Mutasyon

1.8.1.6. Sonlandırma

Burada yeni birey oluşumundan sonra genetik algoritmanın belirlenmiş sonlandırma kriterine bakılıp araştırmaya devam edilir ya da son verilir. Şekil 33'de Genetik Algoritmanın işleyişi akış diyagramı olarak verilmiştir.



Şekil 31. Genetik algoritmanın işleyişi

1.8.2. Genetik Algoritmaların Özellikleri

1.8.2.1. Avantajları

Genetik algoritma öncelikli olarak problemleri çözmek için kullanılsa da farklı biyolojik ve sosyal sistem gibi konularda da model oluşturmak için kullanılabilir. Genetik algoritmalar bilinen yöntemlerle sonuca ulaşamayan problemlerde en iyi ya da en iyiye yakın sonuçları hızlı bir şekilde bulabilirler. Genetik algoritmalarının optimuma en yakın sonuçlara ulaşabilmeleri için genetik işlemlerin (seçim, çaprazlama ve mutasyon) dikkatli yapılması gerekir. Seçim işleminde performansı iyi olan bireylerin seçilme olasılığının yüksek olmasına karşın diğer bireylerin de seçilme şansı vardır. Bunun için de çözüm uzayında daha detaylı bir arama yapılır. Bu sayede çözüm alanları iyi taranmış olduğundan çok daha verimli sonuçlar elde edilebilir. Çaprazlama işleminde ise çözüm kümesinde daha önce hiç var olmamış yeni bireylerin oluşturulmasını sağlayarak daha iyi çözümler aranmış olmaktadır. Ayrıca nesiller arasında da atalara ait genlerin kaybolmasını önler. Mutasyon

olasılığı diğer işlemlere oranla çok daha düşük tutulur. Buna rağmen daha önce hiç bilinmeyen bölümlerde de araştırma imkanı sunmuş olur.

Genetik algoritmalar farklı karmaşık problemlere, küçük değişiklikler yaparak kolaylıkla uygulanabildiğinden oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Esnek bir yöntem olduğundan çok tercih edilirler.

Bu algoritmaların en önemli özelliklerinden biri de paralel olmalarıdır. Yani bir problemin çözümü sırasında çözüm uzayında çok fazla yönde aynı anda araştırma yapılabilir. Arama bölgesi tüm popülasyondur. Tek nokta ya da iki nokta arası arama yapmaz. Eğer sonuç çözümsüz yola girdiyse kendi kendine bu yolu eleyip tekrardan çözüm aramaya başlar. Genetik algoritmadaki bu paralellik özelliği sayesinde bir problem için eşit en iyi çözümleri araştırmacıya aynı anda sunabilir. Yani bir çözüm yolu bir parametreyi en iyi yaparken diğer yol da başka parametreyi en iyi yapar. Araştırmacı bunlar arasında seçim yapabilir. Genetik algoritmalar stokastik yapıdadırlar. Bu yüzden çok çözümlü fonksiyonlar için uygundurlar.

1.8.2.2. Dezavantajları

Genetik algoritmaların bahsedilen avantajlarının yanı sıra, tasarım zorlukları ya da çözüme ulaşmada yaşanabilecek sorunlar nedeniyle dezavantajları da bulunmaktadır.

Karşılaşılabilecek problemlerden biri problemin kodlanmasıdır. Çözümlerin belirtilmesinde güçlü bir dil kullanılmalıdır. Rastgele yapılacak olan seçimleri tolere edebilmelidir ki büyük hatalara ve anlamsız sonuçlara ulaşılmaz. Bu yüzden birçok kez parametrelerin farklı değerler kullanılarak test edilmesi gerekir. Uygunluk fonksiyonu yazılırken de dikkat edilmelidir. Eğer düzgün bir fonksiyon yazılamazsa gerçek problem için çözüm bulunamayabilir ve sonuç yanlış olarak bulunur. Tüm bunların yanı sıra diğer genetik algoritma parametrelerinin de seçimi dikkatli yapılmalıdır. Araştırma uzayında yeterli inceleme yapabilmek için uygun bir popülasyon büyüklüğü seçilmelidir.

Genetik algoritmaların en önemli dezavantajı ise optimum sonuca ulaşma garantisinin olmamasıdır. Klasik yöntemlerle çözülemeyen problemlerde sonucun doğruluğunu belirlemek güçtür. Eğer işlemlerin başında diğer bireylerin uygunluğundan daha iyi bir birey çıkarsa bu birey diğerlerine göre daha çok çoğalır. Bunun sonucunda bu birey popülasyon farklılığını kendi özelliklerine göre kısıtlamış olur. Bu nedenle algoritmanın yerel en iyi olan bir çözüme yakınsaması mümkün olabilir. Bu duruma erken

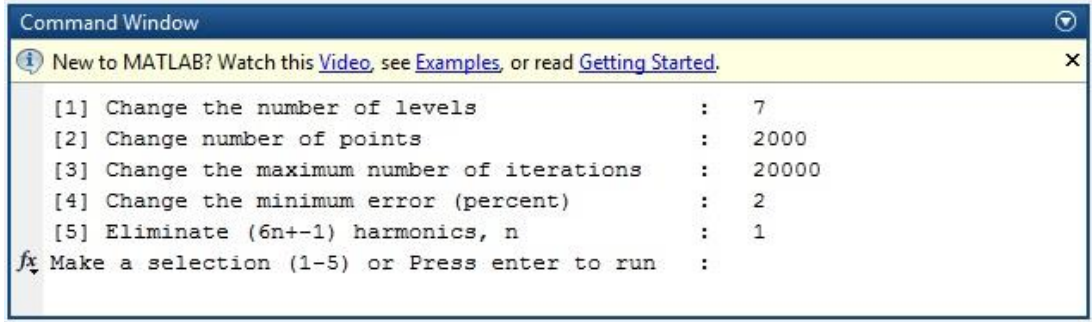
(prematüre) yakınsama denilmektedir. Bu durum özellikle az sayıda bireylerin olduğu popülasyonlar da görülen bir durumdur. Ayrıca çok kısıtlı ve yüksek düzeyde doğrusal olmayan problemlerde ise hiç yakınsama yapmayabilir.

Genetik algoritmalarındaki bu sorunların başlıca sebebi parametreler için uygun değerlerin seçilememesidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

