

**BULANIK SİNİRSEL DENETİMLİ ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Necmi ALTIN

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2009

ANKARA

Necmi ALTIN tarafından hazırlanan BULANIK SİNİRSEL DENETİMLİ ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA
Tez Danışmanı, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Güngör BAL
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Ömer Faruk BAY
Elektronik Bilgisayara Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Hamit ERDEM
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Başkent Üniversitesi

Tarih: 26 / 06 / 2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Necmi ALTIN

**BULANIK SİNİRSEL DENETİMLİ ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ
(Doktora Tezi)**

Necmi ALTIN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2009**

ÖZET

Bu çalışmada, rüzgâr, güneş yakıt hücreleri gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisinin şebekeye aktarılabilmesi amacıyla şebeke etkileşimli çalışabilen bir fazlı bir evirici tasarlanmış, benzetim ve uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilirken, uygulama çalışmalarında DS1104 dSPACE denetleyici kartı kullanılmıştır. Evirici, gerilim kaynaklı olup, çıkışında hat frekanslı transformatör ve LCL filtre bulunmaktadır. Evirici, faz hatalarına karşı duyarlılığın azaltılması için akım denetimli olarak tasarlanmış ve akım denetleyicisi olarak bulanık sinirsel denetleyici kullanılmıştır. Evirici çıkış akımını denetleyecek olan bulanık mantık denetleyicinin üyelik fonksiyonları ve kural tabanı yapay sinir ağları kullanılarak belirlenmiştir. Karşılaştırma imkânının sağlanması amacıyla benzetimi gerçekleştirilen ve uygulanan devre bulanık sinirsel denetleyicinin yanında bulanık-PI ve PI denetleyiciler ile de test edilmiştir. Benzetim ve uygulama çalışmalarından elde edilen sonuçlar arasında bir paralellik gözlemlenmiştir. Benzetim ve uygulama sonuçları bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli eviricinin şebekenin faz ve frekansı ile senkron çalıştığını, şebekeye transfer ettiği akımın sinusoidal ve harmonik seviyesinin de uluslararası standartlara uygun olduğunu göstermektedir. Ayrıca evirici referans değişimlerine karşı hızlı tepki göstermiştir.

Bilim Kodu : 703.3.012

Anahtar Kelimeler : Şebeke etkileşimli evirici, yenilenebilir enerji kaynakları, akım denetimi, bulanık sinirsel denetim, ANFIS

Sayfa Adedi : 180

Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF FUZZY NEURAL CONTROLLED GRID INTERACTIVE INVERTER

(Ph. D. Thesis)

Necmi ALTIN

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2009

ABSTRACT

In this study, a single phase inverter which can operate as grid interactive mode to transfer energy generated by renewable energy sources such as wind, solar, fuel cell was designed, and simulation and experimental studies were carried out. Simulation studies were implemented via MATLAB/Simulink and DS1104 dSPACE controller board was used in experimental studies. Inverter was voltage sourced and line frequency transformer and LCL filter were used at the output of the inverter. Inverter was designed as current controlled to minimize the sensitivity to phase errors and fuzzy-neural controller was used to control and shape the output current. Membership functions and the rule base of the fuzzy logic controller that controls the output current were determined by using artificial neural networks. System that simulated and implemented was tested with fuzzy-PI and PI controllers along with fuzzy-neural controller to provide the comparison opportunity between the results. There is a parallelism between the results obtained from simulation and experimental studies. Both simulation and experimental results showed that, fuzzy-neural controlled grid interactive inverter operates synchronously with the utility line phase and frequency; the output current that injected to the grid is in sinusoidal waveform and harmonic level of this current is compatible with the international standards. The results also showed that inverter has a fast response to the reference variations.

Science Code : 703.3.012

Key Words : Grid interactive inverter, renewable energy sources, current control, fuzzy-neural control, ANFIS

Page Number: 180

Adviser : Assist. Prof. Dr. İbrahim SEFA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve tecrübelerinden faydalandığım danışmanım Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA'ya, değerli görüş ve önerileriyle çalışmaya katkılar sağlayan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Güngör BAL ve Yrd. Doç. Dr. Hamit ERDEM'e, ayrıca çalışmalarımda yardımcı olan Öğr. Gör. Şaban ÖZDEMİR'e, manevi destekleriyle beni hep destekleyen eşime ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarına proje katkılarıyla maddi olarak destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına (07/2006-4 nolu proje) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	8
2.1. Güneş Enerjisi	9
2.2. Rüzgâr Enerjisi	13
2.3. Yakıt Hücreleri	16
2.4. Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları	20
2.5. Dağıtılmış Üretim	21
3. EVİRİCİLER VE ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİLER	24
3.1. Bir Fazlı Eviriciler	24
3.1.1. Yarım köprü evirici	25
3.1.2. Tam köprü eviriciler	26
3.2. Üç Fazlı Eviriciler	27
3.3. Gerilim Kaynaklı Eviriciler	27

Sayfa

3.4. Akım Kaynaklı Eviriciler	28
3.5. Eviriciler için DGM Üretimi	29
3.5.1. İki kutuplu DGM üretimi.....	30
3.5.2. Tek kutuplu DGM üretimi	32
3.6. Bir Fazlı Tam Köprü Eviricinin Doğrusallaştırılmış Matematiksel Modeli ..	34
3.7. Şebeke Etkileşimli Eviriciler	36
3.7.1. Şebeke etkileşimli bir eviricide bulunması gereken temel özellikler..	39
3.7.2. Şebeke etkileşimli eviricilerin uyması gereken uluslararası standartlar.....	46
3.7.3. Eviricilerin gelişimi	49
4. BULANIK MANTIK VE BULANIK SİNİRSEL DENETLEYİCİLER	61
4.1. Bulanık Mantık	62
4.2. Bulanık Mantık Denetleyiciler.....	65
4.2.1. Bulanıklaştırma ünitesi	67
4.2.2. Bilgi tabanı	67
4.2.3. Karar verme birimi	68
4.2.4. Durulaştırma birimi	71
4.3. Yapay Sinir Ağları	75
4.3.1. Yapay sinir ağı yapısı	76
4.3.3. Yapay sinir ağı mimarisi.....	82
4.3.3. Yapay sinir ağlarında öğrenme	84
4.3.4. Geri yayımlı öğrenme.....	86
4.4. Bulanık Sinirsel Denetleyiciler.....	92

Sayfa

4.4.1. Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi	93
4.4.2. ANFIS mimarisi	96
4.4.3. ANFIS için geri yayımlı öğrenme algoritması.....	100
5. BİR FAZLI ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ TASARIMI	103
5.1. Kontrol Donanımı	103
5.1.1. DS1104 kontrol kartı	103
5.1.2. Evirici güç devresi.....	105
5.1.3. IGBT sürücü devresi.....	106
5.1.4. LCL filtre tasarımı.....	109
5.1.5. Akım ve gerilim okuma devreleri	114
5.2. Kontrol Yazılımı	116
5.2.1. Faz kilitleme döngüsü.....	118
5.2.2. PI denetimli şebeke etkileşimli evirici.....	118
5.2.3. Bulanık mantık denetimli şebeke etkileşimli evirici	119
5.2.4. Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici	122
5.2.5. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici.....	129
6. BENZETİM VE UYGULAMA SONUÇLARI	137
6.1. PI Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici	137
6.1.1. Benzetim sonuçları	137
6.1.2. Uygulama sonuçları.....	139
6.2. Bulanık Mantık Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici.....	143
6.2.1. Benzetim sonuçları	143

Sayfa

6.3. Bulanık PI Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici	146
6.3.1. Benzetim sonuçları	146
6.3.2. Uygulama sonuçları.....	151
6.4. Bulanık Sinirsel Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici	154
6.4.1. Benzetim sonuçları	154
6.4.2. Uygulama sonuçları.....	159
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	165
KAYNAKLAR.....	168
ÖZGEÇMİŞ.....	182

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli.....	11
Çizelge 2.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı.....	12
Çizelge 2.3. Rüzgâr enerjisi teknolojilerinin gelişimi	14
Çizelge 2.4. Ticari ürüne dönüşen ve günümüzde hala gelişmekte olan dağıtılmış üretim teknolojileri.....	23
Çizelge 3.1. Şebeke etkileşimli sistemler ile ilgili belli başlı standartların özeti	47
Çizelge 3.2. IEEE 929 standartlarına göre şebekeden ayrılma durumları ve zamanları	48
Çizelge 3.3. Evirici topolojilerinin özellikleri.....	60
Çizelge 4.1. Kural tablosu	68
Çizelge 4.2. Toplama fonksiyonları.....	78
Çizelge 5.1. Bulanık mantık denetleyici kural tabanı	123
Çizelge 5.2. K_P kazancı için kullanılan kural tablosu.....	126
Çizelge 5.3. K_I kazancı için kullanılan kural tablosu	127
Çizelge 5.4. Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici uygulamasında kullanılan kural tabanı	129
Çizelge 5.5. ANFIS'in eğitiminde kullanılan veri seti	132
Çizelge 5.6. ANFIS'in testinde kullanılan veri seti.....	132
Çizelge 7.1. Benzetim ve uygulama sonuçları	167

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. FV modül.....	9
Şekil 2.2. Tipik bir değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi.....	16
Şekil 2.3. Yakıt hücresi sitemi.....	18
Şekil 2.4. Yakıt hücresinin kararlı durum V-I karakteristiği	18
Şekil 2.5. Değişik akış oranlarında V-I karakteristiği	20
Şekil 2.6. Dağıtılmış üretim tabanlı enerji üretimi	22
Şekil 3.1. Bir fazlı sinüsoidal DGM evirici.....	25
Şekil 3.2. Yarım köprü evirici	25
Şekil 3.3. Tam köprü evirici.....	26
Şekil 3.4. Üç fazlı evirici.....	27
Şekil 3.5. Bir fazlı gerilim kaynaklı evirici.....	28
Şekil 3.6. Bir fazlı akım kaynaklı evirici	29
Şekil 3.7. İki kutuplu darbe genişlik modülasyonu	31
Şekil 3.8. Tek kutuplu darbe genişlik modülasyonu.....	33
Şekil 3.9. Evirici modeli.....	35
Şekil 3.10. Sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu anahtarlama eviricinin doğrusallaştırılmış matematiksel modeli	37
Şekil 3.11. Ada modu çalışan evirici yapısı.....	37
Şekil 3.12. Şebeke etkileşimli çalışan evirici yapısı.....	39
Şekil 3.13. FV panel maksimum güç eğrisi	40
Şekil 3.14. a)Tek aşamalı güç işleme b)İki aşamalı güç işleme.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. Transformatörlü evirici örnekleri a) Şebeke ile evirici arasına hat frekanslı transformatör (HFT) bağlı b) YF link şebeke etkileşimli AA-AA eviriciye bütünleşik yüksek frekanslı transformatör (YFT) c) DA-DA güç dönüştürücüsüne gömülü YFT	41
Şekil 3.16. İki durumlu evirici blok diyagramı	45
Şekil 3.17. Üç fazlı FKD yapısı.....	46
Şekil 3.18. Eviricilerin tarihi gelişimi.....	50
Şekil 3.19. FV eviricilere tarihsel bakış a) Geçmişte kullanılan merkezi teknolojisi b) Günümüzde kullanılan dizi teknolojisi c) Günümüzdeki ve gelecekteki AA modül ve AA hücre teknolojileri.....	51
Şekil 3.20. Günümüz evirici topolojileri a) Birden çok güç dönüşüm ünitesi ve yüksek frekanslı transformatör kullanılan evirici b) Hat frekanslı transformatörlü evirici c) Nötr noktası bağlantılı evirici d) Transformatörsüz alçaltıcı evirici e) Flying bobinli evirici f) Birden çok güç dönüşüm üniteli transformatörsüz evirici	53
Şekil 3.21. Takım kavramı	55
Şekil 3.22. Günümüzdeki ve gelecekteki çok dizili evirici teknolojisi	56
Şekil 3.23. HERIC evirici	57
Şekil 3.24. Cuk, Zeta ve D2 güç dönüştürücülü topolojiler.....	58
Şekil 3.25. Şaseye göre FV geriliminin sabit kalmasını sağlayan topoloji.....	59
Şekil 4.1. Boy uzunlukları klasik kümeleri.....	62
Şekil 4.2. Boy uzunlukları bulanık kümeleri.....	62
Şekil 4.3. Örnek üyelik fonksiyonu eğrisi.....	63
Şekil 4.4. En çok kullanılan üyelik fonksiyonları a) S üyelik fonksiyonu b) Üçgen üyelik fonksiyonu c) Yamuk üyelik fonksiyonu d) π üyelik fonksiyonu	64
Şekil 4.5. 7 Etiketli üyelik fonksiyonu.....	65
Şekil 4.6. BMD temel yapısı	66

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7.Max-Dot çıkarım.....	69
Şekil 4.8. Min-Max çıkarım yöntemi.....	70
Şekil 4.9. Tsukumato çıkarım yöntemi	71
Şekil 4.10. Takagi-Sugeno çıkarım	72
Şekil 4.11. Maksimum üyelik yöntemi	73
Şekil 4.12. Ağırlık merkezi yöntemi.....	73
Şekil 4.13. Ağırlık ortalaması yöntemi	74
Şekil 4.14. Mean-Max üyelik yöntemi	75
Şekil 4.15. Yapay sinir hücresi.....	77
Şekil 4.16. a) Sigmoid etkinlik fonksiyonu b) Tanjant hiperbolik etkinlik fonksiyonu.....	79
Şekil 4.17. Diğer etkinlik fonksiyonları.....	81
Şekil 4.18. İleri beslemeli ağ mimarisi	83
Şekil 4.19. Hopfield ağı	84
Şekil 4.20. İki katmanlı sinir ağının şematik gösterimi	86
Şekil 4.21. İki katmanlı bir çıkışlı sinir ağı yapısı.....	88
Şekil 4.22. Uyarlamalı ağ yapısı.....	94
Şekil 4.23. Takagi-Sugeno çıkarım yöntemi kullanan iki girişli bir çıkışlı ANFIS yapısı.....	97
Şekil 5.1. DS1104'ün mimarisi ve fonksiyon birimleri.....	104
Şekil 5.2. M57962CL'nin blok diyagramı	108
Şekil 5.3. a)Denetleyicinin ürettiği gate sinyalleri b) Sürücü kartı tarafından üretilen gate sinyalleri	109
Şekil 5.4. IGBT sürücü kartı	110