2.1. Giriş

Seçici Harmonik Eliminasyonunda, eviriciler de seçilen harmoniklerin eliminasyonu işlemi için bulunan denklem takımlarını çözdürüp optimizasyon işleminin parçacık sürü optimizasyonu ve genetik algoritmalar yöntemi ile yapılabilmesi için iki ayrı program yazılmıştır. Yazılan bu programlarda evirici seviyesini, nokta sayısını, iterasyon sayısını, minimum hata yüzdesini ve elimine etmek istediğimiz harmoniklerin değerlerini istediğimiz şekilde değiştirebilmemiz mümkündür.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Examples, or read Getting Started.
[1] Change the number of levels           : 7
[2] Change number of points              : 2000
[3] Change the maximum number of iterations : 20000
[4] Change the minimum error (percent)    : 2
[5] Eliminate (6n+-1) harmonics, n       : 1
fx Make a selection (1-5) or Press enter to run :
```

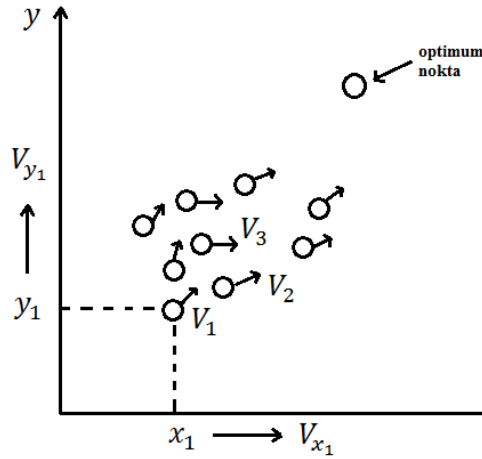
Şekil 32. MATLAB uygulamasında programlar çalıştırdıktan sonraki kullanıcı değer giriş ekranı

Şekil 32’de optimizasyon işlemi için yazılmış PSO ve GA programlarının matlab uygulamasında programlar çalıştırdıktan sonraki kullanıcı değer giriş ekranı verilmiştir. 1. adımda eviricinin seviyesi, 2. adımda hesaplanmak istenen nokta sayısını, 3. adımda programın kaç adım çalıştırılmak istendiği, 4. adımda hatanın % olarak değerini, 5. adımda eliminasyon yapmak istediğimiz harmonikleri seçerek program çalıştırılır.

Yapılan bu tez çalışmasında hem parçacık sürü optimizasyonu için hem de genetik algoritmalar yöntemi için farklı değer ve seviyelerde programlar çalıştırılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilerle 7 seviyeli ve 11 seviyeli bir evirici modeli üzerinde benzetimler yapılmış ve evirici çıkış gerilimleri incelenmiştir.

2.2. PSO Programı

Yazılan PSO programında ilk başta her parçacık için kısıtlara uygun başlangıç değerleri elde edildi. Bu değerler ilk değer olarak p_{best} 'leri oluşturdu. p_{best} 'ler belirlendikten sonra g_{best} değerleri belirlendi. Bu örnek için başlangıçta 5 adet parçacık seçildi. Seçilen parçacık sayısı rastgele belirlendi. Şekil 33'de de görüldüğü gibi her parçacık hız ve konum olarak iki adet boyuttan oluşmuştur. İlk p_{best} değerleri random olarak atandı. Atanan bu değerler parçacık konumu olarak tanımlandı. Parçacıkların gözlem uzayında hareket ettikleri varsayılarak, ilk hız değerleride random olarak atandı.



Şekil 33. Her bir parçacık için optimum nokta

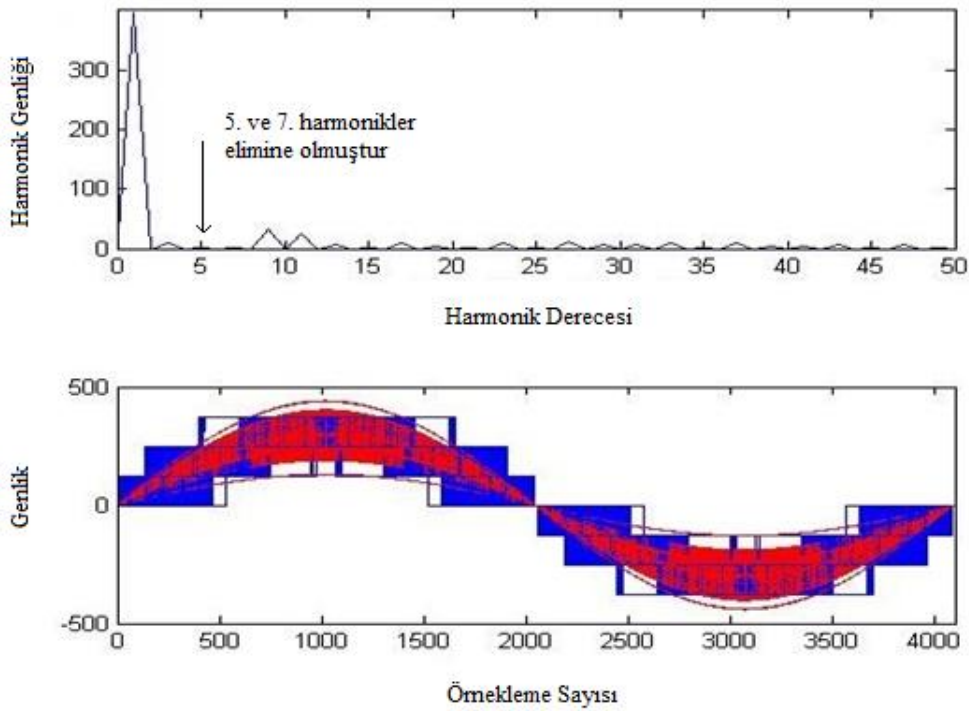
Hız vektörü, her adımda bir önceki adıma göre güncellenmiştir. Parçacıklar her bir adımdaki en iyi pozisyonlarını akıllarında tutup, diğer hareketlerini bu en iyi pozisyonlara göre belirlemektedir. Bu durumda parçacıkların her bir iterasyon için bir en iyi pozisyon değeri bulunur.

Sürü içerisindeki parçacıklar sezgisel olarak birbirlerini takip ettiklerinden, p_{best} değerine sahip parçacık takip edilecektir. Bunun için de p_{best} 'ler içinden minimum değer seçilir ve bu değer artık g_{best} değeri olur.

Parçacıkların sürü içerisinde kalıp optimizasyon problemini daha iyi bir çözüme ulaştırabilmesi için her bir parçacığın yeni konumunda belirli konum kısıtları içerisinde kalması gerekir. Bu yüzden konum kısıtı kullanılmış ve kısıt dışına çıkan parçacıklar ortadan kaldırılmıştır.

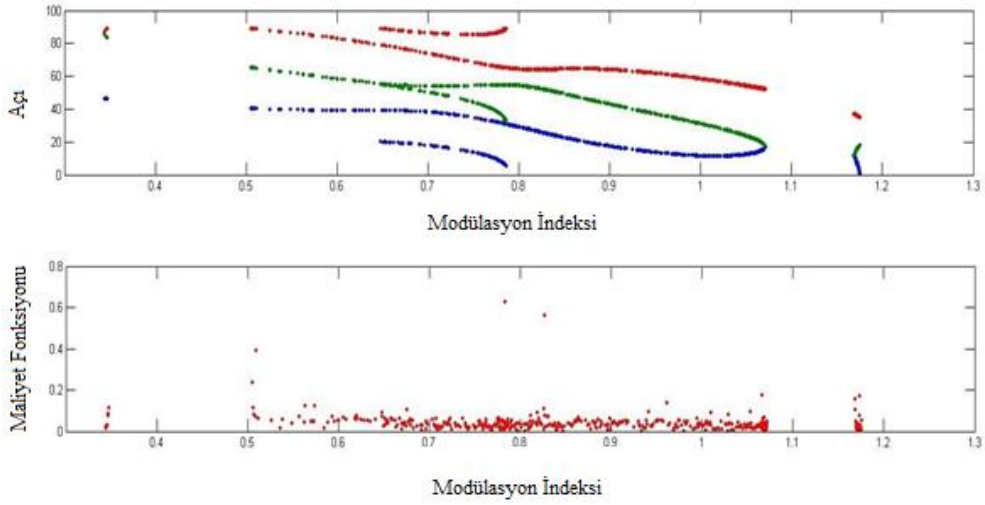
Parçacıkların hızlarının büyüklüğü kontrolsüz şekilde artarsa sürü içerisinde kopmalar meydana geleceğinden bir hız sınırlaması getirilmiştir. Sonraki iterasyonlarda hız değeri belirlenmiş v_{max} ve v_{min} değerleri arasında olmalıdır. v_{max} değeri çok büyük olursa çözüm global minimum noktasından çok uzakta çıkacaktır. v_{max} çok küçük olursa çözüm lokal minimum noktasında olur.

2.2.1. %2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide PSO Programının Çalıştırılması



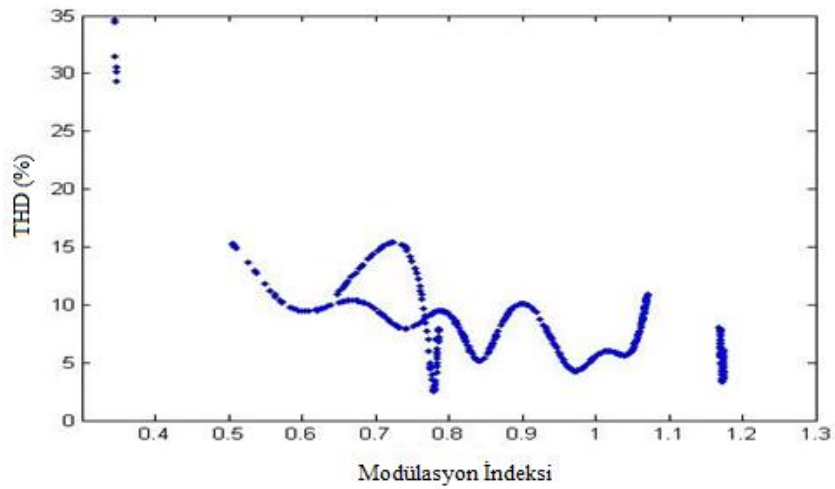
Şekil 34. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO)

Şekil 34’de program 200 iterasyon boyunca çalıştırıldığından, her iterasyon için çıkış genliği hesaplanmış ve bunları üst üste çizdirmiştir. Genlik – örnekleme sayısı grafiğinde mavi grafik evirici çıkış gerilimi genliğini, kırmızı grafik ise harmonik genliklerini göstermektedir. Harmonik genliği – harmonik derecesi grafiğinde ise programın 200. çalışmasından sonra hesaplanan harmonik genliği grafiği çizdirilmiştir. Tablo 3’e bakıldığında ana harmonik genliğinin değerleri, farklı açı ve modülasyon indekslerine göre verilmiştir.



Şekil 35. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO)

Şekil 35’de PSO programı için hesaplanan açı ve maliyet fonksiyonları modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 200 iterasyon boyunca çalıştırıldığından, her çalışması sırasında bulunan değerler grafik üzerinde topluca göstermiştir. 7 seviyeli eviricide üç adet anahtarlama açısı bulunduğundan, açı-modülasyon indeksi grafiğinde üç farklı renkte açı değerleri hesaplanmıştır. Tablo 3’de, bulunan farklı açı ve maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir.