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. LCL filtre.....	112
Şekil 5.6. Tasarlanan filtrenin bode diyagramı	114
Şekil 5.7. a) Kart beslemelerinin üretilmesi, b) Şebeke ile evirici gerilimlerinin okunması için kullanılan devre	115
Şekil 5.8. Akım okuma devreleri.....	116
Şekil 5.9. Tüm sistem modeli.....	117
Şekil 5.10. Bir fazlı evirici blok diyagramı.....	117
Şekil 5.11. Bir fazlı FKD	118
Şekil 5.12. BMD girişleri olan hata ve hatanın türevi için belirlenen üyelik fonksiyonları	121
Şekil 5.13. BMD çıkışı görev oranındaki değişim için belirlenen üyelik fonksiyonları	122
Şekil 5.14. İki giriş-iki çıkışlı BMD	124
Şekil 5.15. (a)Hata ve (b)Hatanın değişimi girişleri için üyelik fonksiyonları	125
Şekil 5.16. (a) K_P ve (b) K_I çıkışları için belirlenen üyelik fonksiyonları	126
Şekil 5.17. Bulanık mantık denetleyici yüzeyi.....	127
Şekil 5.18. Girişler için tanımlanan üyelik fonksiyonları	128
Şekil 5.19. Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları.....	128
Şekil 5.20. ANFIS kullanıcı arayüzü	133
Şekil 5.21. ANFIS'in hata (e) için belirlediği üyelik fonksiyonları	133
Şekil 5.22. ANFIS'in hatanın değişimi (de) için belirlediği üyelik fonksiyonları ...	134
Şekil 5.23. Sugeno tipi çıkarım metodunun işletimi.....	135
Şekil 5.24. ANFIS tarafından elde edilen 2 girişli 1 çıkışlı BMD	136
Şekil 5.25. ANFIS tarafından elde edilen 2 girişli 1 çıkışlı BMD yapısı	136

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1.Benzetimi yapılan PI denetimli şebeke etkileşimli evirici modeli.....	138
Şekil 6.2. Evirici akım referansı ve evirici akımı	139
Şekil 6.3. Şebeke gerilimi ve evirici akımı	140
Şekil 6.4. Evirici akım harmonikleri.....	140
Şekil 6.5. Şebeke etkileşimli evirici uygulamasında kullanılan model	141
Şekil 6.6. Şebeke etkileşimli evirici uygulaması için ControlDesk programında tasarlanan arayüz	142
Şekil 6.7. Şebeke etkileşimli evirici çıkış akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 1).....	142
Şekil 6.8. (a)Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri (b) Evirici akım gerilim dalga şekli, güç ve güç katsayısı değerleri	143
Şekil 6.9. Bulanık mantık denetimli şebeke etkileşimli evirici Simulink modeli	144
Şekil 6.10. Evirici akım referansı ve akımı.....	145
Şekil 6.11. Evirici akımı ve şebeke gerilimi	146
Şekil 6.12. Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri	146
Şekil 6.13. Bulanık-PI denetimli şebeke etkileşimli evirici Simulink modeli	147
Şekil 6.14. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.....	148
Şekil 6.15. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.....	149
Şekil 6.16. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.....	149
Şekil 6.17. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.....	150
Şekil 6.18. Evirici çıkış akımı harmonikleri	150
Şekil 6.19. Evirici çıkış akımı ve şebeke gerilimi	151
Şekil 6.20. Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici dSPACE modeli.....	152

Şekil	Sayfa
Şekil 6.21. Şebeke etkileşimli evirici çıkış akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2).....	153
Şekil 6.22. (a)Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri (b) Evirici akım gerilim dalga şekli, güç ve güç katsayısı değerleri.....	154
Şekil 6.23. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici Simulink modeli..	155
Şekil 6.24. Evirici akım referansı ve evirici akımı	156
Şekil 6.25. Evirici akım referansı ve evirici akımı	157
Şekil 6.26. Evirici akım referansı ve evirici akımı	157
Şekil 6.27. Evirici akım referansı ve evirici akımı	158
Şekil 6.28. Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri	158
Şekil 6.29. Şebeke gerilimi ve evirici çıkış akımı	159
Şekil 6.30. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici dSPACE modeli ..	160
Şekil 6.31. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)	161
Şekil 6.32. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)	161
Şekil 6.33. Akım referansı azaltıldığında bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımının değişimi (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)	162
Şekil 6.34. Akım referansı artırıldığında bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımının değişimi (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)	162
Şekil 6.35. Akım referansı azaltıldığında bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımının değişimi (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)	163
Şekil 6.36. a)Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri b) Güç ve güç faktörü değerleri.....	164

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Evirici devresi	106
Resim 5.2. Doğrultucu devresi	107
Resim 5.3. IGBT sürücü kartı	107
Resim 5.4. Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici deney düzeneği.....	111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
C	Kondansatör kapasitesi (Farad)
C_f	Filtre kondansatörü (Farad)
cd	Çıkış sinyalinin değişimi
$ce(t)$	Hata sinyalinin değişimi
C_{REF}	Eşdeğer kapasite (Farad)
$d(u)$	Sayısal çıkış değeri
$e(t)$	Hata sinyali
f	Frekans (Hertz)
f_g	Şebeke gerilimi frekansı (Hertz)
f_r	Filtre rezonans frekansı (Hertz)
f_{REF}	Eşdeğer frekans değeri (Hertz)
I	Akım (Amper)
I_{inv}	Evirici çıkış akımı (Amper)
i_{REF}	Referans akım (Amper)
i_e	Akım hatası (Amper)
i_{ce}	Akım hatasının değişimi (Amper)
K_i	İntegral kazancı
K_p	Oransal kazanç
L	Bobin endüktansı (Henry)
L_{REF}	Eşdeğer endüktans (Henry)
L_1	Evirici tarafı filtre bobini (Henry)
L_2	Şebeke tarafı filtre bobini (Henry)
$m_a(t)$	Modülasyon indeksi
R	Direnç (Ohm)
S_{REF}	Eşdeğer güç değeri (Watt)

Simgeler	Açıklama
t	Zaman (Saniye)
THD	Toplam harmonik bozulumu
U_{grid}	Şebeke gerilimi (Volt)
U_{inv}	Evirici çıkış gerilimi (Volt)
U_{REF}	Eşdeğer gerilim değeri (Volt)
V_{da}	Doğru gerilim(Volt)
V	Gerilim (Volt)
Z_{REF}	Eşdeğer empedans değeri (Ohm)
μ_A	A kümesi üyelik fonksiyonu
μ(x)	Bulanıklaştırılmış giriş değeri
μ(u)	Bulanık çıkış değeri

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif akım
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ADC	Analog dijital dönüştürücü
BMD	Bulanık mantık denetleyici
DA	Doğru akım
DAC	Dijital analog dönüştürücü
DGM	Darbe genişlik modülasyonu
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri
DSP	Sayısal işaret işlemci
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
FKD	Faz kilitleme döngüsü
FV	Fotovoltaik
Hz	Hertz
KGK	Kesintisiz güç kaynağı
kW	Kilowatt

Kısaltmalar	Açıklama
MGT	Maksimum güç takibi
MW	Mega watt
MHz	Mega hertz
PF	Güç faktörü
PI	Oransal-integral denetleyici
PID	Oransal-integral-türev denetleyici
USD	Amerikan doları
YEK	Yenilenebilir enerji kaynağı

1. GİRİŞ

Günümüzde fosil yakıtlar kullanarak elektrik üretmek enerji üretiminin ana kaynağıdır. Son 100 yılda dünyadaki enerji tüketimi üssel biçimde artmıştır. Bu artışın hızlanarak devam etmesi beklenmektedir. Dünyanın artan enerji ihtiyacının ekonomik, güvenli ve kirliliğe neden olmadan sağlanması oldukça güçtür. Klasik enerji kaynaklarının giderek azalması ve yakın zamanda tükeneceğinin bilinmesi ve son yıllarda çevreyi korumaya yönelik oluşan kamu bilinci nedeniyle yeni enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar önem kazanmıştır.

Bu araştırmalar sonucunda güneş, rüzgâr, hidrojen, biyogaz, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) tespit edilmiştir. YEK'ler ilk önce elektrik şebekesinin bulunmadığı uzak bölgelerde haberleşme vericileri, otoyol aydınlatması gibi uygulamalarda enerji kaynağı olarak incelenmişlerdir. Günümüzde bu kaynaklardan güç üreten teknolojiler büyük oranda geliştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde güneş, rüzgâr ve yakıt hücresi gibi kaynaklarının önemi artmıştır [Saha ve Sundarsingh; 1996; Barbosa ve ark., 1998; Beck, 2007].

Dünya üzerindeki yaşam için hayati önemi olan güneş enerjisi, güneş ışığını elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik (FV) hücreler (piller) yardımıyla elektrik üretiminde de kullanılabilir. Katkılı silikondan yapılan güneş hücrelerinin kullanılmasıyla güneş ışığından direkt olarak DA elektrik enerjisi üretilir. Farklı yenilenebilir enerji kaynakları arasından uzun ömürlü olmaları ve az bakım gerektirmeleri nedeniyle FV'ler yardımıyla dönüştürülen ve büyük bir potansiyele sahip olan güneş enerjisi teknolojisi endüstriyel, ticari ve evsel kullanıma uygundur [Li ve Wolfs, 2006].

Rüzgâr enerjisi de sonsuz, atık maddesi ve ham madde maliyeti olmayan bir YEK'tir. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Bu türbinler rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye ardında bünyelerinde bulundurdıkları generatörler yardımıyla elektrik enerjisine çevirmektedir. Rüzgâr türbinlerinde asenkron generatör, sabit mıknatıslı veya ayrı

uyartım sargılı senkron generatör gibi farklı generatörler kullanılmaktadır. Bu rüzgâr türbinleri birkaç yüz watt'dan birkaç megawatt'a kadar değişik güçler de üretilmektedir. Yüksek çalışma saatleri nedeniyle birkaç hareketli parçası bulunan küçük ve basit tasarımlı rüzgâr türbinleri büyük ve karmaşık olanlara göre daha güvenilir ve caziptir. Tüm dünyada yaklaşık 30000 türbin kurulu olup bunlar rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine çevirmektedir [Chompoo-inwai, 2005].

Yakıt pilleri ilk olarak 1839 yılında Sir. William Grove tarafından bulunmuş ve yaklaşık olarak 120 yıl ilgi görmeden kalmıştır. Ancak uzay programları çerçevesinde tekrar ele alınmış ve geliştirilmiştir [Blomen ve Mugerwa, 1993].

Farklı tipte imal edilebilen yakıt hücreleri kendilerine hidrojen sağlandığı sürece elektrik enerjisi, ısı ve saf su üretmektedir. Hidrojenin en belirgin ve en üstün özelliklerinden birisi de tabiat şartlarına bağlı olarak düzensiz elektrik üretimi yapan rüzgâr ve güneş gibi kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin elektroliz yolu ile hidrojene çevrilebilmesidir. Böylece istenildiğinde kullanılmak üzere depolanan hidrojen, petrol gibi satılabilen bir enerji kaynağına dönüştürebilmektedir. Yakıt hücreleri henüz güneş ve rüzgâr enerjisi kadar yaygınlaşmamış olsa da gelecek vaat eden bir enerji kaynağıdır. Özellikle ısı ve elektrik enerjisi üreten kombine sistemlerde verim önemli oranda arttırılmıştır [Rajashekara, 2005].

Bu kaynaklardan üretilen elektrik enerjisi önceleri elektrik şebekesinin bulunmadığı kırsal alanlardaki ihtiyacı karşılamak için kullanılmış olsa da günümüzde gerek evsel gerekse ticari uygulamalarda (özellikle dağıtılmış üretim uygulamalarında) kullanımları yaygınlaşmıştır.

Güneş pilleri ve yakıt hücreleri doğrudan DA gerilim üretirler. Şebekenin ve yüklerinin büyük kısmının AA güç talep etmesi nedeniyle üretilen gücün AA'ya dönüştürülmesi gereklidir. Bunun için eviriciler kullanılır. Rüzgâr türbinlerinde DA veya AA generatör kullanılabilmektedir. Ancak AA generatör kullanıldığı durumlarda dahi özellikle küçük ve orta güçlerde daha yüksek enerji dönüşüm verimi nedeniyle değişken hızlı çalışma tercih edilmektedir. Bu durumda da generatör

çıkışındaki AA gerilimin genliği ve frekansı rüzgâr hızı ile değişmektedir. Bu gerilimin şebekeye aktarılması veya yüklerin büyük bir kısmını beslemekte kullanılması mümkün değildir. Bu nedenle generatör çıkışı önce doğrultulur, sonra eviriciler yardımıyla sabit genlik ve frekanslı AA gerilime dönüştürülür.

Yenilenebilir enerji uygulamalarında ada modlu ve şebeke etkileşimli olmak üzere iki tip evirici kullanılmaktadır. Ada modlu olarak bilinen evirici sadece alıcıyı beslemektedir. Bu tip sistemlerde alıcının ihtiyacından fazla enerji üretiminin olması durumunda fazla enerjinin depolanabilmesi ve enerjinin sürekli kılınabilmesi için sistemin toplam maliyetini arttıran akü grupları kullanılır. Bu sistemin şebekeye bağlanması ve şebekeye güç aktarması mümkün değildir. Bunun için şebekeyle paralel çalışabilen ve şebeke etkileşimli adı verilen eviricilere ihtiyaç vardır. Bu tip eviriciler kontrol sisteminin zorluğu nedeniyle uzun süre kullanılamamış ve adı geçen enerji kaynakları ada modlu olarak ve sadece alıcıyı beslemek için kullanılmışlardır. Mikrodenetleyicilerde, sayısal işaret işlemcilerinde ve güç elektroniğindeki gelişmelerin de etkisi ile şebeke etkileşimli eviriciler üzerine yapılan çalışmaların sayısı hızlı biçimde artmaya başlamıştır.

Şebeke etkileşimli eviricinin kullanımı ile yenilenebilir kaynaklarından üretilen enerjinin kullanıcının enerji ihtiyacından fazla olması durumunda, fazla enerjinin şebekeye aktarılması ve enerji giderlerinin azalması hatta bir girdi sağlanması mümkün olabilmektedir.

Şebeke etkileşimli çalışan bir eviricinin şebekeye enjekte ettiği akım sinüsoidal dalga şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olmalıdır. Evirici çıkış akımı harmonikleri şebeke yöneticileri tarafından belirlenen (yada ulusal/uluslararası standartlarda belirtilen) şartlara uymalıdır.

İlk şebeke etkileşimli evirici uygulamaları YEK'in çalışma özellikleri ve karakteristikleri dikkate alınmadan motor sürücülerinde kullanılan eviriciler temel alınarak tasarlanmış eviriciler idi. Bunlar genellikle büyük güçlü olarak tasarlanmışlardır. Özellikle çok sayıda FV'lerin seri ve/veya paralel bağlanarak

oluşturulan YEK'ten elde edilen enerjinin şebekeye aktarılması için tasarlanan bu eviricilerin pek çok eksikliği bulunduğu 1990'lı yıllarda başlayan çalışmalar ile açığa çıkmıştır [Kjaer ve ark., 2002]. Aslında düşük maliyetli olan bu eviricilerin toplam maliyeti çıkış akım kalitesini arttırmak için kullanılan ek filtre devreleri nedeniyle artmaktaydı [Al-Nasseri ve H., Redfern, 2004].

YEK'lere olan ilginin ve bu kaynakların kullanımlarının artması ile fiyatlarında düşme eğilimi ortaya çıkmıştır. YEK'lerin fiyatlarının azalması eviricinin sistem maliyeti üzerinde olan etkisini arttırmış ve yeni, yüksek verimli ve düşük maliyetli evirici tasarımları üzerinde çalışmalar artmıştır [Kjaer ve ark., 2005]. Özellikle FV ile beslenen büyük güçlü eviricilerin kısıtlılıklarını azaltmak için yapılan çalışmalar Dizi, Çoklu Dizi, AA Modül gibi kavramların ortaya çıkmasını sağlamıştır [Maranda ve Mey, 1998; Myrzik ve Calais, 2003; Faiman ve ark., 2003].

Büyük güçlü tek bir evirici yerine 3, 4 veya daha fazla eviriciyi ana-uydu yöntemi ile birbirine bağlanması kullanılan yöntemlerden birisidir [Myrzik ve Calais, 2003]. Takım kavramı, evirici verimini arttırmak için dizi teknolojisi ile ana-uydu teknolojisini birleştirerek geliştirilen başka bir yöntemdir. Bu yöntemde FV sistemde birkaç dizi ile bir takım oluşturulmaktadır. Düşük ısıtım seviyelerinde sadece bir evirici devrede iken ısıtım arttıkça her eviricinin anma yüküne yakın bir yükte çalışmasına sağlayacak biçimde eviriciler devreye alınmaktadır. Böylece ayrı dizilerden oluşan sisteme göre daha verimli bir çalışma elde edilmiştir [Krampitz ve Kreutzman, 2002; Myrzik ve Calais, 2003].

Modüler sistem teknolojisi, merkezi eviricilerin dezavantajlarından kaçınmak için geliştirilen yöntemlerden birisidir. 500 W'dan küçük güçlerde tasarlanan AA modül, FV panelin bir elektrik aygıtında birleştirilmiş halidir. Tak-kullan özelliğe sahip bu sistemler yüksek verimleri nedeniyle ilgi çekmektedirler [Faiman ve ark., 2003; Krampitz ve Kreutzman, 2002; Calais ve Hinz, 1998]. Ancak düşük olan giriş gerilimlerini transformatör kullanmadan yükseltilmesinin zor ve pahalı olması bu yöntemin en önemli sınırlılıklarındandır. Bunun önüne geçmek için farklı güç dönüştürücülerin seri/paralel bağlantılarını içeren değişik bağlantı tipleri

geliştirilmiştir [Myrzik, 2001]. Ayrıca özellikle düşük yüklerde dahi yüksek verimli çalışmanın elde edilebilmesi için verimi yüksek güvenilir evirici konsepti (High Efficient Reliable Inverter Concept - HERIC) gibi topolojiler de geliştirilmiştir [Myrzik ve Calais, 2003].

Gerilim kaynaklı veya akım kaynaklı evirici yapıları şebeke etkileşimli evirici uygulamalarında en çok incelenen evirici yapılarından. Gerilim kaynaklı evirici uygulamaları daha fazla ilgi görmüş olmalarına karşın akım kaynaklı eviricilerin ters gerilimi bloke edebilme gibi üstün özellikleri nedeniyle ilgi çekmektedirler [Hirachi ve Tomokuni, 1997]. Ashari ve arkadaşları tarafından gerilim kaynaklı şebeke etkileşimli eviricilerin kararlı durum analizi sunulmuştur [Ashari ve ark., 2001]. Günümüzde özellikle 10kW ve daha yüksek güç uygulamalarında çok seviyeli eviricilerde incelenmektedir [Baker ve ark., 1997].

Zhang ve arkadaşları tarafından FV uygulamaları için maksimum güç noktasını da izleyebilen bir fazlı şebeke etkileşimli evirici sunulmuştur. Sunulan sistem gerilim kaynaklı evirici, LC hat filtresi ve hat frekanslı transformatörden oluşmaktadır. Bu çalışmada şebeke gerilimi ve yük akımının ileri beslemeli denetimi kullanılarak eviricinin dinamik performansı iyileştirilmiştir [Zhang ve ark., 2006]. Calais ve arkadaşları tarafından yine FV uygulamaları için transformatörsüz çok seviyeli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici sunulmuştur [Calais ve ark., 2001]. Başka bir çalışmada beş seviyeli bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin benzetimi gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur [Baker ve ark., 1998]. Khan ve arkadaşları yakıt hücrelerinden beslenen bir fazlı şebeke etkileşimli evirici tanıtmışlardır. Sistem tam köprü DA-DA dönüştürücü ve gerilim kaynaklı eviriciden oluşmaktadır. Şebeke ile izolasyon DA-DA dönüştürücü bünyesindeki yüksek frekanslı bir transformatör ile sağlanmıştır [Khan ve ark., 2005]. Başka bir çalışmada üç güç işleme aşamasından (akım beslemeli push-pull dönüştürücü, buck dönüştürücü ve akım kaynaklı evirici) oluşan FV ile beslenen bir fazlı şebeke etkileşimli evirici önerilmiştir. Şebeke ile izolasyon push-pull dönüştürücü bünyesindeki yüksek frekanslı transformatör ile sağlanmıştır [Martins ve ark., 2000]. Ayrıca üçten daha fazla güç işleme aşaması barındıran evirici çözümleri de önerilmiştir [Terai ve ark., 2002]. Başka bir çalışmada, yakıt

hücresi ve FV'den oluşan hibrit bir sistem için üç fazlı bir evirici geliştirilmiştir. Evirici şebekeye aktif gücün yanında reaktif güçte aktarabilecek özellikte tasarlanmıştır [Reddy ve Agarvwal, 2007]. Saha ve arkadaşları FV ile beslenen düşük güçlü, düşük maliyetli yüksek verimli yeni bir evirici yapısı sunmuştur [Saha ve ark., 1998]. Ahmed ve arkadaşları tarafından FV sistemlerde kullanılan üç fazlı şebeke etkileşimli evirici uygulaması için yardımcı rezonans DA bağlantı söndürücü (snubber) devresi, boost güç dönüştürücü ve dört anahtardan oluşan bir sistem önerilmiştir [Ahmed ve ark., 2006]. Başka bir çalışmada yumuşak anahtarlama bir fazlı akım kaynaklı hat komütasyonlu şebeke etkileşimli evirici tanıtılmıştır. Yumuşak anahtarlamanın gerçekleştirilebilmesi için yardımcı anahtarlar kullanılmıştır [Oishi ve ark., 2002]. Ayrıca iki durumlu çalışan eviricilerde iki durum arasında (şebeke etkileşimli çalışma modundan ada moduna veya tersi) en uygun geçişin sağlanması için çeşitli yöntemler önerilmiştir [Kim ve ark., 2008; Tirumala ve ark., 2002; Yao ve ark., 2006].

Anılan çalışmalar genellikle yeni evirici yapıları ile ilgilidir ve genellikle doğrusal denetleyiciler veya histeresis akım kontrol yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca Li ve arkadaşları tarafından kaskat bağlı çok seviyeli eviriciler için kondansatör gerilimin dengelenmesini temel alan bir yöntem de sunulmuştur [Li ve ark., 2007]. Eviricinin kontrolüne yönelik yeni yaklaşım sayısı oldukça azdır. Uemura ve Yokoyoma, bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin denetiminde deadbeat denetim yöntemini uygulamıştır [Uemura ve Yokoyoma, 2003; Komiyama ve ark., 2004]. Gu ve arkadaşları tarafından iki durumlu bir evirici sunulmuştur. Sunulan evirici şebeke var iken şebeke etkileşimli olarak çalışmakta ve evirici çıkış akımı üç seviyeli histeresis denetleyici ile denetlenmektedir. Şebeke kesildiğinde ise evirici ada modunda çalışmasına devam etmektedir. Ada modu çalışma durumunda evirici çıkış gerilimi bulanık mantık denetleyici ile denetlenmektedir [Gu ve ark., 2006].

Bu çalışmada YEK'lerden üretilen elektrik enerjisinin şebekeye aktarılabilmesi için bir fazlı şebeke etkileşimli bir evirici tasarlanmıştır. Eviricinin şebekeye enjekte ettiği akımın denetlenmesinde bulanık sinirsel denetim yöntemi kullanılmıştır. Böylece eviricinin doğrusal olmayan karakteristiğinden, şebekenin, YEK'in ve

eviricinin zamanla değişen parametrelerinden ve sistemin çalışma noktasının değişiminden etkilenmeyen yüksek performanslı bir denetim sağlanması amaçlanmıştır. Bulanık mantık denetleyicinin tasarımında deneme yanılma metodu kullanılması yerine bu amaçla hazırlanmış olan Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) kullanılmıştır. Böylece bulanık mantık denetleyicinin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları ve kural tabanı verilen bilgilere göre belirlenmiş, tasarım süreci kısaltılmış, üyelik fonksiyonlarının ve kuralların sayısı azaltılmış ve işlemciden daha yüksek performans alınması sağlanmıştır. Bütün analog sinyallerin okunması, PWM retimi gibi işlemler, bünyesinde TMS320F240 sayısal işaret işlemcisi bulunduran DS1104 dSPACE kontrol kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 2’de en yaygın YEK’ler, bunları genel prensipleri ile dağıtılmış üretim kavramı açıklanmıştır. Bölüm 3’de ise eviriciler ve şebeke etkileşimli eviriciler incelenmiştir. Bölüm 4’de bulanık mantık denetim, yapay sinir ağları ve sinirsel bulanık denetimin genel prensipleri açıklanmıştır. Bölüm 5’de bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin tasarımı ve Bölüm 6’da ise benzetim ve uygulama sonuçları verilmiştir. Bölüm 7’de ise farklı denetim teknikleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve genel bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca bu konuda yapılabilecek çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Yakın geçmişe kadar fosil yakıtlar kullanarak elektrik üretmek enerji üretiminin ana kaynağı idi. Ancak fosil yakıtlara dayanan klasik enerji kaynaklarının çevre kirliliğine neden olmakta ve ekosisteme zararlar vermektedir. Son 100 yılda dünyadaki enerji tüketimi üssel biçimde artmıştır. Bu artışın hızlanarak devam etmesi beklenmektedir. Bu yüksek miktardaki enerji ihtiyacını ekonomik, güvenli ve kirliliğe neden olmadan sağlamak oldukça güçtür. Klasik enerji kaynaklarının gitgide azalması ve yakın zamanda tükeneceğinin bilinmesi ve son yıllarda çevreyi korumaya yönelik oluşan kamu bilinci nedeniyle yeni enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar önem kazanmıştır. Klasik kaynakların dünya üzerinde eşit olarak dağılmaması nedeniyle ülkelerin ulusal kaynaklardan en üst düzeyde yararlanarak enerji arz güvenliğine en üst düzeye çıkarmak istemektedirler. Böylece hükümetler ve bilimsel komiteler de yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılması ve kullanılması konusunda çaba harcamaya başlamıştır.

Bu araştırmalar sonucunda güneş, rüzgâr, hidrojen, biogaz, jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları tespit edilmiştir. Yenilebilir enerji kaynakları ilk önce elektrik enerjisinin bulunmadığı uzak bölgelerde kullanılmak üzere incelenmişlerdir. Günümüzde bu kaynaklardan güç üreten teknolojiler büyük oranda geliştirilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde güneş, rüzgâr ve yakıt hücresi gibi kaynaklarının önemi artmıştır [Enslin, 1990].

Bugün dahi yenilenebilir enerji, fosil yakıtlara gerek duymadan enerji ihtiyacımızı karşılayabilme imkanını sunmaktadır. Örneğin en büyük enerji kaynağı olan güneşten her yıl dünya yüzeyine $3,9 \cdot 10^{24} J = 1,08 \cdot 10^{18} kWh$ enerji ulaşmaktadır. Bu dünyanın temel enerji ihtiyacının 10000 katına karşılık gelir ve bu şu andaki bütün enerji rezervlerinden daha fazladır. Buradan yeryüzüne ulaşan enerjinin bir kısmı kullanılabilse, insanoğlunun şu anki tüm enerji ihtiyacının karşılayacağı söylenebilir.