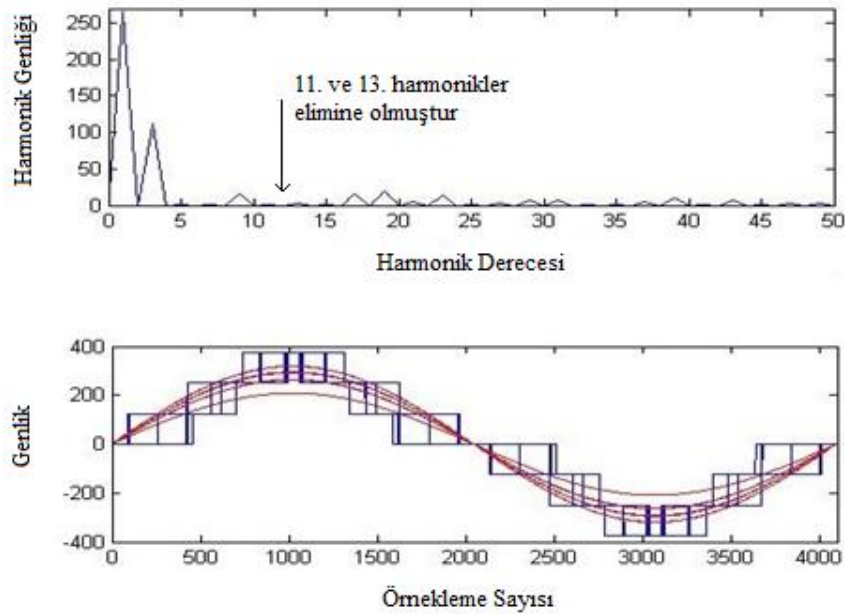
Şekil 36. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO)

Şekil 36'da toplam harmonik bozunumu modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 200 iterasyon çalıştırıldığından her çalışma sırasında hesaplanan THD değeri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 3. %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (PSO)

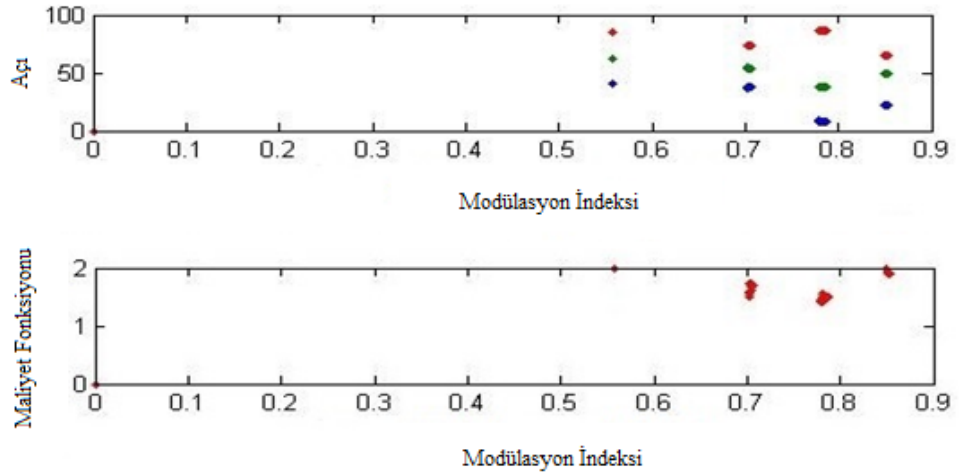
Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	THD %	Maliyet Fonksiyonu	Ana Harmonik Genliği
0,7659	85,84	41,38	11,57	9,698	0,0278	439,3
0,7863	89,1	32,87	5,761	7,961	0,2883	397,5
1,056	53,82	22,68	13,11	10,48	0,0148	440,6
1,07	52,4	18,66	15,81	6,954	0,00925	399,2

2.2.2. %4 Hata ile 11. ve 13. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide PSO Programının Çalıştırılması



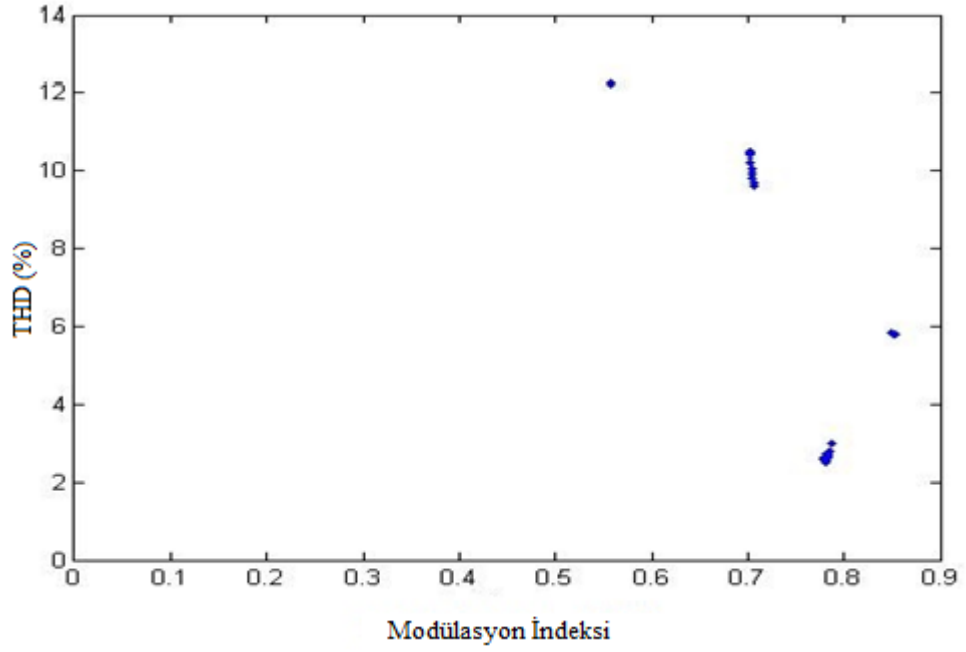
Şekil 37. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş PSO)

Şekil 37’de program 10 iterasyon boyunca çalıştırıldığından, her iterasyon için çıkış genliği hesaplanmış ve bunlar çizdirilmiştir. Genlik – örnekleme sayısı grafiğinde mavi grafik evirici çıkış gerilimi genliğini, kırmızı grafik ise harmonik genliklerini göstermektedir. Harmonik genliği – harmonik derecesi grafiğinde ise programın 10. çalışmasından sonra hesaplanan harmonik genliği grafiği çizdirilmiştir. Tablo 4’e bakıldığında ana harmonik genliğinin değerleri, farklı açı ve modülasyon indekslerine göre verilmiştir.



Şekil 38. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş)

Şekil 38’de PSO programı için hesaplanan açı ve maliyet fonksiyonları modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 10 iterasyon boyunca çalıştırıldığından, her çalışması sırasında bulunan değerler grafik üzerinde topluca göstermiştir. 7 seviyeli eviricide üç adet anahtarlama açısı bulunduğuundan, açı-modülasyon indeksi grafiğinde üç farklı renkte açı değerleri hesaplamıştır. Tablo 4’de, bulunan farklı açı ve maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir.



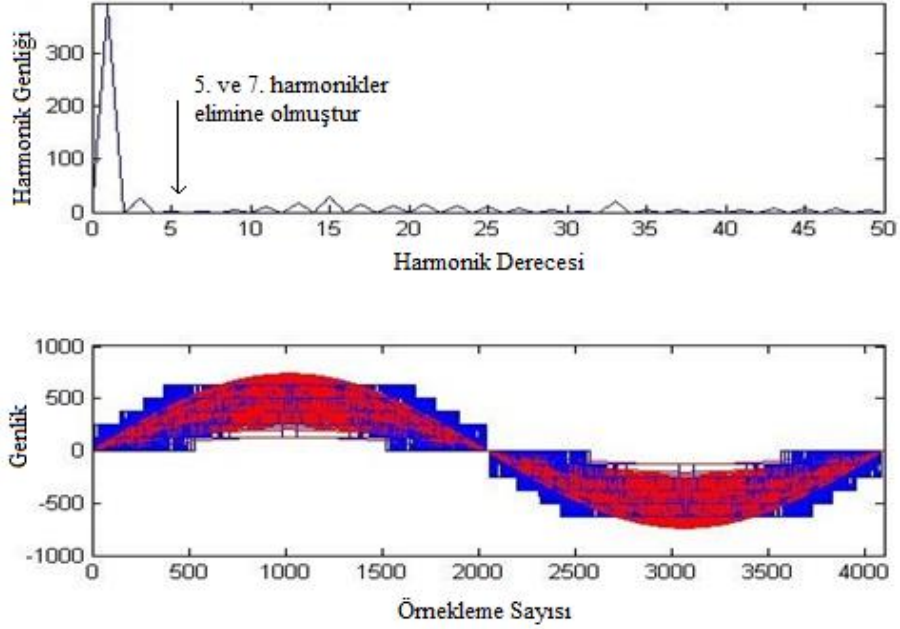
Şekil 39. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş PSO)

Şekil 39’da toplam harmonik bozunumu modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 10 iterasyon çalıştırıldığından her çalışma sırasında hesaplanan THD değeri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.

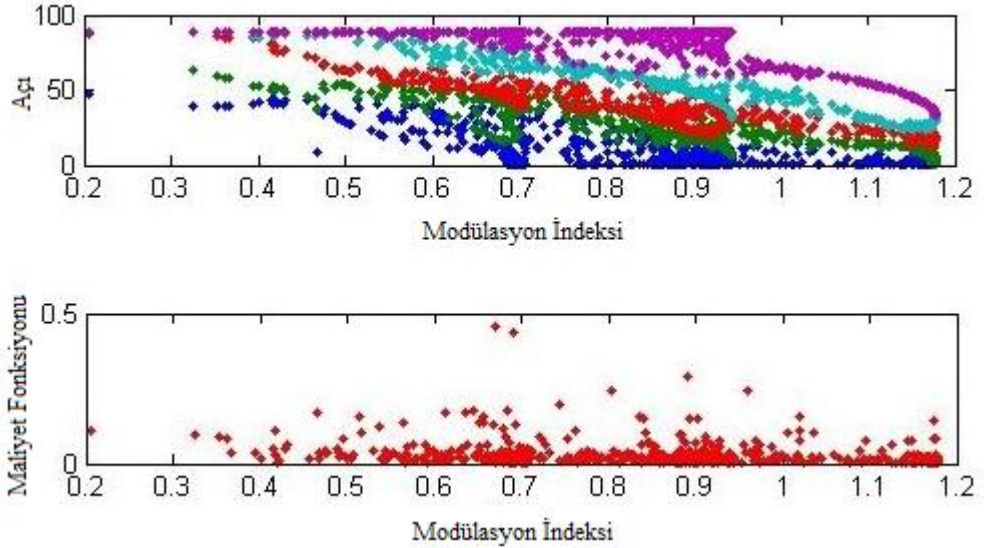
Tablo 4. %4 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (PSO)

Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	THD %	Maliyet Fonksiyonu	Ana Harmonik Genliği
0,7043	73,84	54,1	37,5	10,3	1,618	440,5
0,781	86,76	37,52	8,37	2,636	1,401	319,4
0,8518	64,69	49,12	22,52	5,801	1,903	292,8
1,173	35,62	18,02	2,907	5,212	2,727	264,1

2.2.3. %2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 11 Seviyeli Eviricide PSO Programının Çalıştırılması

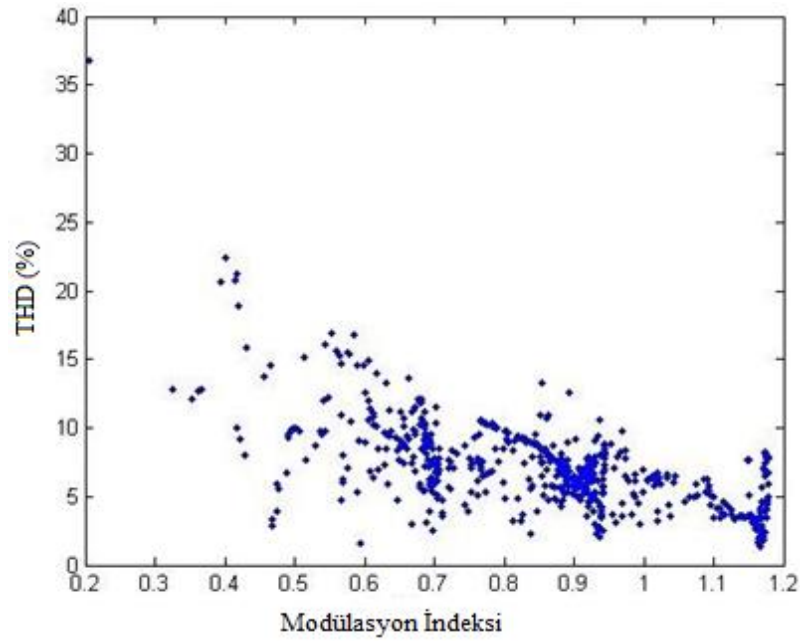


Şekil 40. 11 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO)



Şekil 41. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO)

Şekil 40'da program 2000 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Tablo 5'e bakıldığında ana harmonik genliğinin değerleri, farklı açı ve modülasyon indekslerine göre verilmiştir. Şekil 41'de PSO programı için hesaplanan açı ve maliyet fonksiyonları modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 2000 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. 11 seviyeli eviricide beş adet anahtarlama açısı bulunduğundan, açı-modülasyon indeksi grafiğinde beş farklı renkte açı değerleri hesaplamıştır. Tablo 5'de, bulunan farklı açı ve maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir.



Şekil 42. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş PSO)

Şekil 42'de toplam harmonik bozunumu modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 2000 iterasyon çalıştırılmıştır.

Tablo 5. %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 11 seviyeli evirici değerleri (PSO)

Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	THD %	Maliyet Fonksiyonu	Ana Harmonik Genliği
0,6852	89,1	75,62	47,07	40,3	12,35	7,36	0,01085	708,3
0,6876	89,1	84,87	44,64	28,37	0,9	8,14	0,0273	562,6
0,717	89,1	60,97	58,22	35,56	18,19	10,5	0,0115	499,3
0,877	88,33	68,42	42,39	36,36	8,366	6,11	0,0138	444,8

2.3. GA Programı