2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi, sonsuz ve yaygın bir kaynak oluşu, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi ve modüler yapısı sayesinde birkaç Watt'tan MegaWatt değerine kadar kolaylıkla tasarlanıp uygulanabilmesi gibi üstünleri ile öne çıkan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Güneş enerjisi, katkılı silikondan yapılan FV piller (hücreler) yardımıyla direkt olarak sessiz ve herhangi bir atık üretmeden elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Farklı yenilenebilir enerji kaynakları arasında uzun ömürlü olmaları ve az bakım gerektirmeleri nedeniyle FV hücrelerin büyük bir kullanım potansiyeli vardır. FV hücreler bir araya getirilerek modüller, modüller birleştirilerek de paneller üretilmektedir. Şekil 2.1'de FV paneller görülmektedir [Rashid, 2006].



Şekil 2.1. FV modül

Doğrudan DA gerilim üretebilen FV paneller, elektrikle çalışan uygun güç ve gerilimdeki her türlü alıcıyı doğrudan besleyebilir. Ancak, kW başına yatırım maliyeti klasik enerji kaynaklarından daha yüksek olan FV sistemler önceleri elektrik şebekesinin bulunmadığı yerlerde otoyolların aydınlatılması ve sinyalizasyonu, park ve bahçe aydınlatması, uzay uygulamaları, su pompaları ile ev ve küçük işyerleri gibi uygulamalarda tercih edilmiştir. Sistem, gün boyunca güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürerek alıcıları beslemekte, üretilen enerjinin ihtiyaçtan fazla olması

durumunda güneş ışığının olmadığı anlarda kullanılmak üzere bu fazla enerjiyi sistemde bulunan akü gruplarında depolamaktadır. Günümüzde FV panel teknolojisinin ilerlemesi, güç elektroniği ve mikroişlemciler alanlarında yaşanan gelişmeler ile birlikte bu tip uygulamaların yanı sıra şebeke ile paralel çalışan veya şebekeye doğrudan enerji aktarabilen sistemlerde geliştirilmeye başlanmıştır. Bu tip uygulama örnekleri gün geçtikçe çoğalmaktadır. Güç kapasiteleri ise MW değerlerine ulaşmış olup, birçok ülkede şebeke etkileşimli FV enerji üretim merkezleri kurulmaya başlanılmış ve güneş, elektrik üretiminde kullanılan önemli bir kaynak olarak kullanılır hale gelmiştir.

FV panellerden üretilen enerjinin kW başına maliyeti su, petrol ve kömür gibi klasik kaynaklara göre daha yüksek olsa da gerek teknolojik gelişmeler gerekse FV panel üretiminin üssel biçimde artışı ile arada fark her geçen gün azalmaktadır. Maliyetin yüksek olması FV sistemlerde yatırımdan en fazla yarar sağlamaya yönelik olarak çalışmaların yapılmasına neden olmuştur. Bu alanda yapılan çalışmalar FV modül veriminin ve toplam verimi etkileyen en önemli etken olan sistemde kullanılan güç elektroniği dönüştürücülerinin verimlerinin yükseltilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Çeşitli üretim tekniklerinde ve değişik maddelerden üretilen FV panellerin verimleri her geçen gün daha da artarak günümüzde %21'e optik yoğunlaştırıcılar kullanıldığında ise %35'e kadar ulaşmıştır [Dimroth ve ark., 2005; Mulligan ve ark., 2004]. Güç elektroniği dönüştürücülerinin verimlerinin artırılması içinde pek çok farklı evirici ve DA-DA dönüştürücü topolojisi geliştirilmiştir.

FV panellerin verimleri hava şartlarına ve çalışma noktasına göre değişmekte ve her koşulda en yüksek verimin sağlandığı bir çalışma noktası bulunmaktadır. Bu nedenle güneşten alınan enerjiyi alıcı sisteme aktaracak güç dönüştürücüsü yapısının seçilmesi ve dönüştürücünün denetimi FV panelin verim özelliğine göre düzenlenmesi ve sistemin çalışma noktası o andaki şartlara göre en yüksek verimi sağlayacak biçimde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla maksimum güç noktasını takip eden güç dönüştürücüleri geliştirilmiştir.

FV sistemlerin çıkış güçleri ışı nım şiddeti ve güneşlenme sürelerine bağlıdır. Dolayısıyla FV sistemler kurulurken bölgenin ışı nım şiddeti ve güneşlenme süreleri dikkate alınmalıdır. Ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli, coğrafi konumu nedeniyle oldukça elverişlidir [EİE, 2007].

1966-1982 yılları arasında Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından toplanan güneşlenme süresi ve ışı nım şiddeti verileri kullanılarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışı nım şiddeti de 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olarak tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Çizelge 2.1'de verilmiştir [EİE, 2002].

Çizelge 2.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli

Aylar	Aylık toplam güneş enerjisi		Güneşlen. süresi
	Kcal/cm2-ay	kWh/m2-ay	(Saat/ay)
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,51	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308 cal/cm2-gün	3,6 kWh/m2-gün	7,2 saat/gün

DMİ ile EİE'nin yaptığı araştırmaları başta Güney Doğu Anadolu ve Akdeniz Bölgeleri olmak üzere ülkemizin fotovolatik (FV) uygulamalarına elverişli olduğunu göstermektedir [EİE, 2007]. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Ancak, bu değerlerin, Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. 1992 yılından bu yana EİE ve DMİ, güneş enerjisi değerlerinin daha sağlıklı olarak ölçülmesi amacıyla enerji amaçlı güneş enerjisi ölçümleri almaktadırlar. Devam etmekte olan ölçüm çalışmalarının sonucunda, Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin eski değerlerden %20-25 daha fazla çıkması beklenmektedir [EİE, 2007].

Çizelge 2.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m ² -yıl)	Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)
G. D. Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Ülkemizde halen Telekom istasyonları, Orman Genel Müdürlüğü yangın gözetleme istasyonları, deniz fenerleri ve otoyolların aydınlatma ve trafik işaretlerinde kullanılan FV kurulu gücü 300 kW civarındadır [EİE, 2007].

2.2. Rüzgâr Enerjisi

Tahıl öğütme, su pompalamak ve mekanik güç elde etmek için en az 3000 bin yıldır yararlanılan rüzgâr enerjisine verilen önem son yıllarda hızla artmaktadır. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretmek için ilk olarak 20. yüzyılın başlarında kullanılmış ve kullanılan teknolojiler 1970'lere kadar adım adım gelişmiştir. 1974'deki petrol krizi rüzgâr enerjisine olan ilgiyi arttırmış ve 1990'lı yılların başlarından itibaren rüzgâr enerjisi sürdürülebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri haline gelmiştir. Geçtiğimiz on yıl içinde dünya üzerindeki kurulu gücü her yıl %30 oranında artan rüzgâr enerjisinden elektrik üreten sistemler, fosil ve nükleer yakıtlara göre yaygın, yenilenebilir ve çevre dostu bir kaynak oluşunun yanında son yıllardaki gelişmeler ile birlikte artık ekonomik olarak da rekabet edebilen önemli bir enerji kaynağı haline gelmiştir [Gipe, 2002; Jujawa, 2003]. Şu an dünya üzerinde kurulu olan rüzgâr enerjisi kapasitesinin %83'ü beş ülke (Almanya, ABD, Danimarka, Hindistan, İspanya) tarafından kurulmuştur [Ackermann, 2005].

Günümüzde birkaç kW'dan MW mertebesine kadar güçlerde çeşitli yapılarda rüzgâr türbinleri üretilebilmektedir. Rüzar enerjisi sistemlerinin gelişmesini sağlayan önemli faktörler şunlardır:

- Yüksek dayanımlı kompozit malzemeler ile büyük boyutlarda ve düşük maliyetli kanatların üretilmesi
- Maksimum güç üretimi için generatörlerin değişken hızlı çalıştırılması
- Güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler
- Sistem çalışması ve veriminin iyileştirilmesi
- Bilgisayarlar yardımıyla sistemlerin doğru modellenmesi ve benzetimi

Çizelge 2.3'de 30m kule yüksekliği ve 7m/s rüzgâr hızı için rüzgâr türbinleri ile ilgili bazı veriler sunulmuştur. Türbin tasarımında elde edilen gelişmeler ile 1980'de 35 sent olan kWh başına enerji üretim maliyeti uygun rüzgâr rejimine sahip bölgelerde 1999'da 5 sentin altına düşmüştür. Bu alanda çalışmalar her geçen gün ilerlemekte ve

enerji maliyetinin 4 sentin altına düşmesi beklenmektedir [Rashid, 2006]. 1980'lerden itibaren dünya genelinde rüzgâr teknolojisinin yatırım maliyeti ile çalışma ve bakım maliyetleri %80 oranında azalmıştır. Görüldüğü gibi rüzgâr enerjisinden elektrik üreten sistemlerinin yatırım maliyeti, üretilen enerjinin kWh başına maliyeti gibi kriterlere göre en ucuz maliyetli enerji kaynaklarından biri haline dönüşerek klasik enerji kaynakları ile rekabet edebilecek özellik kazanmıştır [Wang ve Chang, 2004].

Çizelge 2.3. Rüzgâr enerjisi teknolojilerinin gelişimi

	1980	1999	Gelecek İçin Beklentiler
kWh başına enerjinin üretim maliyeti	0,35-0,40 \$	0,05-0,07 \$	<0,04 \$
kW başına kurulum maliyeti	2000-3000 \$	500-700 \$	<400 \$
Çalışma ömrü	5-7 yıl	20 yıl	30 yıl
Kapasite faktörü	%15	%25-30	>%30
Kullanıma hazır bulunma	%50-65	%95	>%95
Türbin kapasitesi	50-150 kW	300-1000 kW	500-2000 kW

Rüzgârdan enerji üreten sistemleri sabit hızlı ve değişken hızlı olarak ikiye ayırmak mümkündür. Sabit hızlı sistemlerde değişken kanat açılı ve sabit hızlı rüzgâr türbinleri ile sincap kafesli asenkron veya alan sargılı senkron generatörler kullanılarak elektrik şebekesine doğrudan enerji aktarılmaktadır. Sabit hızlı sistemlerde en yüksek enerji dönüşüm verimi sadece bir rüzgâr hızı değerinde elde edilebilmektedir.

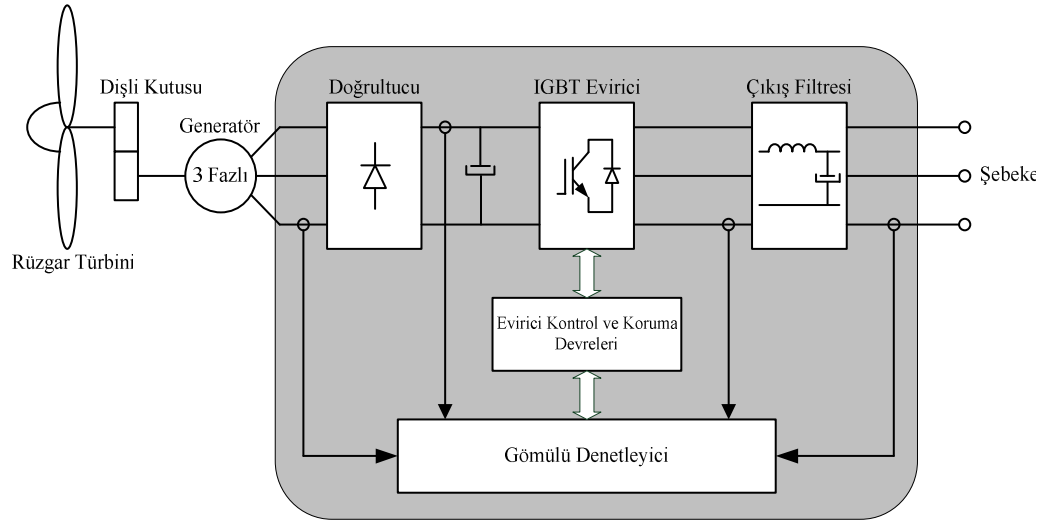
Değişken hızlı sistemlerde, sabit kanat açılı değişken hızlı rüzgâr türbinleri kullanılır. Bu uygulamalarda generatörün ürettiği frekansı ve genliği değişken AA güç, güç elektroniği dönüştürücüleri ile sabit genlik ve frekansta AA güce dönüştürülerek şebekeye aktarılmaktadır. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde maksimum enerji

dönüşüm verimi sadece bir rüzgâr hızı değerinde değil geniş bir rüzgâr hızı değer aralığında elde edilebilir. Güç elektroniği dönüştürücüleri, özellikle değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kontrolünde ve üretilen enerjinin şebekeye aktarılması esnasında çok önemli işlevleri yerine getirmektedirler. Bu nedenle güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler rüzgâr enerjisi teknolojilerinin ilerlemesi konusunda önemli bir rol oynamaktadır [Rashid, 2006]. İlk bakışta güç elektroniği dönüştürücüleri sistemin kuruluş maliyetini arttırdığı düşünülse de çalışma süreci göz önüne alındığında değişken hızlı sistemlerin sabit hızlı sistemlerden daha yüksek olan verimleri nedeniyle bu fark ortadan kalkmaktadır [Carlson ve ark., 1996; Ackerman, 2005]. Güç elektroniğinde yaşanan hızlı gelişmeler ile statik güç dönüştürücülerinin maliyetleri azalmakta ve buna karşın üretilibildikleri maksimum güç seviyeleri de artmaktadır. Rüzgâr enerjisi sistemlerine yönelik statik güç dönüştürücülerine ilişkin araştırmalara duyulan ihtiyaç artmaktadır.

Rüzgâr hızının büyük oranda değiştiği bir değişken hızlı rüzgâr türbini uygulamalarında enerji dönüşüm verimi büyük oranda statik güç dönüştürücülerinin yapısına ve denetim algoritmasına bağlıdır. Şekil 2.2’de tipik bir değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi görülmektedir. Dikey yada yatay eksenli, farklı kanat sayılarına sahip birkaç yüz Watt’dan MW değerlerine kadar farklı güçlerde pek çok rüzgâr türbini üretilmiştir.

Pek çok ticari rüzgâr türbininde bir dişli kutusu ile birlikte yüksek devir sayılı asenkron veya senkron generatörler kullanılmaktadır. Son yıllarda dişli kutusu olmaksızın kullanılan düşük hızlı senkron generatörler önem kazanmaktadır. Bu yapı dişli kutusu bakım gereksinimini ortadan kaldırdığı gibi gürültüyü ve maliyeti de azaltmaktadır [Wang ve Chang, 2004].

Şekil 2.2’de gruplanan bölüm fiziksel olarak tek parçadır ve güç elektroniği dönüştürücüsü olarak tanımlanır. Generatörün ürettiği 3 fazlı değişken genlik ve frekanstaki AA güç önce DA’ya dönüştürülmekte ve sonra evirici yardımıyla sabit genlik ve frekansta AA güce dönüştürülerek şebekeye aktarılmaktadır. Çıkış filtresi evirici çıkış akım ve gerilimindeki yüksek frekanslı harmonik bileşenleri süzmek için



Şekil 2.2. Tipik bir değişken hızlı rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi

kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan doğrultucu kontrollü veya kontrolsüz olabilir. Kontrolsüz doğrultucu basit olmasına karşın kontrollü doğrultucunun da yüksek rüzgâr hızı durumlarında DA bara gerilimini eviricinin çalışabileceği aralıkta tutabilme özelliği vardır.

Gerilim kaynaklı eviricilerde DA bağlantıda kondansatör kullanılır. Uygulamanın tipine göre enerji depo edebilen akü grupları veya döner tekerler (flying wheel) de DA baraya bağlanabilir.

DA-AA dönüşüm için kullanılan eviricide yarı iletken anahtar olarak Tristör, GTO, MOSFET veya IGBT gibi farklı elemanlar kullanılabilir de orta ve yüksek güçler için sinüsoidal çıkışlı eviricilerde en çok IGBT'ler tercih edilmektedir.

2.3. Yakıt Hücreleri

En genel tanımı ile elektrokimyasal enerji dönüşüm cihazlarıdır. Bir yakıt hücresi kendi içerisinde hidrojen ve oksijeni suya dönüştürürken bu reaksiyon sonucu DA elektrik akımı üretilir. Hidrojenden elektrik enerjisi üreten yakıt hücreleri, enerji üretimi için kullanılan fosil yakıtların yakın zamanda tükenecek oluşu ve yüksek

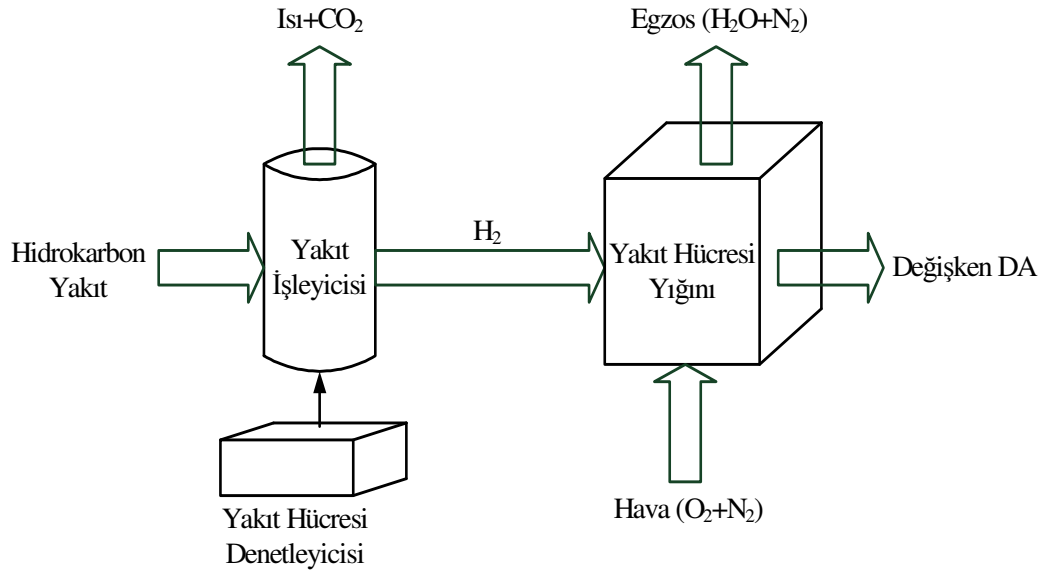
yayımları nedeniyle çevreye verdikleri zararlar gibi problemlerin etkilerini azaltmak için araştırılan yenilenebilir enerji kaynaklarının en hızlı gelişenlerinden birisidir [Şahin ve ark., 2009].

Yakıt hücrelerinin temel yakıtı doğada bol olarak bulunan hidrojen elementidir. Ancak hidrojen doğada saf olarak bulunmaz diğer elementlerle bileşik halinde bulunur. Yakıt pilleri sistem itibarı ile bir akü bataryasına, çalışma prensibi ile de içten yanmalı motorlara benzer. Akü bataryası gibi kutuplarından elektrik enerjisi alınmasına rağmen bu enerjiyi akü bataryası gibi depolanmış olan enerjiden değil ürettiği enerjiden verir. Enerjiyi kendine hidrojen sağlandığı sürece verir.

Yakıt pilinin akım şiddeti plaka yüzeyine bağlıdır. Çıkış gerilimleri ise düşük seviyededir ve genellikle istenilen gerilim seviyelerinin elde edilebilmesi için plakalar seri bağlanırlar. Birçok plakanın yan yana bağlanması ile elde edilen sisteme “yığın” (stack) adı verilir. Uzay programları çerçevesinde geliştirilen yakıt pillerine en büyük talep otomotiv sektöründen gelmiştir. Bu uygulamalarda süratle mesafe kat edilmiş ortalama olarak tüm üretici firmalar prototiplerini bitirmiş ve seri üretim aşamasına gelmişlerdir. Bundan başka yakıt pilleri cep telefonundan bilgisayara, bisikletten toplu taşıma araçlarına, gemilerden uçaklara, iş merkezlerinden konutlara kadar birçok alanda kullanım imkânı bulmuştur. Yakıt pillerinin konutlarda kullanımı ile elektrik kesintilerinden etkilenilmemesi, konutun elektrik ihtiyacının yanında ısıtma ve sıcak su ihtiyacının da ekonomik olarak karşılanması gibi birçok avantajı da beraberinde getirmektedir [Sperling ve Cannon, 2004]

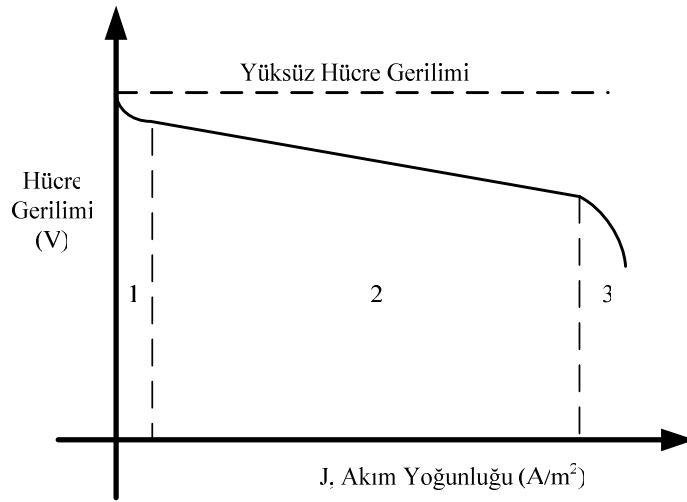
Tipik bir yakıt hücresi sitemi Şekil 2.3’de görülmektedir. Sistemde bulunan yakıt işleyicisi hidrokarbon yakıttan hidrojeni elde etmektedir. Yakıt hücresi denetleyicisi, yakıt işleyicisini dolayısıyla hidrojen üretimini denetlemektedir.

Yakıt işleyicisi tarafından üretilen hidrojen yakıt hücresi yığına gönderilir. Yığın kurşun asitli aküler gibi birçok elektrot içermektedir. Yığın içerisinde hidrojen ile dışarıdan alınan hava arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşir ve elektrik enerjisi ile su üretilir.



Şekil 2.3. Yakıt hücresi sistemi

Yakıt hücresinin çıkış gücü hidrojenin akış hızına bağlıdır. Hidrojenin akış hızı arttıkça yakıt hücresi çıkış gücünde artmaktadır. Şekil 2.4'de sabit hidrojen akış hızı için yakıt hücresinin kararlı durum V-I eğrisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi karakteristik üç farklı bölgeden oluşmaktadır.



Şekil 2.4. Yakıt hücresinin kararlı durum V-I karakteristiği

Şekilde gösterilen birinci bölge Reaksiyon Oran Kaybı Bölgesi veya Aktivasyon Bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgede V-I karakteristiği doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Hidrojen kullanımı çok yavaştır (genellikle %20'den az) ve yığına pompalanan hidrojenin büyük kısmı egzozdan atılmaktadır. Bu nedenle bu bölgede yakıt hücresinin toplam verimi çok düşüktür.

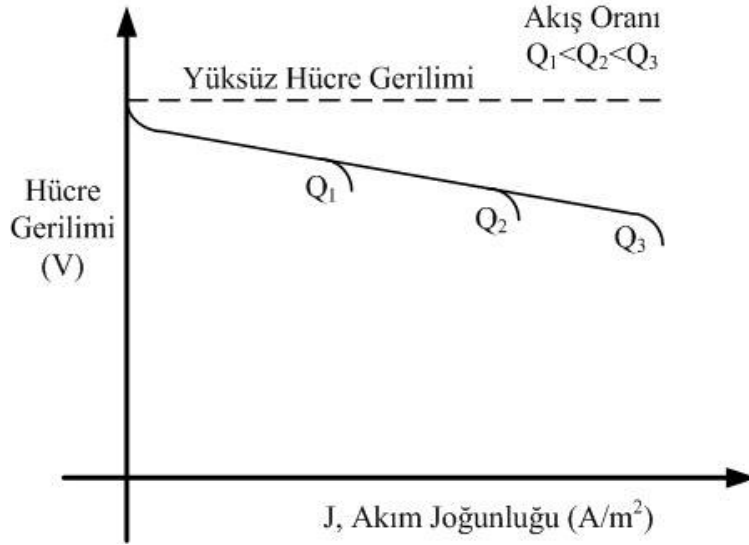
2. bölge Omik Bölge olarak adlandırılır. Bu bölgede V-I karakteristiği hidrojen kullanımına bağlı olarak değişen oranda doğrusaldır. Hidrojen kullanımı bu bölgenin başlangıcında %20 civarında iken, eğrinin sağ tarafına doğru hidrojen kullanımı %80 civarına kadar yükselmektedir. Bu bölge, çalışma noktası çekilen güce bağlı olarak değişse de yakıt hücresinin çalışma bölgesidir.

Gaz İletim Kaybı veya Toplanma Bölgesi olarak adlandırılan 3. bölgede, yüksek miktarda hidrojen kullanımı nedeniyle elektrolitin oksitlenmesi nedeniyle yakıt hücresi çalışamaz hale gelir. Bu nedenle yakıt hücresinin en yüksek verimde 2. bölgede ancak mümkün olduğu kadar 3. bölgeye yakın noktalarda çalışmaktadır [Srinivasan,2006].

Şekil 2.4'de gösterilen V-I karakteristiği sabit hidrojen akışı için verilmiştir. Hidrojen akışı değiştikçe V-I karakteristiği de değişmektedir. Şekil 2.5'de farklı hidrojen akış oranları için V-I karakteristiği verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi hidrojen akış oranı arttıkça yakıt hücresinden çekilebilecek maksimum güçte artmaktadır [Srinivasan,2006].

Bir yakıt hücresi için hidrojen akış oranının Şekil 2.5'de gösterilen Q_1 seviyesinde olduğu kabul edilsin. Maksimum verim için sistemin çalışma noktası 1 ile gösterilmektedir. Yükte ani bir yükselme oluştuğunda yakıt hücresinden çekilen akımda artacaktır. Fakat Q_1 hidrojen akış oranı için çekilen akımın artması yakıt hücresine zarar verecektir. Bu nedenle artan yükü karşılayabilmek için akış oranı Q_2 'ye yükseltilmelidir. Hidrojen akış oranı, yakıt işleyicisi ve yakıt hücresi denetleyicisinin zaman sabitlerine bağlı bir gecikme ile ancak Q_1 'den Q_2 'ye yükseltilebilir. Bu gecikme genellikle 60 s'dir. Bu yakıt hücresinin yükteki ani

değişikliklere cevap veremeyeceğini ve geçici durumları veya ani değişiklikleri karşılayabilmek için bir akü grubuna ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.



Şekil 2.5. Değişik akış oranlarında V-I karakteristiği

Bugün, yakıt hücreleri (özellikle SOFC) öncelikle 5 kW'dan küçük güçlü evsel uygulamalar ve yüksek güçlü reaktif güç ve harmonik kompanzasyonu ile kömür kullanılan yüksek sıcaklıklı termik santral uygulamalarında kullanılmaktadır. Evsel kullanımına ek olarak yakıt hücreleri MW mertebesindeki güçlerdeki uygulamalarda da kullanılmaktadır. Pratik üretim sınırlamaları ve güvenilirlik nedenleri ile bir yakıt hücresi yığınının maksimum çıkış gerilimi ve gücü çok yüksek olamamaktadır. Yüksek çıkış gerilimi ve gücünün elde edilebilmesi için birçok yakıt hücresi yığını ve farklı bağlantı şekilleri kullanılarak yakıt hücresi modülü oluşturulmaktadır.