Genetik algoritmalarda aynı PSO algoritmaları gibi doğadaki evrimi taklit ederek problem çözümü yapar. Geleneksel yollarla çözümü zor olan problemlerin çözümünde tercih edilen bir algoritmadır. Problemin çözümünde başlangıçta rast gele bireyler seçerek başlangıç popülasyonu oluşturulur. Oluşturulan bu popülasyon içinde yeni nesli üretmek için çiftler seçilir. Bu yeni neslin bireyleri oluşturulurken seçim, çaprazlama ve mutasyon adımları uygulanır. Belirlenen bu döngü içinde zayıf bireyler elenir ve problemin çözümü için üstün niteliklere sahip olan bireyler varlığını devam ettirir. En son neslin içindeki en iyi birey çözüm için kullanılır.

Yazılan programda minimize edilmesi gereken fonksiyon, lineer olmayan denklem takımından elde edilmiştir. Daha sonra amaç fonksiyonu çözdürülürken açılar alabileceği maksimum ve minimum değerler belirlenmiştir. Daha sonra içerisinden seçim yapılacak olan popülasyon oluşturulmuştur. Yeni neslin üretimi ve mutasyon işlemleri için bir sınırlama fonksiyonu yazılmıştır.

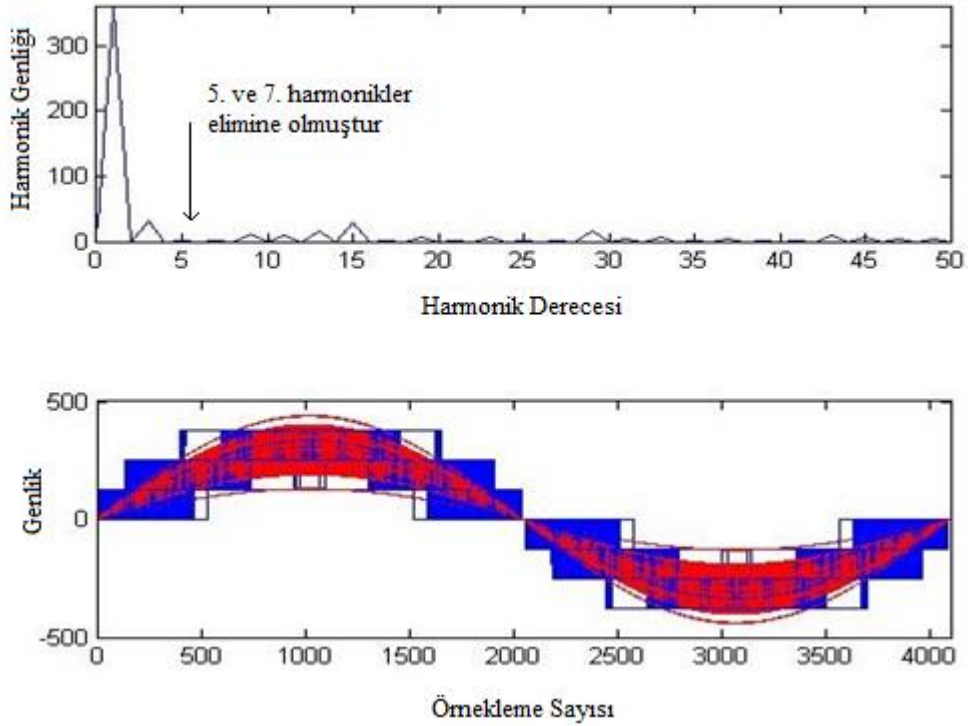
Problem için farklı numaralar verildi ve bunlar binary olarak kodlandı. Numaralar kromozomlardaki genlere göre verildi. Tez kapsamında kullanılan numaralar anahtarlama açıları olmuştur. 7 seviyeli evirici için 3 adet, 11 seviyeli evirici için 5 adet anahtarlama açısı mevcuttur. Anahtarlama açıları çeyrek dalga simetrisinden dolayı 0° - 90° arasında bulunmuştur. Popülasyon boyutu, 7 seviyeli evirici için 20, 11 seviyeli için 25 olarak seçildi. Her bir kromozom için uygun bir maliyet fonksiyonu belirlendi. Seçilen harmonikler bu maliyet fonksiyonuna göre minimize edildi.

Örneğin; 7 seviyeli bir evirici için 5 ve 7. harmonikleri elimine etmek için kullanılan maliyet fonksiyonu[46,]

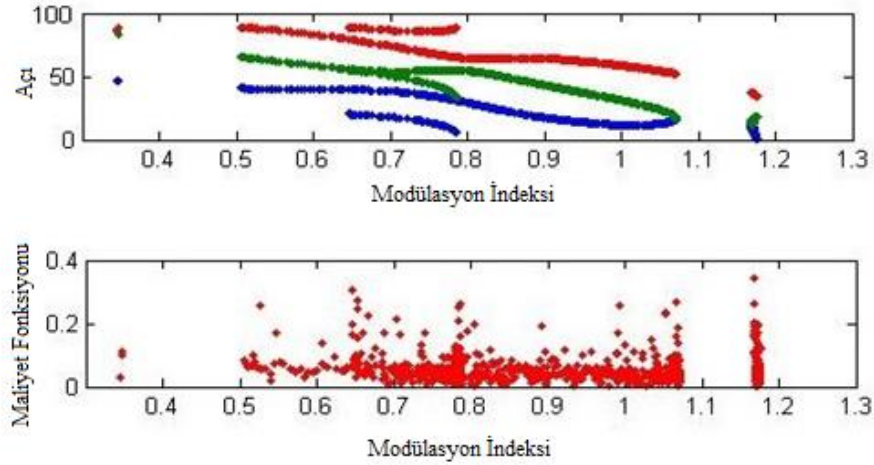
$$f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = 100 * \frac{v_5 v_7}{v_1} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'e göre maksimum uygunluk değerini veren açı değerleri ilk adım için en iyi çözüm olur. Belirlenen iterasyon adımı boyunca işlem tekrar edilir ve en iyi sonuç bulunur.

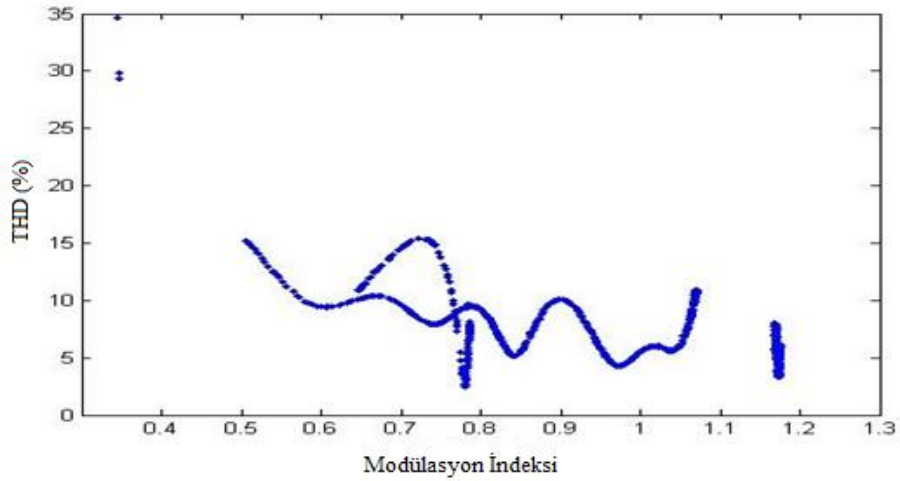
2.3.1. %2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide GA Programının Çalıştırılması



Şekil 43. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA)



Şekil 44. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA)



Şekil 45. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA)

Şekil 43'de program 2000 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Genlik – örnekleme sayısı grafiğinde mavi grafik evirici çıkış gerilimi genliğini, kırmızı grafik ise harmonik genliklerini göstermektedir. Şekle bakıldığında seçilen 5. ve 7. harmoniklerin eliminasyonunun gerçekleştiği görülmektedir. Tablo 6'ya bakıldığında ana harmonik genliğinin değerleri, farklı açı ve modülasyon indekslerine göre verilmiştir.

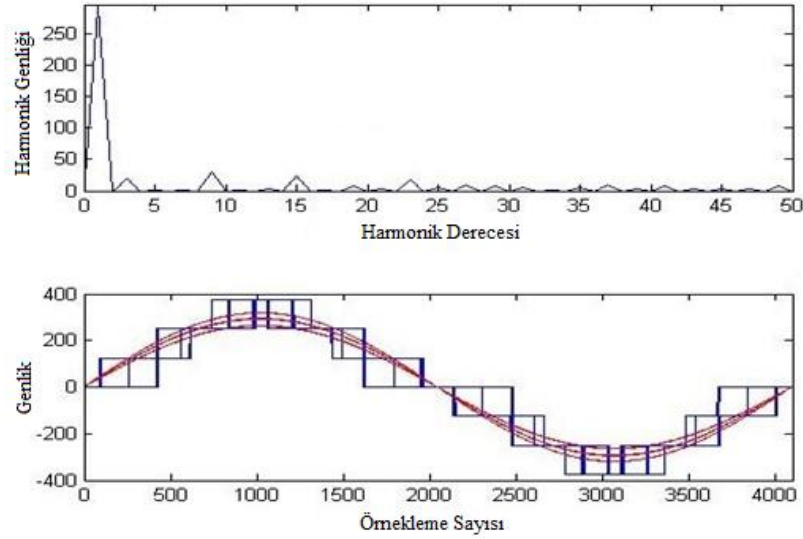
Şekil 44'de GA programı için hesaplanan açı ve maliyet fonksiyonları modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 2000 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Evirici 7 seviyeli olduğundan üç adet anahtarlama açısı hesaplanmıştır. Tablo 6'da, bulunan farklı

açı ve maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir. Şekil 45’de toplam harmonik bozunumu modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 2000 iterasyon çalıştırılmıştır.

Tablo 6 %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (GA)

Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	THD %	Maliyet Fonksiyonu	Ana Harmonik Genliği
0,7863	88,82	33,3	5,894	4,012	0,03547	401,4
0,8878	64,43	44,56	18,71	9,762	0,0226	335,8
0,9979	58,74	31,54	11,85	5,405	0,06619	420,5
1,175	35,31	17,91	2,195	5,55	0,009	374

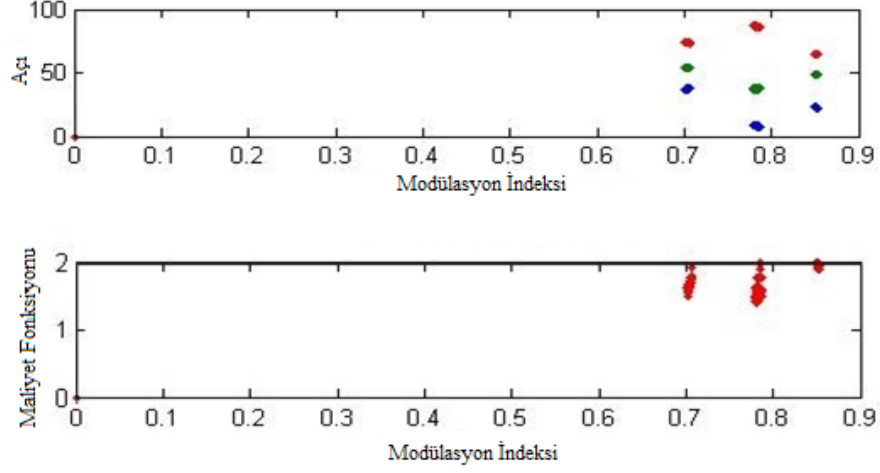
2.3.2. %4 Hata ile 11. ve 13. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide GA Programının Çalıştırılması



Şekil 46. 7 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA)

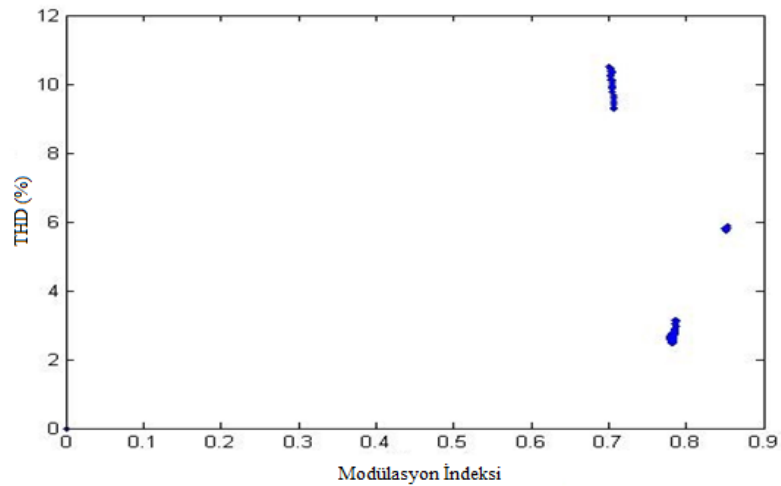
Şekil 46’da program 500 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Genlik – örnekleme sayısı grafiğinde mavi grafik evirici çıkış gerilimi genliğini, kırmızı grafik ise harmonik genliklerini göstermektedir. Şekle bakıldığında seçilen 11. ve 13. harmoniklerin

eliminasyonunun gerçekleştiği görülmektedir. Tablo 7'ye bakıldığında ana harmonik genliğinin değerleri, farklı açı ve modülasyon indekslerine göre verilmiştir.



Şekil 47. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş GA)

Şekil 47'de GA programı için hesaplanan açı ve maliyet fonksiyonları modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 500 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Evirici 7 seviyeli olduğundan üç adet anahtarlama açısı hesaplanmıştır. Tablo 7'de, bulunan farklı açı ve maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir.



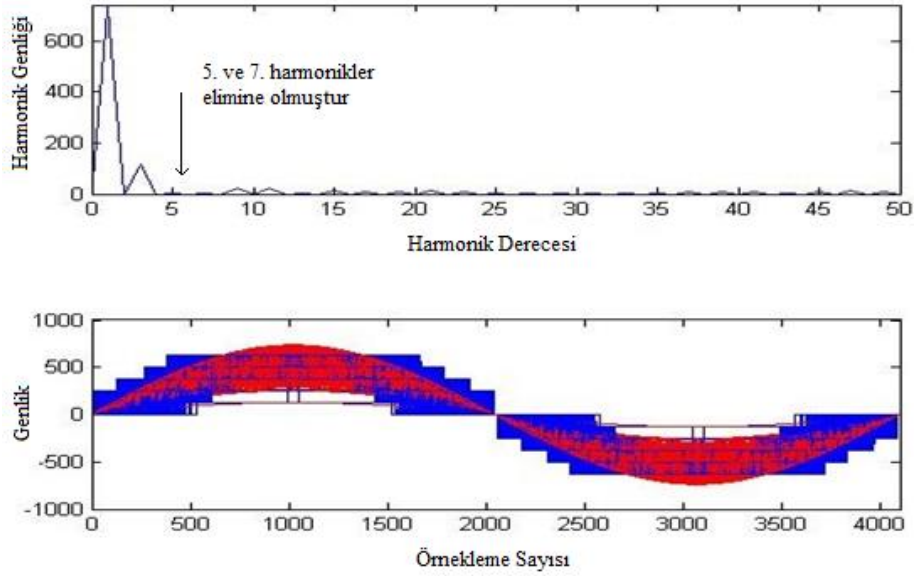
Şekil 48. 7 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (11. ve 13. harmonikleri elimine edilmiş GA)