2.4. Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları

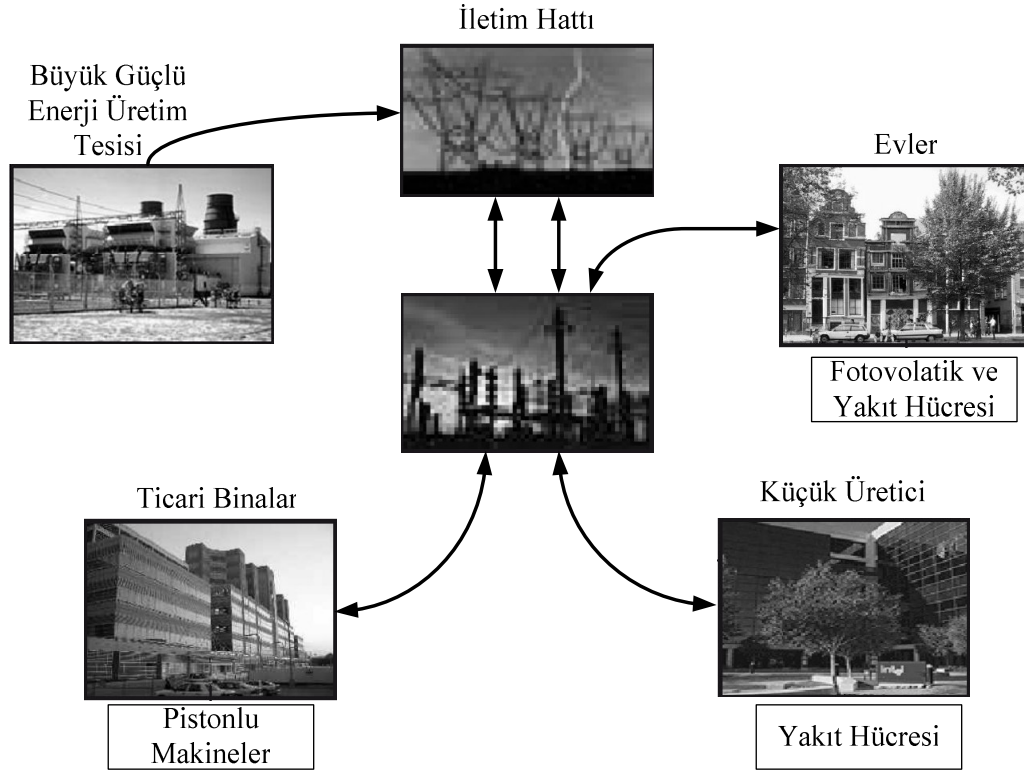
Güneş, rüzgâr ve hidrojen enerjisinin yanında elektrik üretimi için biyokütle, mikro-hidroelektrik santraller ve jeotermal enerji gibi kaynaklar da kullanılmaktadır. Ancak bunların kullanımları daha kısıtlı olduğu için bu çalışmada ayrıntılarına yer verilmemiştir.

2.5. Dağıtılmış Üretim

Elektrik üretiminde kullanılan klasik kaynakların hem dünya üzerindeki hem de ülkelerin kendi sınırları içerisinde homojen bir şekilde dağılmadığı için büyük güçlü enerji üretim merkezleri enerjinin yoğun biçimde kullanıldığı bölgelerden uzakta olabilmektedir. Bu durumlarda talep edilen elektrik enerjisini kullanım noktalarına iletmek için büyük çaplı ve yüksek maliyetli enerji iletim tesisleri kurulmaktadır.

Güç talebinde meydana gelen artışların karşılanabilmesi için üretim tesislerinin yanında iletim ve dağıtım tesislerinin de genişletilmesi gerekmektedir. Ayrıca elektrik enerjisinin üretim maliyeti petrol ve diğer fosil yakıtların fiyatlarından, iklim koşullarından, mevsimsel değişikliklerden etkilenmektedir. Bu nedenlerle 1970'lerden itibaren ABD'den başlayarak klasik enerji üretim ve şebeke yapılarında değişiklikler olmaya başlamıştır. ABD senatosu 1978 ve 1992 yıllarında yaptığı değişiklikler ile belirli şartları taşıyan generatörlerin elektrik şebekesine bağlanmasına izin vermiştir. Bu düzenlemeler ile her geçen gün artan enerji ihtiyacının karşılayabilmek için yeni ve daha düşük maliyetli enerji kaynakları kullanılarak elektrik üretiminin önü açılmıştır [Borbely ve Kreidel, 2001].

Merkezi şebekeyi tamamlayacak şekilde veya bir bölgede oluşturulan elektrik adasında şebeke bağlantısı olmaksızın yükleri beslemeyi amaçlayan, enerjinin tüketildiği noktada ya da yakın çevresinde üretildiği ve 10 MW'dan küçük güçlerde kurulan elektrik üretim tesislerine Dağıtılmış Üretim Tesisleri denilmektedir [Borbely ve Kreidel, 2001]. Dağıtılmış üretim tesislerinde enerji üretmek için içten yanmalı pistonlu motorlar, gaz türbinleri, mikro türbinler, rüzgâr, güneş, yakıt hücreleri, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da dağıtılmış üretime yer verilen bir enerji üretim sistemi görülmektedir.



Şekil 2.6. Dağıtılmış üretim tabanlı enerji üretimi

Çizelge 2.4’de dağıtılmış üretimde kullanılan kaynaklar listelenmiştir [Rashid, 2006]. Görüldüğü gibi bazı teknolojiler ticari ürüne dönüşmüş bazıları ise hala geliştirilme aşamasındadır. Bazı teknolojilerin ise ticari ürüne dönüşmüş olmalarına rağmen hala gelişmekte olduğu görülmektedir.

Günümüzde hızla gelişen, tüketim noktalarında ve daha çok yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak enerji üretilmesine imkan tanıyan dağıtılmış üretim tesisleri, enerji maliyetlerinin azalmasına ve enerjinin devamlılığının arttırılmasına imkan tanımaktadır. Ayrıca modüler üretim teknolojileri ve esnek yapıları sayesinde enerji talebinin arttığı bölgelerde kısa sürede küçük enerji üretim tesisleri kurulabilmektedir. Enerjinin tüketildiği noktada üretilebilmesi enerji iletim tesislerinin yükünü azaltmakta ve yeni tesis gereksinimlerini ya ortadan kaldırmakta ya da yatırım tarihini ötelemektedir. Fosil yakıtlara olan bağımlılık, çevresel zararlar,

iklim koşulları ve mevsimsel şartların enerji üretimi üzerindeki etkileri önemli miktarda azaltılabilir.

Çizelge 2.4. Ticari ürüne dönüşen ve günümüzde hala gelişmekte olan dağıtılmış üretim teknolojileri

Dağıtılmış Üretim Kaynağı	Ticari Olarak Kullanımı	Gelişmekte Olan Teknoloji	Güç Kapasitesi	Verim (%)
Mikrotürbinler	X	X	10-300kW	20-30
Pistonlu Motorlar	X	-	50kW-6MW	33-37
Stirling Motorlar	-	X	10-200kW	<40
Yoğunlaştırılmış Oksitli Yakıt Hücreleri (SOFC)	X	X	5kW-3MW	45-65
Proton Değiştirici Membranlı Yakıt Hücreleri	X	-	1kW-3MW	34-36
Fotovoltaik Sistemler	X	X	1kW-1MW	<35
Rüzgâr Türbinleri	X	X	1kW-10MW	<30
Hibrit Sistemler	-	X	<1kW-1MW	40-50
Kombine Isı ve Güç Sistemleri	X	X	5kW-25MW	50-80

Dağıtılmış üretim teknolojileri sayesinde evsel kullanıcılar veya ticari kurumlar kendi enerji üretim tesislerini kurabilmektedir. Böylece kendi elektrik enerjisi ihtiyaçlarının tamamını veya bir kısmını (özellikle enerji birim fiyatlarının daha yüksek olduğu zaman dilimlerinde) kendileri üretebildikleri gibi ihtiyaçlarından fazla olan enerjisi şebekeye aktararak satıcı pozisyona da geçebilmektedirler.

Şebekeye bağlanan generatörlerin de belirli enerji kalitesi şartlarını sağlamaları gerekmektedir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye bağlantılarında kullanılan güç elektroniği dönüştürücülerinin çalışma özellikleri ve performansları oldukça önemlidir.

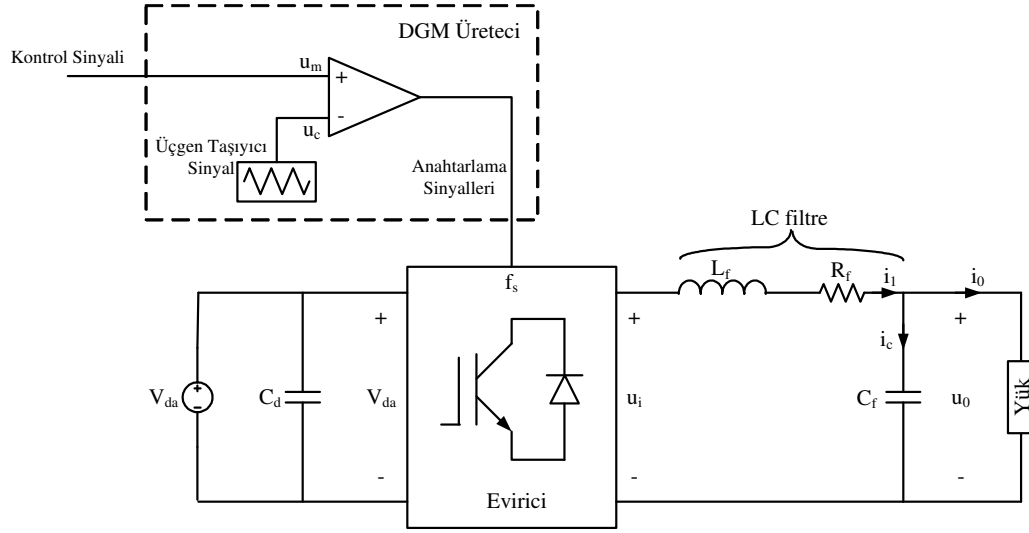
3. EVİRİCİLER VE ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİLER

DA elektrik enerjini AA elektrik enerjisine dönüştüren statik güç dönüştürücülerine Evirici denilmektedir. Eviriciler, önceleri çıkış gerilimleri kare dalga, sinüs benzeşimli (veya kısmi kare dalga) olacak biçimde de tasarlanmış olsalar da güç elektroniği, yarı iletken ve mikroişlemciler konusunda yaşanan gelişmeler ile birlikte günümüzde sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) anahtarlama ve sinüs çıkışlı eviriciler özellikle kesintisiz güç kaynakları ve AA motor sürücülerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu eviricilerde yüksek anahtarlama frekansı ile çıkış gerilimi kalitesi artmakta harmonikler ve çıkışta gereksinim duyulan filtrenin boyutları da azalmaktadır. Ancak anahtarlama kayıpları anahtarlama frekansını sınırlamaktadır. Genellikle çok büyük güçlü uygulamalarda 2,4 kHz olarak seçilen anahtarlama frekansı, güç seviyesi düştükçe 20 kHz'e kadar artırılmaktadır. Devre bileşenlerindeki gelişmeler devam ettikçe, duyum eşiği sınırı olan 20 kHz ve üstü değerlerde anahtarlama frekansı kullanılmaktadır [Mohan ve ark., 1995].

Eviricileri bir fazlı eviriciler, üç fazlı eviriciler veya akım kaynaklı eviriciler, gerilim kaynaklı eviriciler olarak sınıflandırmak mümkündür. Ayrıca son yıllarda çok seviyeli bir ve üç fazlı eviricilerde incelenmektedir.

3.1. Bir Fazlı Eviriciler

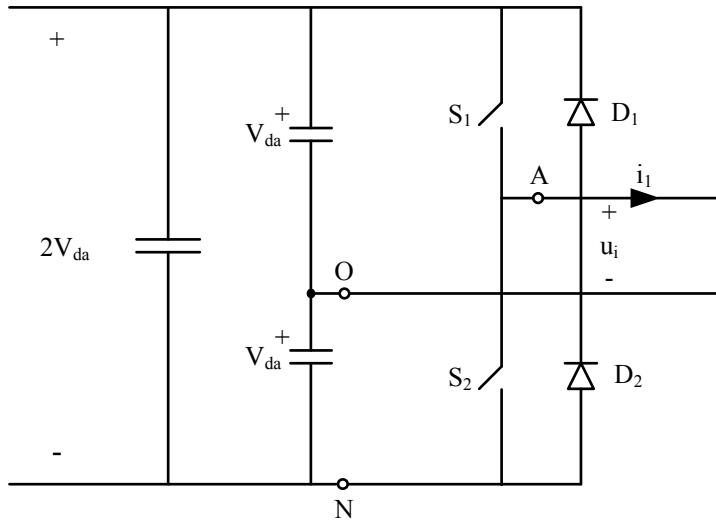
Tipik bir fazlı bir sinüsoidal evirici Şekil 3.1'de gösterildiği gibi DA güç kaynağı, DGM evirici ve çıkış filtresi (genellikle LC)'den oluşmaktadır. Evirici, kontrol sinyali u_m 'ye göre DA besleme gerilimini kıymaktadır. Çıkışta kullanılan 2. dereceden LC filtre ise evirici çıkış gerilimi u_i 'de bulunan yüksek frekanslı bileşenleri süzer. Burada R_f filtre bobininin direncini göstermektedir. Filtre kondansatörünün etkin seri direnci (ESR) frekans aralığı düşünüldüğünde kısıtlı bir etkiye sahip olacağından ihmal edilmiştir. DA gerilim kaynağı ideal sabit gerilimli bir kaynak olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.1'de gösterilen yük ise omik, endüktif, kapasitif veya doğrusal olmayan bir yük olabilir. En popüler bir fazlı evirici tasarımları yarım köprü ve tam köprü eviricilerdir [Mohan ve ark., 1995; Hart, 1997].



Şekil 3.1. Bir fazlı sinüsoidal DGM evirici

3.1.1. Yarım köprü evirici

Yarım köprü bir fazlı evirici Şekil 3.2’de gösterilmiştir. DA girişte eşit kapasitedeki 2 kondansatör seri bağlanmıştır. Orta noktaya göre her iki kondansatör üzerinde V_{da} gerilimi düşmektedir. N noktasına göre O noktasının potansiyelinin sabit kalabilmesi için büyük kapasiteli kondansatörler kullanılmalıdır.

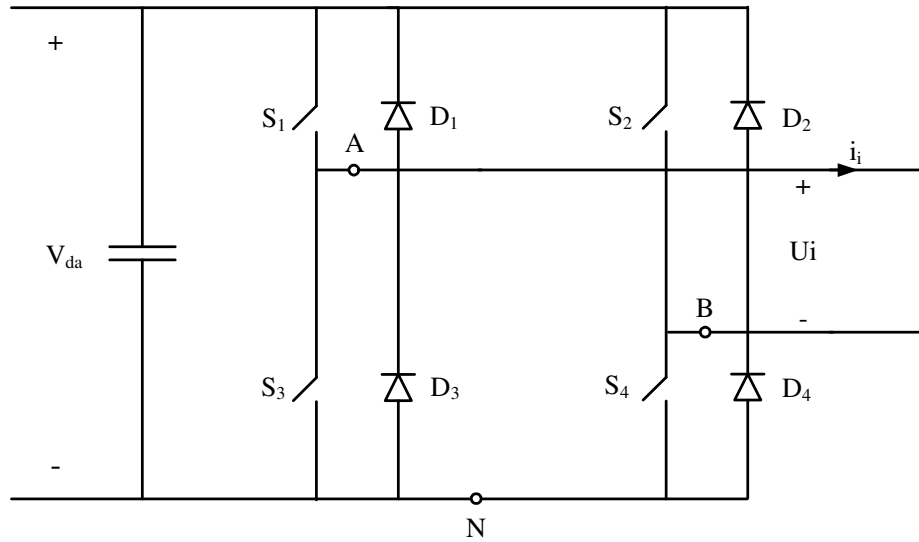


Şekil 3.2. Yarım köprü evirici

S1 ve S2 anahtarları biri ON (iletimde) olduğunda diğeri OFF (kesimde) olacak şekilde tetiklenmelidir. İki anahtar hiçbir zaman aynı anda ON olmamalıdır. Ayrıca pratikte DA kaynağın kısa devre olmasını engellemek için ölü zaman denilen ve iki anahtarın da OFF olduğu kısa bir zaman aralığı bulunmaktadır. Anahtarlara ters paralel bağlı diyotlar nedeniyle anahtarlardan iki yönde akım geçebilmektedir. Böylece Şekil 3.2’de gösterilen yarım köprü evirici ile dört bölgede çalışma elde edilebilir.

3.1.2. Tam köprü eviriciler

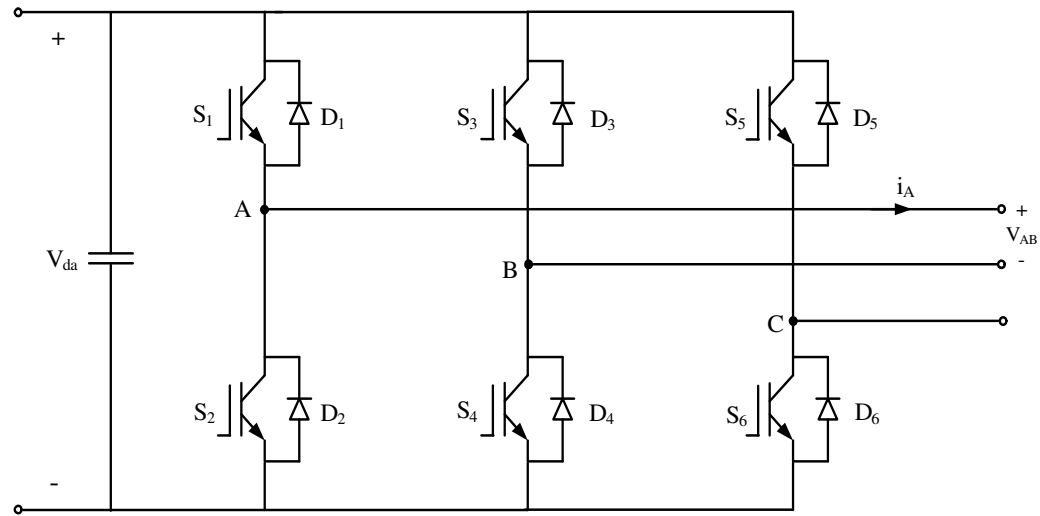
Bir fazlı tam köprü evirici devresi Şekil 3.3’de görülmektedir. Tam köprü eviricinin A ve B ile gösterilen iki kolu vardır ve yarım köprü eviricinin iki katı anahtar kullanılmaktadır. Tam köprü evirici daha yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilmektedir. Aynı çıkış gerilimi için ihtiyaç duyduğu minimum DA gerilim, yarım köprü eviricinin ihtiyaç duyduğunun yarısı kadardır. Bu aynı güç seviyesi için yarı iletken anahtarlar üzerindeki gerilim baskısının yarıya indirildiğini göstermektedir. Yüksek güçlü uygulamalarda bu önemli bir üstünlüktür.



Şekil 3.3. Tam köprü evirici

3.2. Üç Fazlı Eviriciler

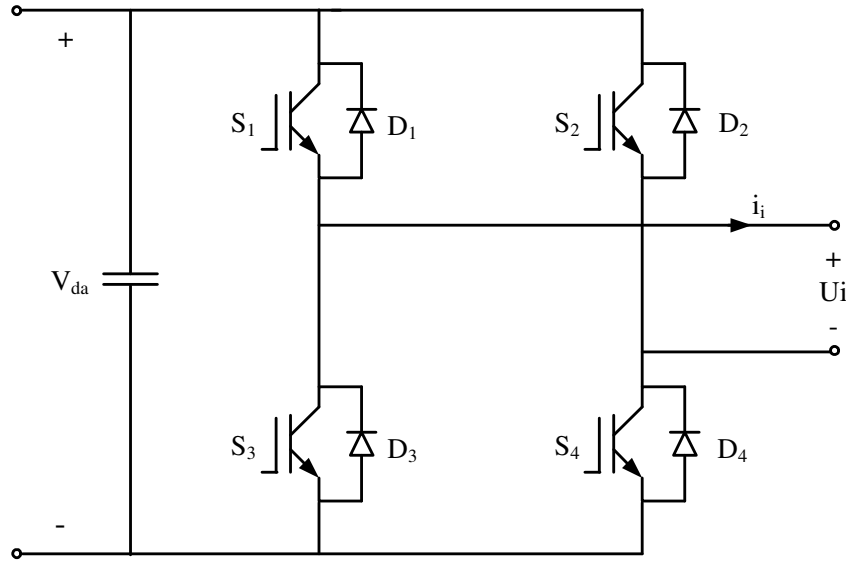
Küçük güçlü uygulamalar için bir fazlı eviriciler kullanılırken orta ve büyük güçlü uygulamalarda üç fazlı eviriciler kullanılmaktadır. Genellikle faz açısı, frekansı ve gerilimi her zaman kontrol edilebilen üç fazlı bir gerilim kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ayarlanabilir hızlı sürücüler, kesintisiz güç kaynakları gibi uygulamalar için sinüsoidal çıkış gerilimi üretecek şekilde tasarlanan üç fazlı eviriciler, rasgele dalga şekli üreten aktif filtreler ve gerilim kompensatörleri gibi uygulamalarda da kullanılabilir. Standart bir üç fazlı gerilim kaynaklı evirici devresi Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Üç fazlı evirici

3.3. Gerilim Kaynaklı Eviriciler

Gerilim kaynaklı evirici kontrollü gerilim kaynağı olarak kabul edilebilecek bir DA hatta sahiptir. DA hattaki gerilimin sabit tutulabilmesi için genellikle büyük kapasiteli kondansatör bağlanır. Şekil 3.5’de bir fazlı gerilim kaynaklı evirici yapısı görülmektedir. Anahtarlar kesimde iken sadece bir yönde gerilimi bloke edebildiklerinden her iki yönde akım geçirebilirler.

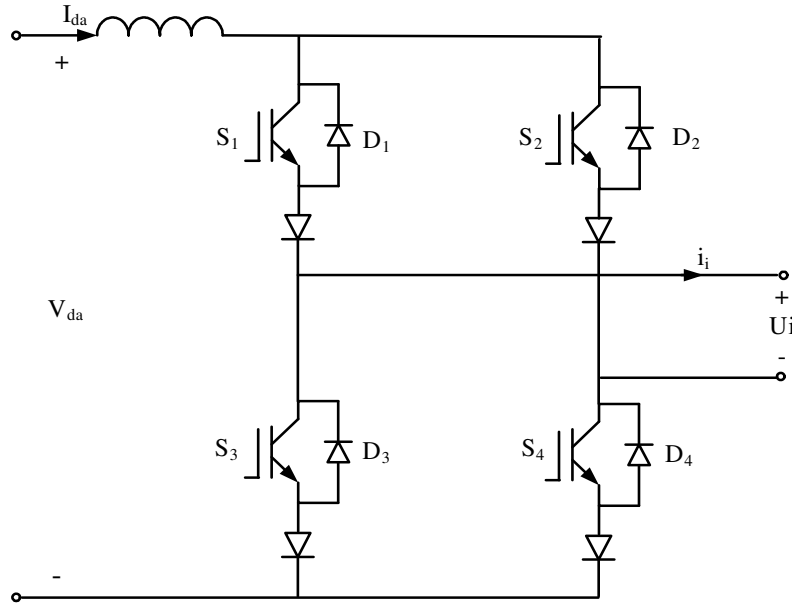


Şekil 3.5. Bir fazlı gerilim kaynaklı evirici

3.4. Akım Kaynaklı Eviriciler

Akım kaynaklı evirici kontrollü bir akım kaynağı olarak tanımlanabilecek bir DA hatta sahiptir. Sabit akım sağlayabilmesi için DA hatta yüksek değerli bir bobin bulunmaktadır. Şekil 3.6’da bir fazlı akım kaynaklı evirici yapısı görülmektedir. Ters gerilimi bloke edebilmesi için kontrollü anahtarlara seri diyotlar bağlanmıştır. Böylece iletme geçirildiklerinde bir yönde akım iletebilen bu anahtarlar kesimde iken her iki yönde de gerilimi bloke edebilirler. Anahtar olarak GTO kullanıldığında seri diyotların kullanılmasına gerek yoktur.

Paralel bağlı iki AA gerilim kaynağı arasındaki güç akışını kontrol etmek birbirine paralel bağlı bir gerilim kaynağı ile bir akım kaynağı arasındaki güç akışını kontrol etmekten daha zordur. Bu nedenle akım kaynaklı eviricinin yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke arayüzü olarak kullanılmaya daha uygun görünse de IGBT ve MOSFET gibi anahtarların ek diyotlara ihtiyaç duyması gibi zorluklar nedeniyle akım kontrollü gerilim kaynaklı eviriciler bu tip uygulamalarda daha yaygın kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. Bir fazlı akım kaynaklı evirici

3.5. Eviriciler için DGM Üretimi

Kare dalga ve kısmi kare dalga çıkışlı eviricilere göre Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) kontrol edilen eviricinin çıkış akımı ve/veya geriliminin toplam harmonik bozulumu (THD) değeri çok daha düşük değerlerdedir. Filtre edilmemiş DGM kontrollü evirici çıkış gerilimi ve/veya akımı da harmonik bileşenler içerse de bunların frekans değerleri yüksek olduğundan filtre edilmeleri kolaydır. Bu nedenle DGM kontrollü evirici çıkış gerilimi ve/veya akımı çok daha küçük bir çıkış filtresi ile IEEE 519-1992 gibi uluslararası standartlara uygun hale getirilebilir.

DGM kontrolle evirici çıkış gerilimi kontrol sinyali ile kolaylıkla değiştirilebilir. Harmonik standartlarına uyabilmek için daha küçük filtre gereksinimi ve çıkış geriliminin kolay kontrolü iki önemli üstünlüğüdür. Daha karmaşık kontrol devresine gereksinim duyulması ve yüksek frekanslı anahtarlama kayıplarından kaynaklanan daha yüksek anahtarlama kayıpları da bu yöntemin olumsuz yönlerini oluşturmaktadır.

Sinüsoidal DGM yönteminde anahtarlama sinyallerinin üretilebilmesi için Şekil 3.7’de gösterildiği gibi sinüs şeklinde bir kontrol sinyali (u_m referans veya modülasyon sinyali olarak da adlandırılmaktadır) ile anahtarlama frekansını belirleyen taşıyıcı sinyal (u_c) gerekmektedir. Anahtarlama sinyalleri bu iki sinyalin karşılaştırılması sonucu üretilir. Bu karşılaştırma işleminin yapılışına göre tek kutuplu ve çift kutuplu DGM sinyalleri üretilebilir.