Şekil 48’de toplam harmonik bozunumu modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 500 iterasyon çalıştırılmıştır.

Tablo 7. %4 hata ile çalıştırılmış programdaki 7 seviyeli evirici değerleri (GA)

Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	THD %	Maliyet Fonksiyonu	Ana Harmonik Genliği
0,7029	74,07	54,18	37,35	10,23	1,619	440,1
0,7792	87,07	37,37	8,611	2,651	1,42	319,8
0,8395	65,14	50,09	23,88	5,417	2,751	293,4
0,8528	64,68	48,96	22,5	5,867	1,955	263,6

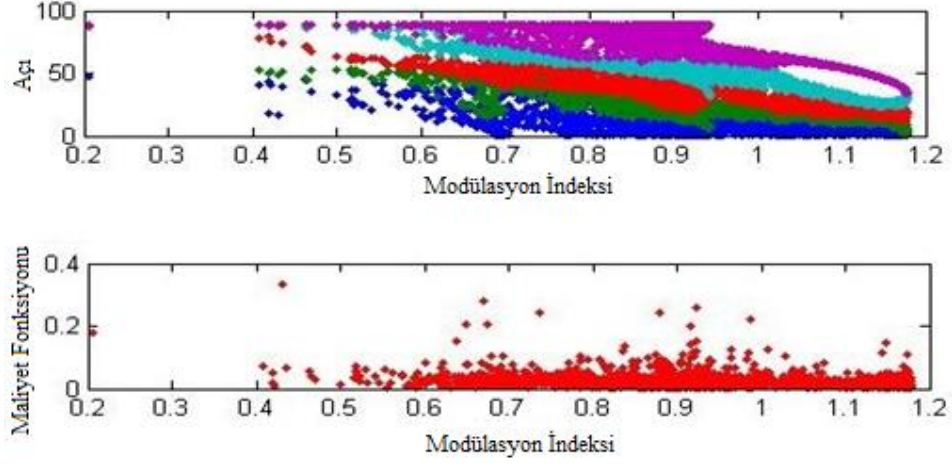
2.3.3. %2 Hata ile 5. ve 7. Harmoniklerin Elimine Edildiği 7 Seviyeli Eviricide GA Programının Çalıştırılması



Şekil 49. 11 Seviyeli evirici çıkışındaki harmonik genliği ve çıkış gerilimleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA)

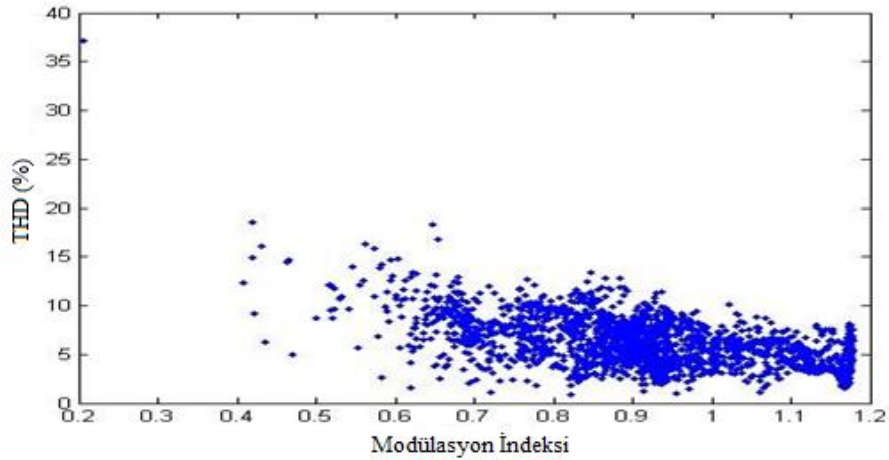
Şekil 49’da program 2000 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. Genlik – örnekleme sayısı grafiğinde mavi grafik evirici çıkış gerilimi genliğini, kırmızı grafik ise harmonik genliklerini göstermektedir. Şekle bakıldığında seçilen 5. ve 7. harmoniklerin

eliminasyonunun gerçekleştiği görülmektedir. Tablo 8'ye bakıldığında ana harmonik genliğinin değerleri, farklı açı ve modülasyon indekslerine göre verilmiştir.



Şekil 50. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre açı ve maliyet fonksiyonu değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA)

Şekil 50'de GA programı için hesaplanan açı ve maliyet fonksiyonları modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 2000 iterasyon boyunca çalıştırılmıştır. 11 seviyeli eviricide beş adet anahtarlama açısı bulunduğu için, açı-modülasyon indeksi grafiğinde beş farklı renkte açı değerleri hesaplanmıştır. Tablo 8'de, bulunan farklı açı ve maliyet fonksiyonu değerleri verilmiştir.



Şekil 51. 11 Seviyeli eviricide modülasyon indeksine göre THD değerleri (5. ve 7. harmonikleri elimine edilmiş GA)

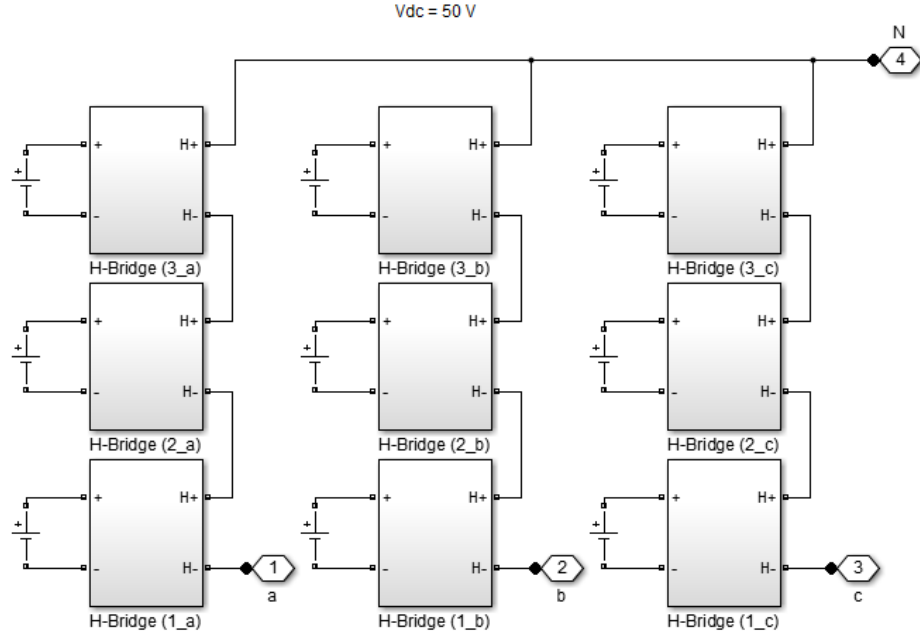
Şekil 51’de toplam harmonik bozunumu modülasyon indeksine göre çizdirilmiştir. Program 500 iterasyon çalıştırılmıştır.

Tablo 8. %2 hata ile çalıştırılmış programdaki 11 seviyeli evirici değerleri (GA)

Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	THD %	Maliyet Fonksiyonu	Ana Harmonik Genliği
0,8006	86,14	62,88	36,97	34,72	3,026	7,001	0,027	672,3
0,9036	67,27	53,45	46,96	20,79	18,67	3,14	0,0285	665,1
0,9135	62,06	61,01	39,57	28,38	11,64	11,3	0,0177	625
0,9227	88,99	43,54	23,49	13,29	7,946	5,16	0,0397	617,2

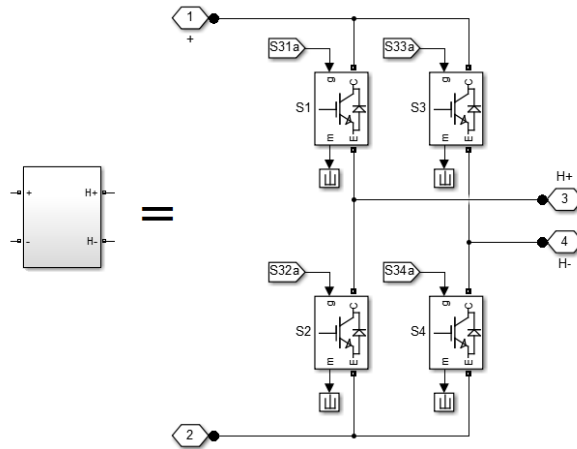
2.4. Kullanılan Evirici Modelleri

2.4.1. 7 Seviyeli Evirici Simulink Modeli

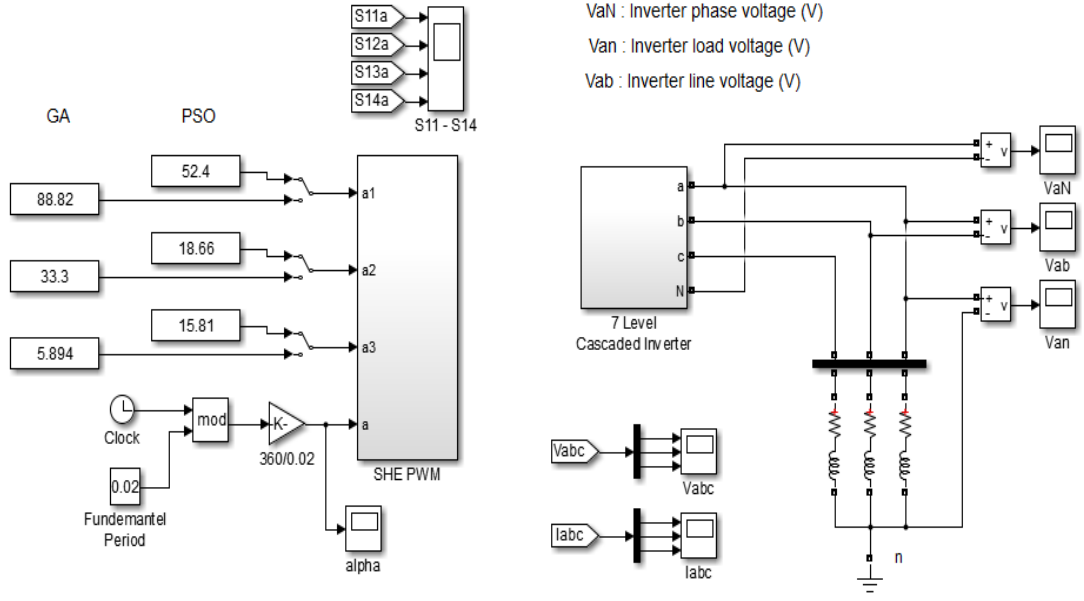


Şekil 52. 7 Seviyeli evirici simulink modeli

Şekil 52’de kullanılan 7 seviyeli eviricinin simulink modeli görülmektedir. Her bir fazda üç tane tek fazlı tam köprü evirici kullanılmıştır. Şekil 53’te ise, Şekil 52’teki her bir köprü şeklinin içyapısı gösterilmiştir.



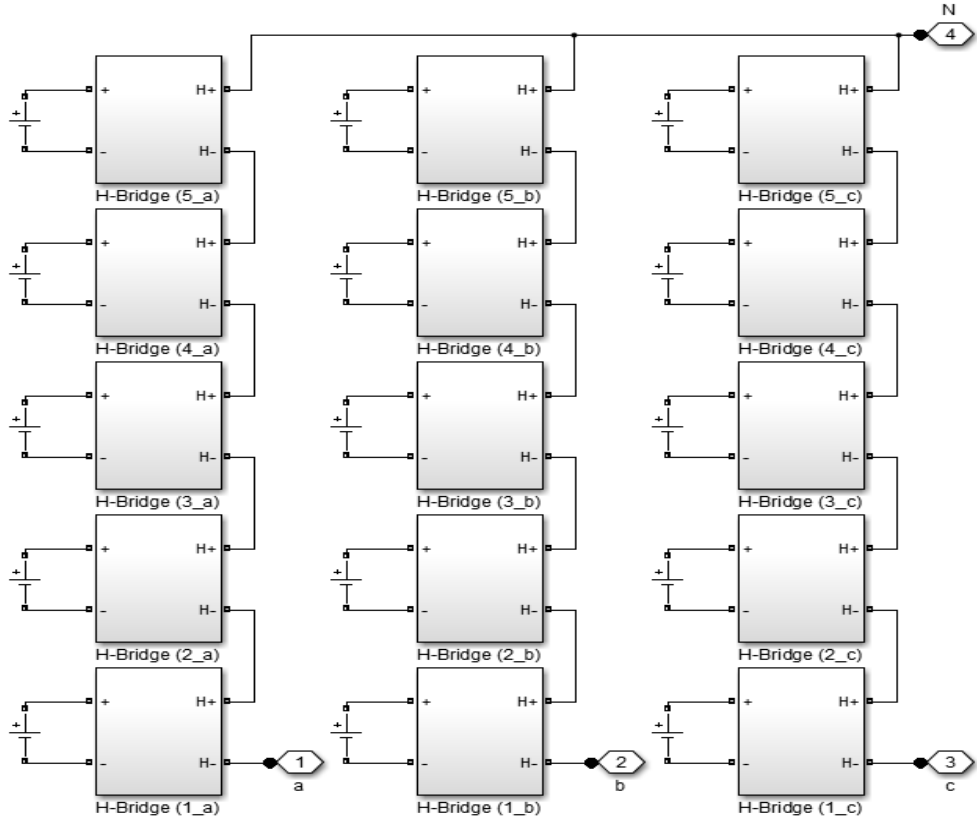
Şekil 53. 7 Seviyeli eviricide her bir evirici bloğunun içi



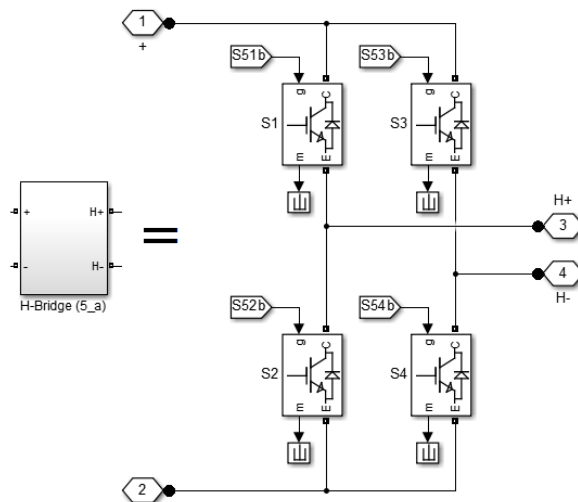
Şekil 54. PSO ve GA sonucunda bulunan açı değerlerinin kullanıldığı 7 seviyeli evirici modeli

Şekil 54'de PSO ve GA yöntemleri sonunda bulunan açı değerlerinin girildiği 7 seviyeli eviricinin modeli gösterilmiştir. Bulunan optimum açı değerleri sırasıyla $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ olarak girilir. Program çalıştırıldığında çıkış gerilimleri elde edilmiş olur.

2.4.2. 11 Seviyeli Evirici Simulink Modeli



Şekil 55. 11 Seviyeli evirici simulink modeli



Şekil 56. 11 Seviyeli eviricide her bir evirici bloğunun içi

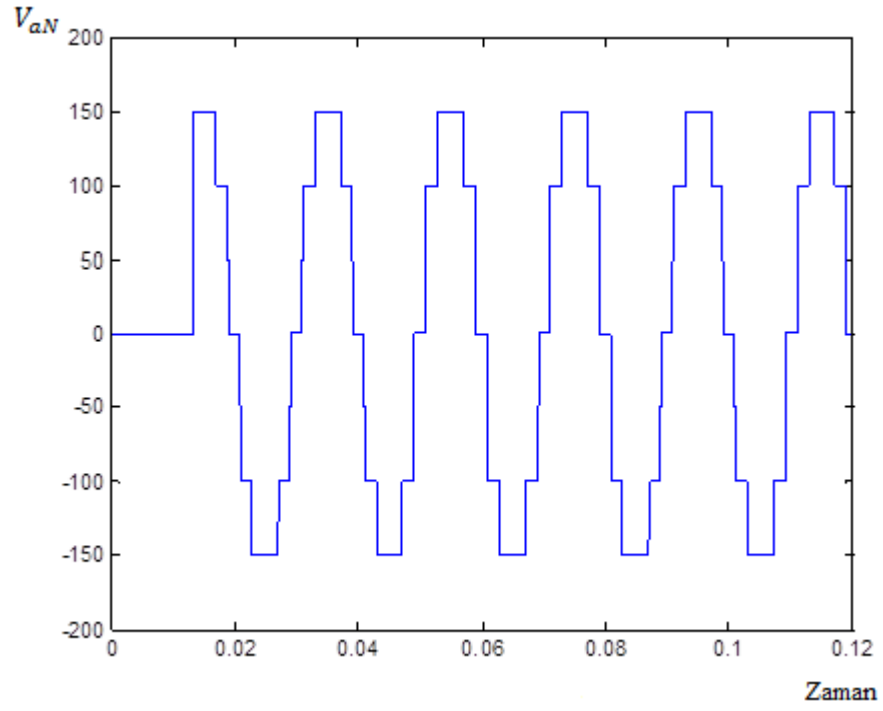
3. SONUÇLAR

3.1. 7 Seviyeli Evirici İçin PSO Algoritması ile Elde Edilen Sonuçlar

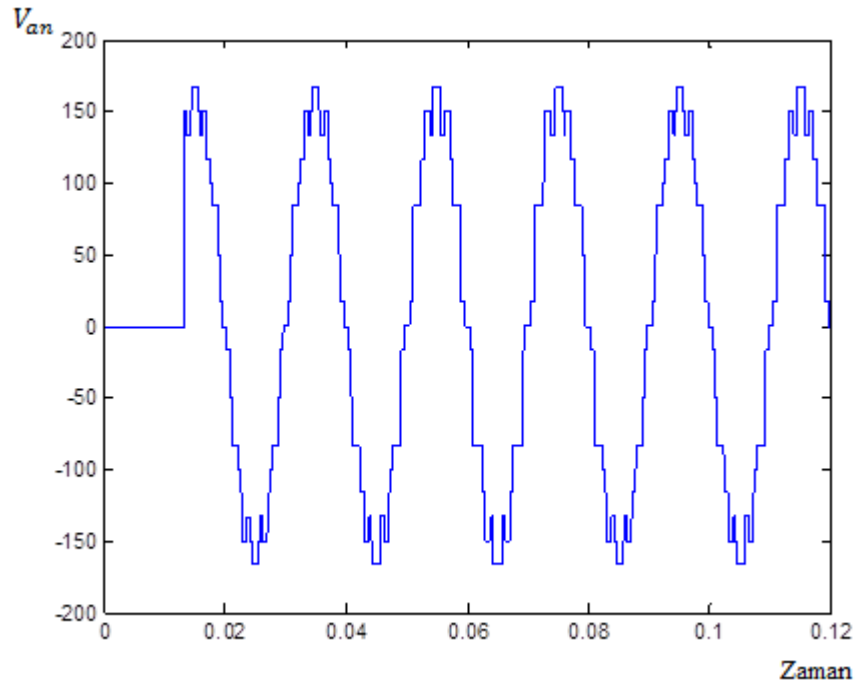
%2 hata ile 5. ve 7. harmonikleri elemine edebilen anahtarlama açılarından en uygun olanları seçilerek, 7 seviyeli bir eviricide kullanılmıştır. Anahtarlama açıları seçilirken modülasyon indeksi ve toplam harmonik bozunumu dikkate alınmıştır. Toplam harmonik bozunumu en az ve modülasyon indeksinin 1'e yakın olduğu değerler seçilmiştir. Modülasyon indeksi=1 olduğu durumda ideal modülasyon yapılmış olur. Bu şartlar altında Tablo 3'deki kullanılan değerler aşağıdaki gibidir.

Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	THD %
1,07	52,4	18,66	15,81	6,954

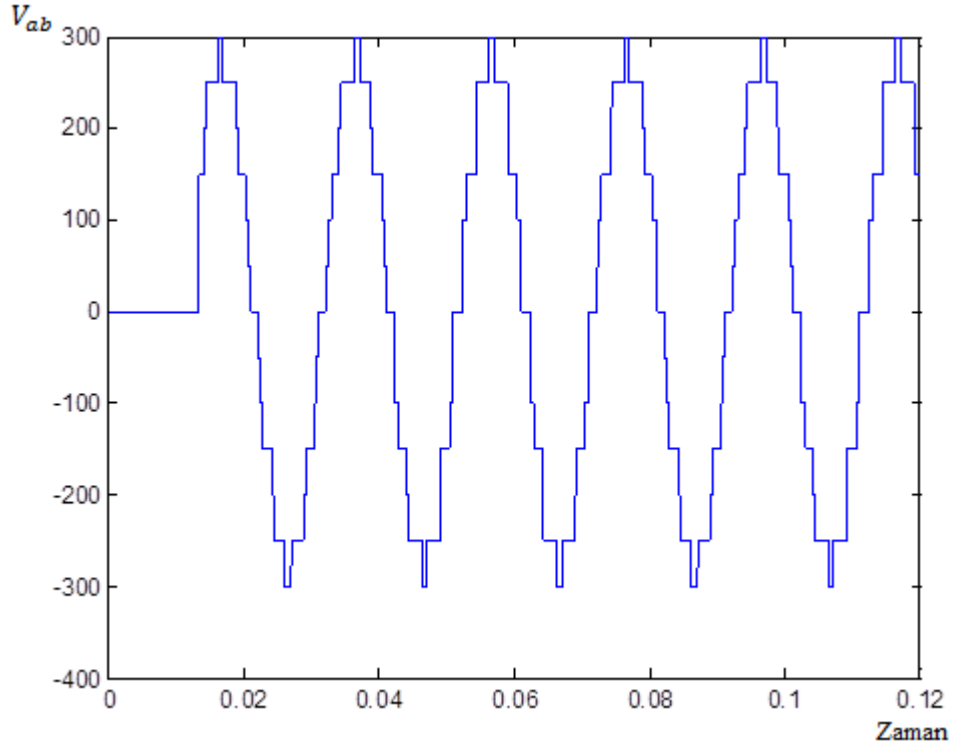
Seçilen anahtarlama açıları ile 7 seviyeli evirici modeli çalıştırılıp, evirici çıkış gerilimleri incelenmiştir. Evirici çıkışındaki evirici faz gerilimi, evirici yük gerilimi, evirici çıkışındaki faz-faz arasındaki gerilim grafikleri sırasıyla V_{aN} , V_{an} , V_{ab} sembolleri ile gösterilmiştir.



Şekil 58. Faz gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO)



Şekil 59. Yük gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO)



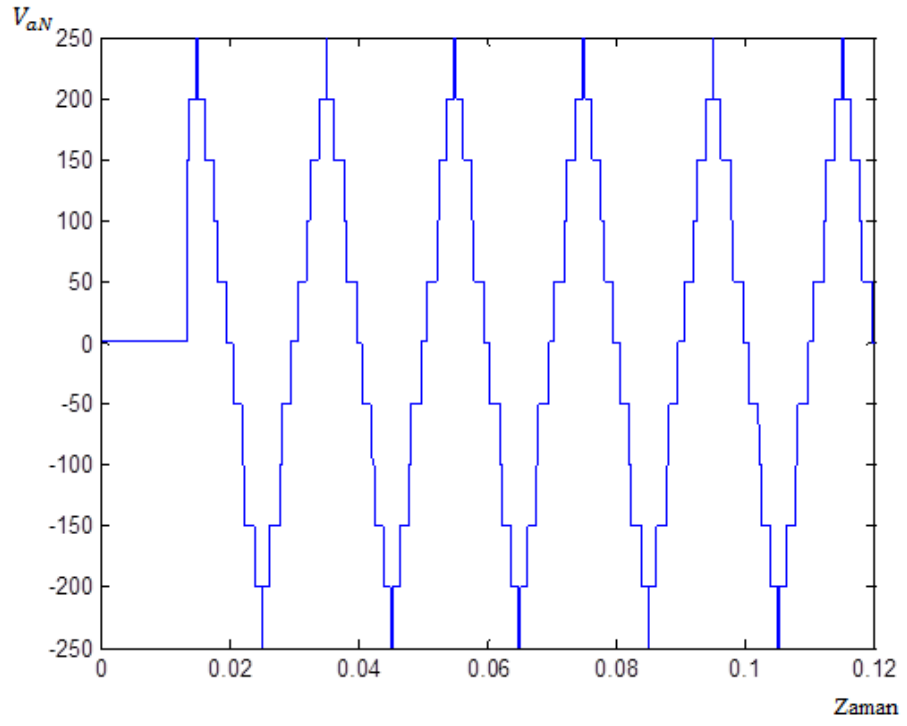
Şekil 60. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO)

Şekil 58’de evirici faz geriliminin çıkış dalga şekli (V_{aN}) görülmektedir. V_{aN} geriliminin maksimum değeri=153,94 V’tur. Şekil 59’de yük üzerindeki çıkış geriliminin (V_{an}) maksimum değeri=168,3 V’tur. Şekil 60’de ise faz faz arası gerilimin (V_{ab}) maksimum değeri=295,03 V’tur. Bu durumda faz faz arası gerilim, faz geriliminin yaklaşık olarak $\sqrt{3}$ katıdır.

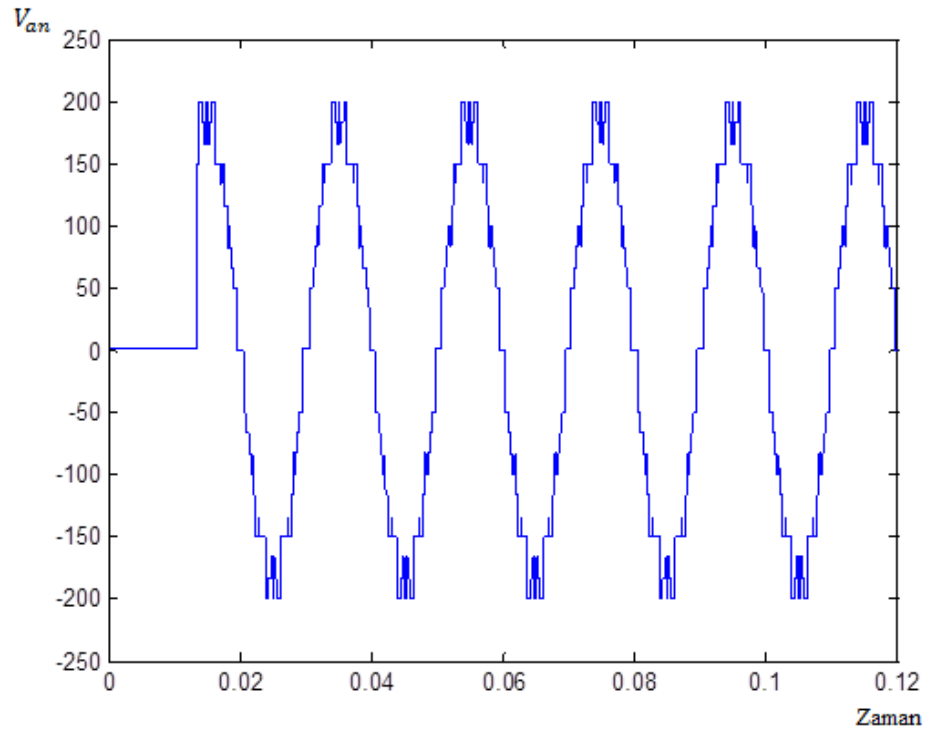
3.2. 11 Seviyeli Evirici İçin PSO Algoritması ile Elde Edilen Sonuçlar

%2 hata ile 5. ve 7. harmonikleri elemine edebilen anahtarlama açıları için Tablo 5’den aşağıdaki değerler seçilmiştir.

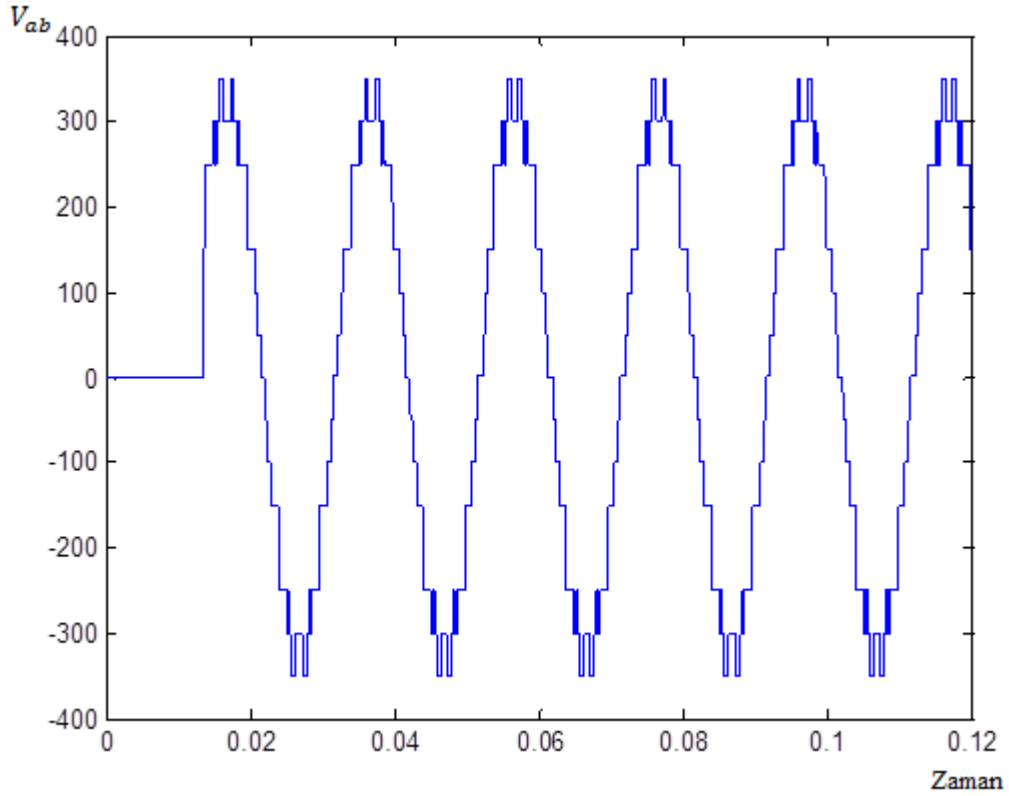
Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	THD %
0,877	88,33	68,42	42,39	36,36	8,366	6,11



Şekil 61. Faz gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-PSO)



Şekil 62. Yük gerilimi-zaman grafiği (11 seviyeli-PSO)



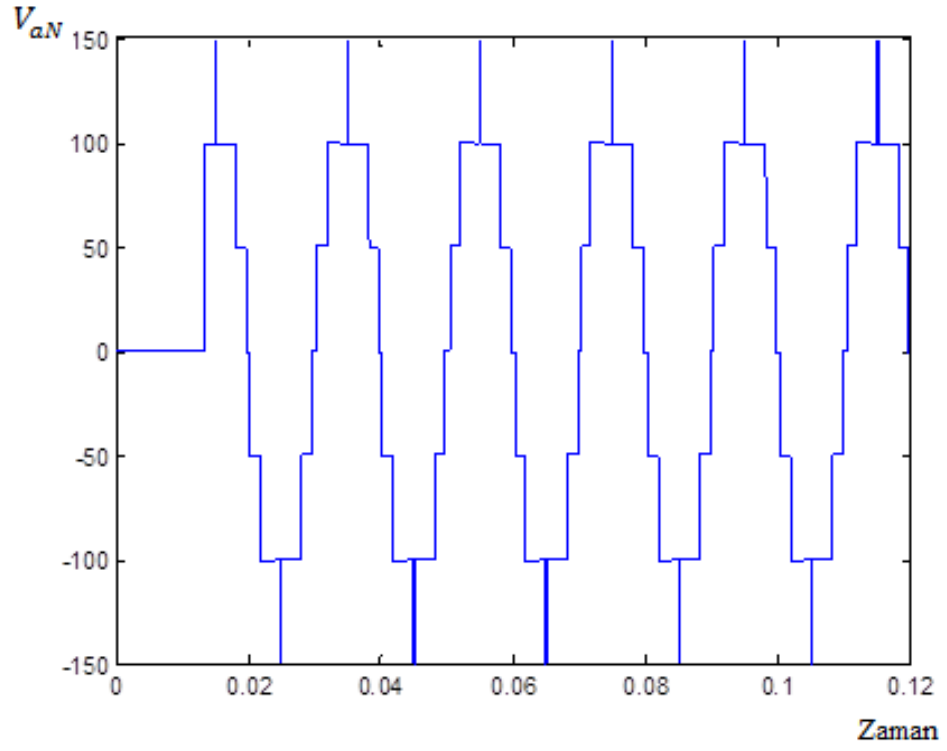
Şekil 63. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (11 seviyeli-PSO)

Şekil 61’de evirici faz geriliminin çıkış dalga şekli (V_{aN}) görülmektedir. V_{aN} geriliminin maksimum değeri=249,03 V’tur. Şekil 62’de yük üzerindeki çıkış geriliminin (V_{an}) maksimum değeri=215,11 V’tur. Şekil 63’de ise faz faz arası gerilimin (V_{ab}) maksimum değeri=365,78 V’tur.

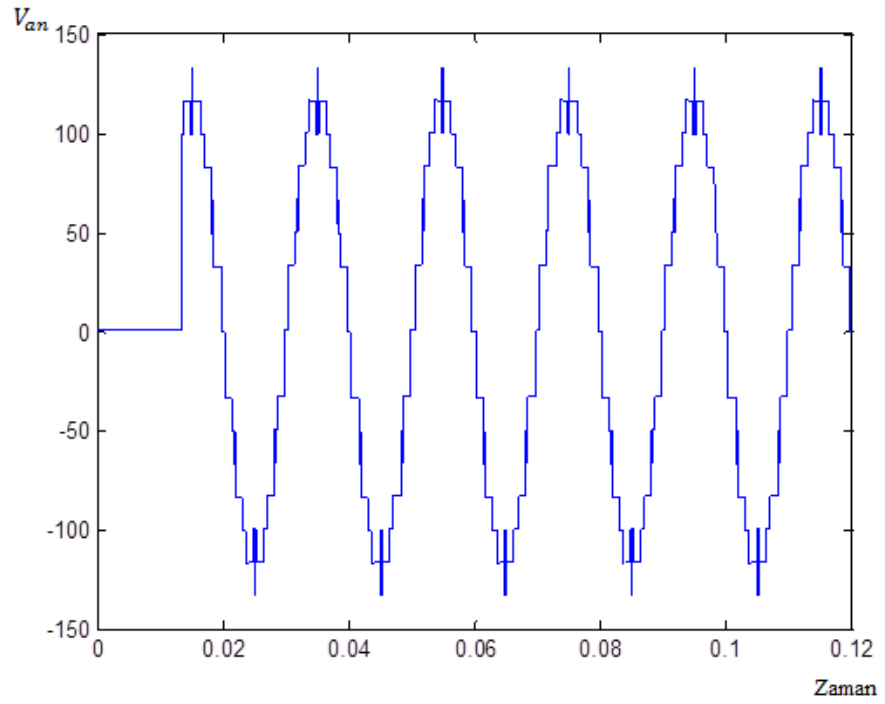
3.3. 7 Seviyeli Evirici İçin GA ile Elde Edilen Sonuçlar

%2 hata ile 5. ve 7. harmonikleri elemine edebilen anahtarlama açıları için Tablo 6’dan aşağıdaki değerler seçilmiştir.

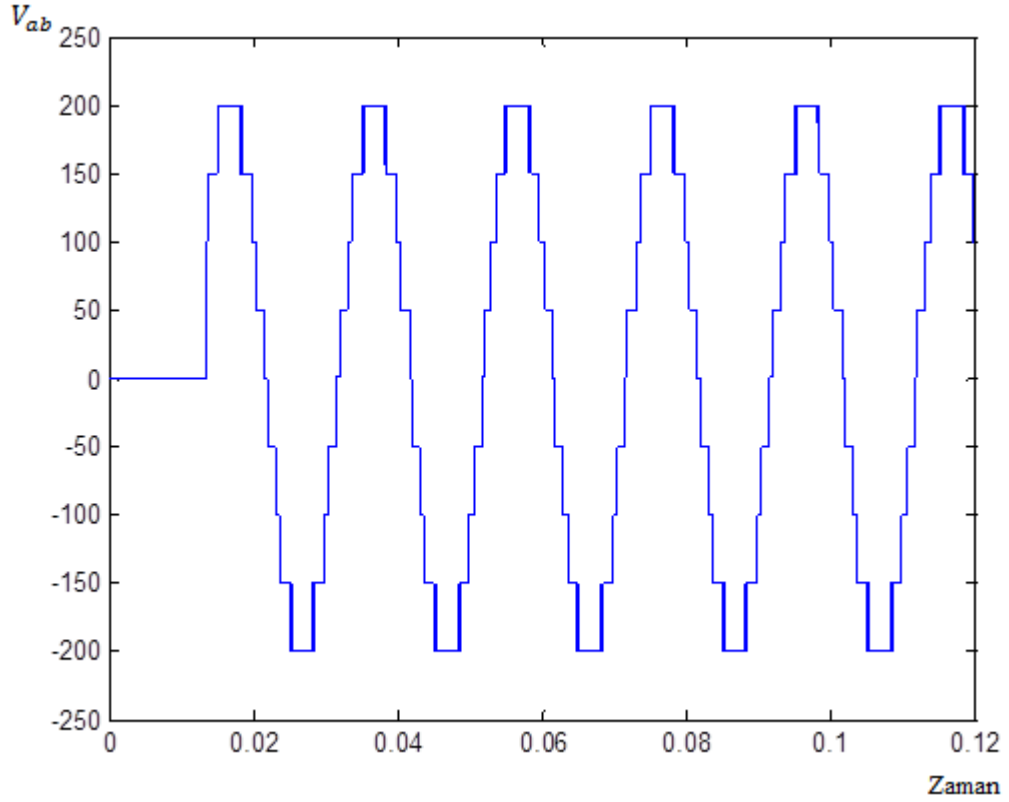
Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	THD %
0,7863	88,82	33,3	5,894	4,012



Şekil 64. Faz gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-GA)



Şekil 65. Yük gerilimi-zaman grafiği (7 seviyeli-GA)



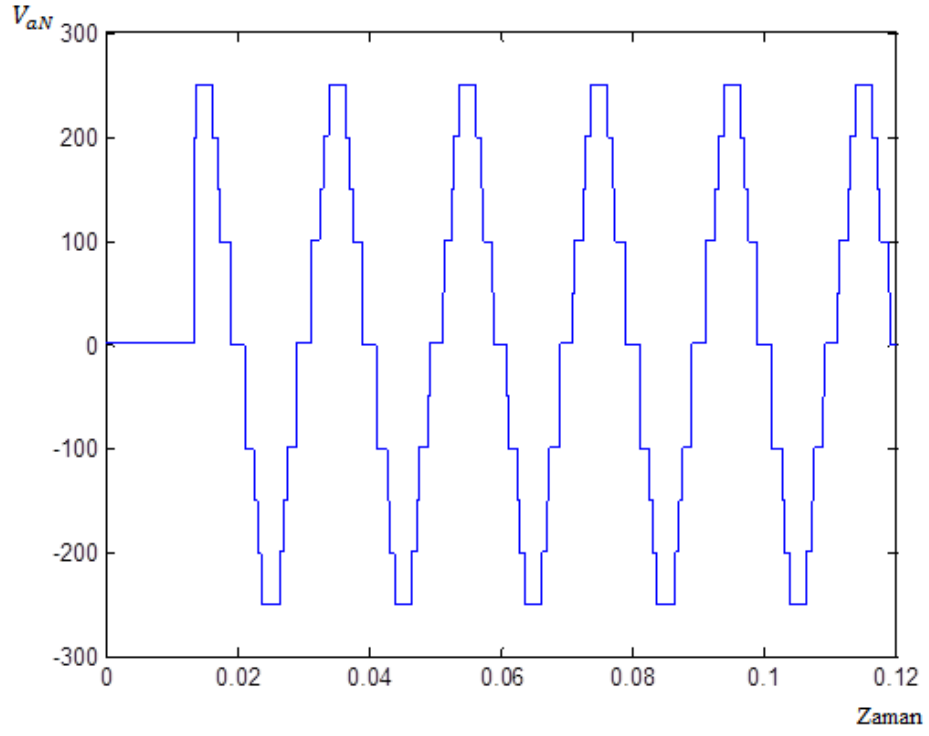
Şekil 66. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (7 seviyeli-GA)

Şekil 64'de evirici faz geriliminin çıkış dalga şekli (V_{aN}) görülmektedir. V_{aN} geriliminin maksimum değeri=148,13 V'tur. Şekil 65'de yük üzerindeki çıkış geriliminin (V_{an}) maksimum değeri=135,11 V'tur. Şekil 66'da ise faz faz arası gerilimin (V_{ab}) maksimum değeri=201,4 V'tur.

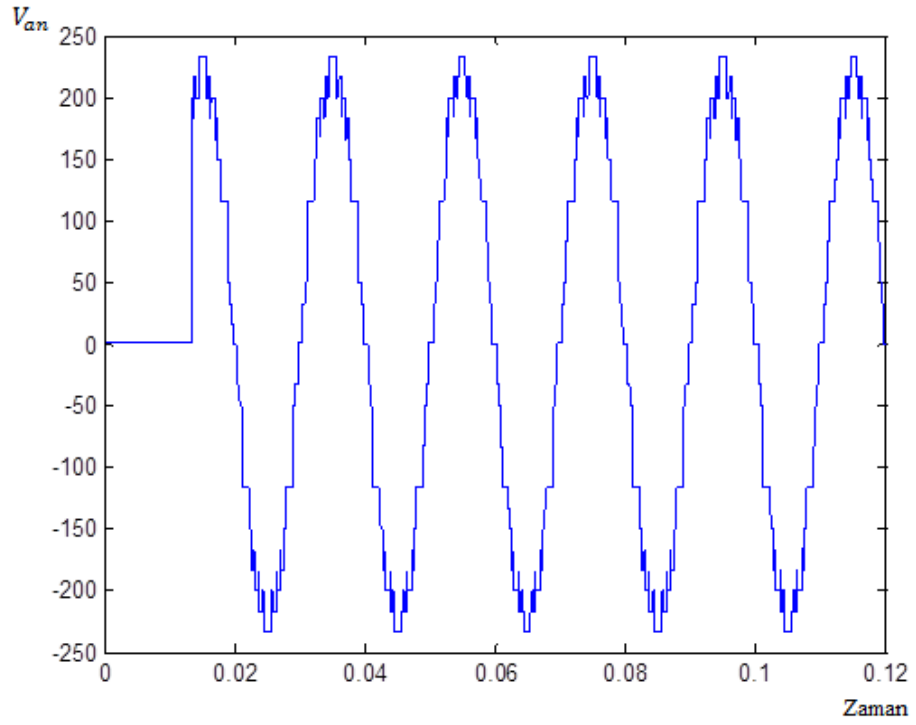
3.4. 11 Seviyeli Evirici İçin GA ile Elde Edilen Sonuçlar

%2 hata ile 5. ve 7. harmonikleri elemine edebilen anahtarlama açıları için Tablo 8'den aşağıdaki değerler seçilmiştir.

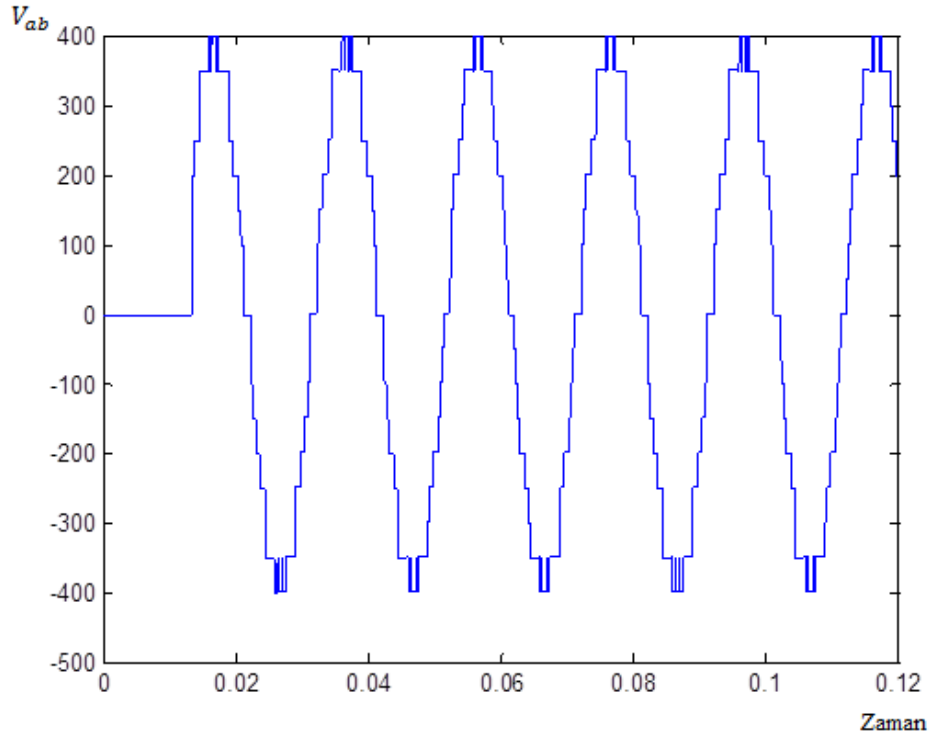
Modülasyon İndeksi	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	THD %
0,9036	67,27	53,45	46,96	20,79	18,67	3,14



Şekil 67. Faz gerilimi-zaman grafiği (11 seviyeli-GA)



Şekil 68. Yük gerilimi-zaman grafiği (11 seviyeli-GA)



Şekil 69. Faz-faz arası gerilim-zaman grafiği (11 seviyeli-GA)

Şekil 67’de evirici faz geriliminin çıkış dalga şekli (V_{aN}) görülmektedir. V_{aN} geriliminin maksimum değeri=248,4 V’tur. Şekil 68’de yük üzerindeki çıkış geriliminin (V_{an}) maksimum değeri=233,16 V’tur. Şekil 69’da ise faz faz arası gerilimin (V_{ab}) maksimum değeri=396,23 V’tur.

Bu tezde, farklı seviyelerdeki evirici çıkış gerilimi dalga şekillerinde, istenilen harmoniklerin elimine edilmesini sağlayacak bir SHEPWM algoritması oluşturulmuştur. Sonra bu algoritmanın çözümünde optimum sonuçları elde edebilmek için PSO ve GA yöntemleri ile optimizasyon işlemi yapılmıştır. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen veriler Matlab/simulink programında modellenen 7 ve 11 seviyeli eviriciler üzerinde denenmiştir.

Evirici çıkışlarındaki gerilim genlik değerleri incelenecek olursa, istenilen harmoniklerin elimine edilebildiği ilaveten üç fazlı dengeli sistemden dolayı da üç ve üçün katı harmoniklerin oluşmadığı gözlenmiştir. Ana harmoniğe en yakın büyük harmoniğin, seçilerek elimine edilmiş harmonik derecesinden bir sonraki olduğu görülmüştür. Geriye

kalan seçilmeyen harmonikler ise pasif bir filtre yardımı ile elimine edilebilir. Ayrıca bulunan bu genlik değerleri deneysel uygulamalar içinde uygundur.

Simülasyon sonuçları göstermektedir ki kullanılan SHEPWM yöntemi, herhangi bir seçilen harmoniği etkili bir şekilde elimine etmekte ve çıkış gerilim dalga şekillerindeki toplam harmonik distorsiyon oldukça düşük bir değere sahip olmaktadır.

Aynı modülasyon indeksi değerinde GA yöntemi ile bulunan açı değerleri kullanılarak modellenen evirici çıkışındaki toplam harmonik bozunumu değeri, PSO yöntemi ile bulunan açı değerleri kullanılarak modellenen evirici çıkışındaki değerden daha küçük çıkmıştır. Ayrıca yapılan harmonik eliminasyon işleminde, işlem tamamladıktan sonra kalan diğer harmoniklerin genliklerinin toplamı GA yönteminde daha az çıkmıştır. Sonuç olarak PSO ve GA optimizasyon yöntemleri için alınan ayrı ayrı sonuçlar kıyaslandığında, GA yöntemini için bulunan sonuçların daha iyi performans sergilediği görülmüştür.

Tez kapsamında yapılan benzetim sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslandığında, modülasyon indeksi ve toplam harmonik bozunumu bakımından daha uygun sonuçlar bulunmuştur.

Bu çalışmaya ek olarak daha farklı algoritmalar ile optimizasyon işlemi denenip, daha düşük toplam harmonik bozunumu değerine sahip eliminasyon işlemi yapılabilir.

4. KAYNAKLAR

1. Bowes, S. R. ve Clark, P. R., Simple Microprocessor Implementation of New Regular-Sampled Harmonic Elimination Pwm Techniques, IEEE Transactions. Ind. Appl., 28 (1992) 89–95.
2. Karshenas, H. R., Kojori, H. A. ve Dewan, S. B., Generalized Techniques of Selective Harmonic Elimination and Current Control in Current Source Inverters/Converters, IEEE Transactions on Power Electronics, 10, 5 (1995) 566-573.
3. Park, S. J., Kang, F. S., Lee, M. H. ve Kim, C. U., A New Single-Phase Five-Level PWM Inverter Employing A Deadbeat Control Scheme, IEEE Transactions on Power Electronics, 18, 3 (2003) 831–843.
4. Lund R., Manjrekar M. D., Steimer P. ve Lipo, T. A., Control Strategies for A Hybrid Seven-Level Inverter, EPE Switz, (1999) 1-10.
5. Ortuzar, M., Carmi, R., Dixon, J. ve Moran, L., Voltage Source Active Power Filter, Based on Multi-Stage Converter and Ultracapacitor Dc-Link, Industrial Electronics Society, The 29th Annual Conference of the IEEE (IECON'03), November 2003, USA, 2300-2305.
6. Junling, C., Yaohua, L., Ping, W., Zhizhu, Y. ve Zuyi, D., A Closed-Loop Selective Harmonic Compensation with Capacitor Voltage Balancing Control of Cascaded Multilevel Inverter for High-Power Active Power Filters, 39th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC'08), June 2008, Greece, 569–573.
7. Abdelhamid, T. H. ve Madouh, J. Y., Advanced Static VAR Compensator Using A New Topology of Multilevel Inverters Energized from Non-Equal DC Sources, IEEE Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, (2008) 1-8.
8. Rodriguez, J., Lai, J. S. ve Peng, F. Z., Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 49, 4 (2002) 724-738.
9. Kouzou, A., Mahmoudi, M. O. ve Boucherit, M. S., Application of SHE-PWM for Seven-Level Inverter Output Voltage Enhancement Based on Particle Swarm Optimization, 7th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices (SSD), June 2010 Amman, Jordan, 1-6.
10. Azab, M., Harmonic Elimination in Three-Phase Voltage Source Inverters by Particle Swarm Optimization, Journal of Electrical Engineering and Technology, 6, 3 (2011) 334-341.
11. Jeevabharathi, T. ve Padmathilagam, V., Harmonic Elimination of Cascaded Multilevel Inverters Using Particle Swarm Optimization, International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET), March 2012 , India, 301–306.

12. Kouzou, A., Stolze, P., Mahmoudi, M. O., Boucherit, M. S. ve Kennel, R., The Application of the SHE-PWM Based on Particle Swarm Optimization for the Improvement of the Cascaded H-Bridge Inverter Output Voltage, 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 30 August-01 September 2011, United Kingdom, 1-10.
13. Ismail, B., Hassan, S. I. S., Ismail, R. C., Haron, A. R. ve Azmi, A., Selective Harmonic Elimination of Five-level Cascaded Inverter Using Particle Swarm Optimization, International Journal Engineering Technology, 5, 6 (2014) 1-13.
14. Kouzou, A., Stolze, P., Mahmoudi, M. O., Boucherit, M. S. ve Kennel, R., The Application of the SHE-PWM Based on Particle Swarm Optimization for the Improvement of the Cascaded H-Bridge Inverter Output Voltage, 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 30 August-01 September 2011, United Kingdom, 1-10.
15. Patel, H. S. ve Hoft, R. G., Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I--Harmonic Elimination. IEEE Transactions Industry Applications, IA-9, 3 (1973) 310–317.
16. Dahidah, M. S. A., ve Agelidis, V. G., Selective Harmonic Elimination PWM Control for Cascaded Multilevel Voltage Source Converters: A Generalized Formula, Power Electronics IEEE Transactions, 23, 4 (2008) 1620–1630.
17. Du, Z., Tolbert, L. M., Chiasson, J. N. ve Ozpineci, B., Reduced Switching-Frequency Active Harmonic Elimination for Multilevel Converters, IEEE Transactions Industrial Electronics, 55, 4 (2008) 1761–1770.
18. Dargahi, V., Sadigh, A. K. ve Corzine, K., Selective Harmonic Elimination for Extended Cascaded Multicell Multilevel Power Converters, Power Systems Conference (PSC), March 2015, Clemson, SC, 1–8.
19. Simha, R. ve Carnahan, J., Nature's Algorithms: Natural and Social Metaphors in Algorithm Design, IEEE Potentials, 20, 2 (2001) 21-24.
20. Alataş, B., Kaotik Haritalı Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmaları Geliştirme, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2007.
21. Karaboğa, D., Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Dilek, N., 3. Basım, 1-19, Nobel Yayın Evi, Ankara, 2014.
22. Eldem, H., Karınca Kloloni Optimizasyonu (KKO) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) Algoritmaları Temelli Bir Hiyerarşik Yaklaşım Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
23. Kennedy, J. ve Eberhart, R., Particle Swarm Optimization, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, November 1995, Perth, WA, 1942–1948.

24. Hu, X., Shi, Y. ve Eberhart, R., Recent Advances in Particle Swarm, Congress on Evolutionary Computation (CEC), June 2004, Portland, USA, 90-97.
25. Ortakçı, Y., Parçacık Sürü Optimizasyonu Yöntemlerinin Uygulamalarla Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2011.
26. Corne, D., Dorigo, M. ve Glover, F., New Ideas in Optimization, McGraw-Hill Book Co., Chapter 14, 217-279, US, 1999.
27. Robinson, J. ve Rahmat-Samii, Y., Particle Swarm Optimization in Electromagnetics, IEEE Transactions Antennas Propagation, 52, 2 (2004) 397–407.
28. Shi, Y. ve Eberhart, R. C., Empirical Study of Particle Swarm Optimization, Proceedings 1999 Congress Evolutionary Computation, 3 (1999) 1945–1950.
29. Michalewicz, Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer Verlag, Heidelberg, New York, 1992.
30. Dianati, M., Song, I. ve Treiber, M., An Introduction to Genetic Algorithms and Evolution Strategies, University of Waterloo, Canada, 2004.
31. Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, US, 1989.
32. Vural, M., Genetik Algoritma Yönetimi ile Toplu Üretim Planlama, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
33. Chipperfield, A., Genetic Algorithms in Engineering Systems, Zalzala, A. M. S. ve Fleming, P. J., London, 1997.
34. Iba, K., Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm. IEEE Transactions Power Systems, 9, 2 (1994) 685–692.
35. Genel, H., Genetik Algoritmalarla Portföy Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2004.
36. Pulikanti, S. R., Konstantinou, G. ve Agelidis, V. G., Hybrid Seven-Level Cascaded Active Neutral-Point-Clamped-Based Multilevel Converter Under SHE-PWM. IEEE Transactions Industrial Electronics, 60, 11 (2013) 4794-4804.
37. Pulikanti, S. R. ve Agelidis, V. G., Five-Level Active NPC Converter Topology: SHE-PWM Control and Operation Principles, Australasian in Power Engineering Conference Universities (AUPEC), December 2007, Perth, WA, 1-5.
38. Ebrahimi, A., Farokhnia, N. ve Fathi, S. H., A Hybrid Approach for Solving Nonlinear Equations of SHEPWM in Multilevel Inverters, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, (2012) 1962–1967.

39. Bhagwat, P. M. ve Stefanovic, V. R., Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter, IEEE Transactions Industry Applications, IA-19, 6 (1983) 1057-1069.
40. Khoukha, I., Hachemi, C. ve El Madjid, B., Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in the Nine Level Voltage Inverter, International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES), November 2007, Cairo, Egypt, 387-392.
41. Liqiao, W. ve Yong, W., Multilevel Current Source Converter Based on SHEPWM, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), October 2008, Wuhan, China, 1905-1908.
42. Li, L., Czarkowski, D., Liu, Y. ve Pillay, P., Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in Series-Connected Voltage Inverters, Industry Applications Conference Thirty-Third IAS Annual Meeting the IEEE, 2 (1998) 1454-1461.
43. Debnath, S. ve Ray, R. N., Harmonic Elimination in Multilevel Inverter Using GA and PSO: A Comparison, IEEE Students' Conference on Electrical Electronics and Computer Science (SCEECS), (2012) 1-5.
44. Haiwen, L., Tolbert, L. M., Khomfoi, S., Ozpineci, B. ve Zhong, D., Hybrid Cascaded Multilevel Inverter with PWM Control Method, 39th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC'08), June 2008, Greece, 162-166.
45. Rashid, M. H., Güç Elektroniği Yarı İletken Elemanlar, Devreler ve Uygulamaları, Sunter, S. ve Aydemir, M. T., 4. Basımdan Çeviri, 283-306, Nobel Yayın Evi, Ankara, 2015
46. Ozpineci, B., Tolbert, L. M., Chiasson, J. N., Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithms, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), June 2004, Aachen, Germany, 3911-3916.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve ortaokulu Evren Paşa İlköğretim Okulu, lise öğrenimini Özel Yavuz Selim Koleji'nde tamamladı. 2006 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans programına başladı ve 2011 yılında bu bölümden mezun oldu. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014 yılı Nisan ayından itibaren Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.