Şekil 3.7’de üçgen taşıyıcı sinyalin genliği U_c ve frekansı f_s ile gösterilmektedir. Bu aynı zamanda eviricinin anahtarlama frekansını göstermektedir. Kontrol sinyali u_m anahtarların anahtarlama oranını belirlemek için kullanılır ve kontrol sinyalin frekansı f_l ’de evirici çıkış geriliminin frekansını belirler. Buradan modülasyon oranı m_a Eş. 3.1 ile ifade edilir.

$$m_a = \frac{\hat{U}_m}{\hat{U}_c} \quad (3.1)$$

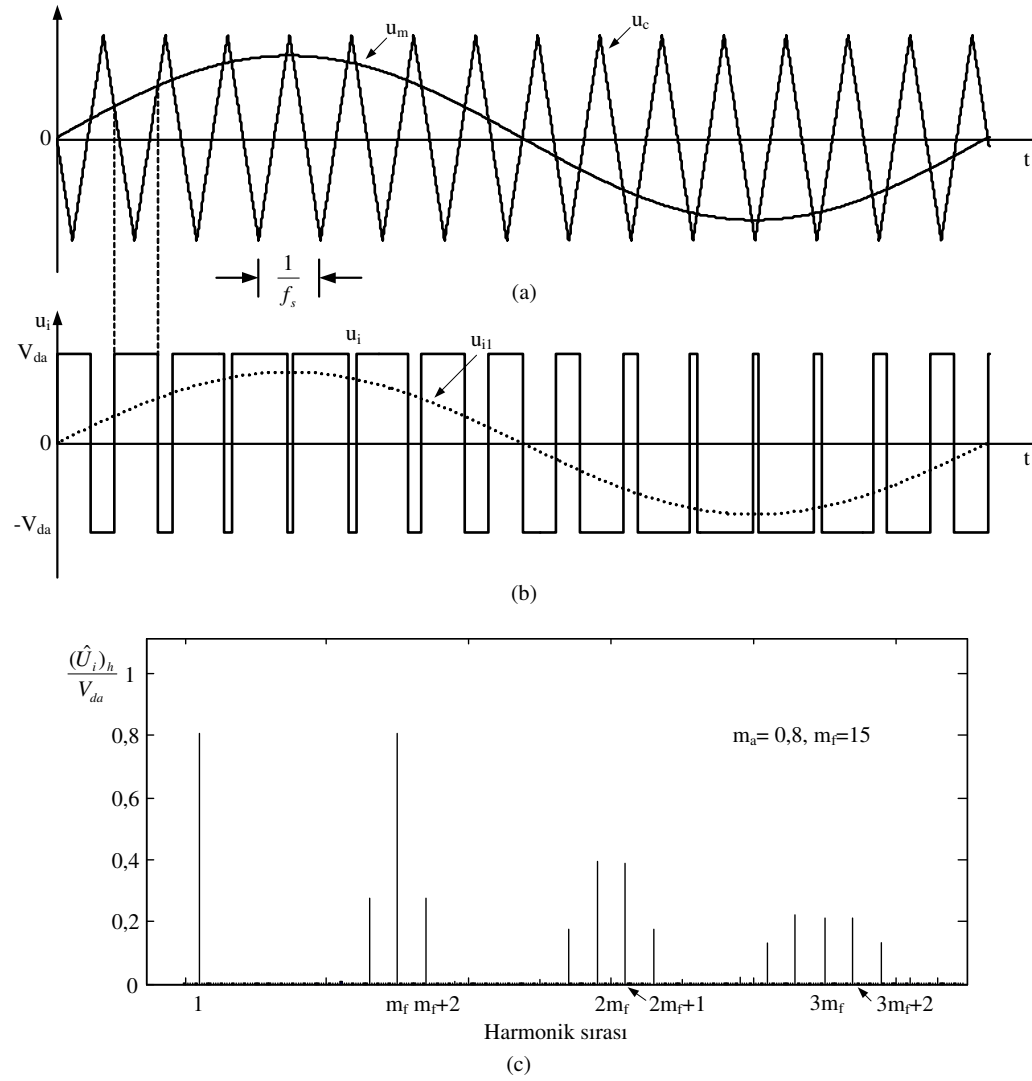
Burada $\hat{U}_m$ kontrol sinyal genliğini, $\hat{U}_c$ ’de genellikle sabit tutulan üçgen taşıyıcı sinyalin genliğini göstermektedir. Frekans modülasyon oranı m_f ise Eş. 3.2 ile bulunabilir.

$$m_f = \frac{f_s}{f_l} \quad (3.2)$$

3.5.1. İki kutuplu DGM üretimi

İki kutuplu sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Şekil 3.7 (a)’da sinüsoidal kontrol sinyali ile üçgen taşıyıcı sinyal görülmektedir. Sinüsoidal kontrol sinyalinin ani değeri üçgen taşıyıcı sinyalden büyük olduğunda evirici çıkış gerilimi $+V_{da}$, kontrol sinyali taşıyıcı sinyalden küçük olduğunda ise evirici çıkış gerilimi Şekil 3.7 (b)’de gösterildiği gibi $-V_{da}$ değerini alır. Çıkış gerilimi

DA besleme geriliminin pozitif ve negatif değerleri arasında değiştiği için iki kutuplu DGM olarak adlandırılır.



Şekil 3.7. İki kutuplu darbe genişlik modülasyonu

İki kutuplu anahtarlama ile sırasıyla yarım köprü ve tam köprü evirici için anahtar durumları aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
 u_m > u_c: & \quad S_1 \text{ ON}; & \quad u_i = V_{dc} \\
 u_m < u_c: & \quad S_2 \text{ ON}; & \quad u_i = -V_{dc}
 \end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned} u_m > u_c: & \quad S_1 \text{ ve } S_4 \text{ ON}; & \quad u_i = V_{dc} \\ u_m < u_c: & \quad S_2 \text{ ve } S_3 \text{ ON}; & \quad u_i = -V_{dc} \end{aligned}$$

İki kutuplu DGM durumunda evirici çıkış gerilimi u_i 'nin harmonikleri Şekil 3.7 (c)'de görülmektedir. Evirici çıkış geriliminin harmonik bileşenleri anahtarlama frekansı ve onun katları frekanslarındadır. Bu nedenle anahtarlama frekansı dolayısıyla m_f büyüdükçe çıkış geriliminde daha yüksek frekanslı harmonik bileşenler oluşmakta dolayısıyla filtre boyutları önemli miktarda azalmaktadır.

3.5.2. Tek kutuplu DGM üretimi

Bu yöntemde Şekil 3.8 (a)'da gösterilen üçgen taşıyıcı sinyali u_c , kontrol sinyali ve bu sinyalin tersi $-u_m$ ile ayrı ayrı karşılaştırılır. u_m kontrol sinyali ile u_c üçgen taşıyıcı sinyali karşılaştırılarak, tam köprü eviricinin A kolu için anahtarlama sinyalleri üretilir:

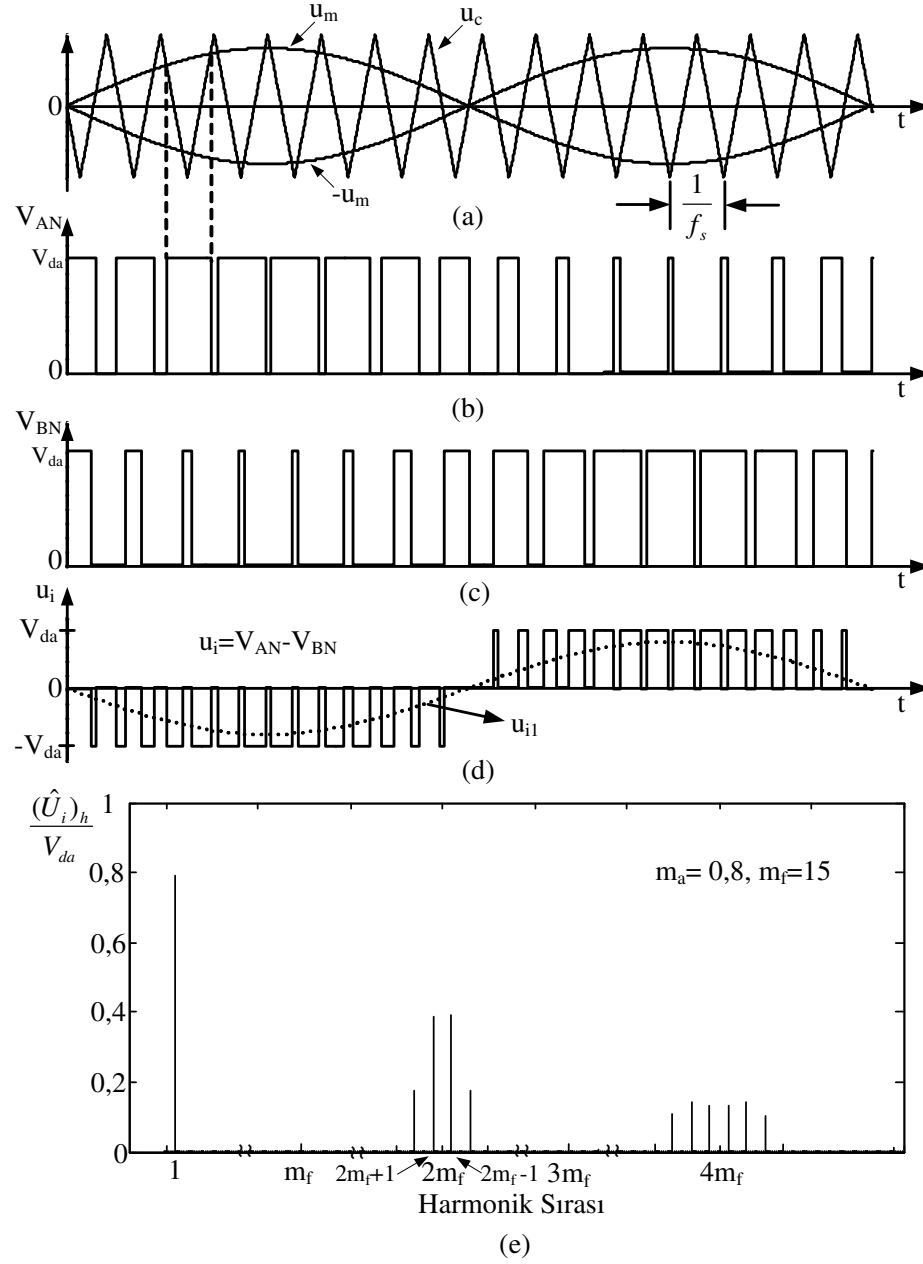
$$\begin{aligned} u_m > u_c: & \quad S_1 \text{ ON}; & \quad V_{AN} = V_{dc} \\ u_m < u_c: & \quad S_4 \text{ ON}; & \quad V_{AN} = 0 \end{aligned}$$

N noktasına göre eviricinin A kolu gerilimi u_{AN} Şekil 3.8 (b)'de gösterilmektedir. B kolundaki anahtarların kontrolünde $-u_m$ kontrol sinyali ile u_c üçgen taşıyıcı sinyali karşılaştırılır:

$$\begin{aligned} (-u_m) > u_c: & \quad S_2 \text{ ON}; & \quad V_{BN} = V_{dc} \\ (-u_m) < u_c: & \quad S_3 \text{ ON}; & \quad V_{BN} = 0 \end{aligned}$$

Anahtarlara ters paralel bağlı diyotlar nedeniyle V_{AN} ve V_{BN} gerilimleri akımın yönünden bağımsızdır. Evirici çıkış gerilimi u_i A ve B kolu gerilimlerin farkına eşittir. Şekil 3.8 incelendiğinde dört çeşit anahtarlama durumu olduğu görülmektedir:

- | | | | |
|-------------------|------------------|------------------|---------------|
| 1. S_1, S_4 ON: | $V_{AN}=V_{da},$ | $V_{BN}=0;$ | $u_i=V_{da}$ |
| 2. S_2, S_3 ON: | $V_{AN}=0,$ | $V_{BN}=V_{da};$ | $u_i=-V_{dc}$ |
| 3. S_1, S_2 ON: | $V_{AN}=V_{da},$ | $V_{BN}=V_{da};$ | $u_i=0$ |
| 4. S_3, S_4 ON: | $V_{AN}=0,$ | $V_{BN}=0;$ | $u_i=0$ |



Şekil 3.8. Tek kutuplu darbe genişlik modülasyonu

Bu tip anahtarlama uygulandığında çıkış gerilimi 0 ile $+V_{da}$ veya 0 ile $-V_{da}$ arasında değişmektedir. Bu nedenle tek kutuplu DGM adıyla anılmaktadır. Bu yöntem iki kutuplu ile karşılaştırıldığında iki katı anahtarlama frekansı etkisi oluşturduğundan gerilimdeki harmonik bileşenlerin frekansları daha yüksektir. Şekil 3.8 (e)'de çıkış geriliminin harmonik spekturumu görülmektedir. Görüldüğü gibi en düşük sıralı harmonik anahtarlama frekansının iki katı frekansındadır.

3.6. Bir Fazlı Tam Köprü Eviricinin Doğrusallaştırılmış Matematiksel Modeli

Eviricinin matematiksel modeli çıkartılırken ilk önce Şekil 3.3'deki anahtarların durumları tespit edilmelidir. Anahtarların açık veya kapalı olmasına göre şekillenen gerilimin L-C filtreden geçirilmesiyle yük gerilimi elde edilmektedir.

$$s = \begin{cases} 1 & U_m > U_c \Rightarrow S_1 \text{ ve } S_4 \text{ ON} \\ 0 & U_m < U_c \Rightarrow S_2 \text{ ve } S_3 \text{ ON} \end{cases}$$

$$u_i = V_{da} (2s - 1) \quad (3.3)$$

Görüldüğü gibi evirici çıkış geriliminin genliği kontrol sinyalinin genliği kontrol edilerek ayarlanabilir [Mohan ve ark., 1995]. Eş. 3.3'deki s yerine zamana bağlı olan görev oranı (dc) değişkeni kullanılabilir:

$$dc(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{u_m(t)}{U_c} + 1 \right) \quad (3.4)$$

Eş.3.4, Eş.3.3'de s yerine yazılırsa eviricinin zamana bağlı modeli elde edilebilir:

$$u_i = V_{da} \cdot \frac{u_m(t)}{U_c} = M \cdot u_m(t) \quad (3.5)$$

Burada $M = \frac{V_{da}}{U_c}$ modülasyon kazancı olarak tanımlanabilir. Böylece evirici devresi kontrollü gerilim kaynağı olarak kabul edilebilir.

Şekil 3.9’da gösterilen model için aşağıdaki durum denklemleri yazılabilir:

$$u_i = L \frac{di}{dt} + u_o \quad (3.6)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_i - u_o}{L} \quad (3.7)$$

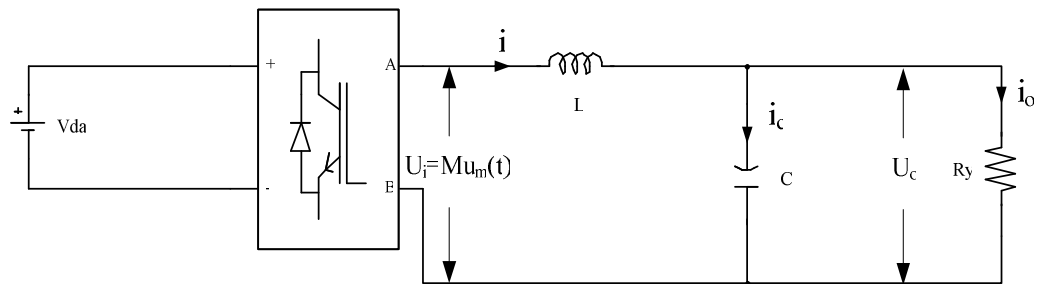
ve

$$u_o = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad \frac{du_o}{dt} = \frac{i_c}{C} \quad (3.8)$$

$$i_c = i - i_o \quad (3.9)$$

Eş. 3.8 ve 3.9 kullanılarak Eş. 3.10 elde edilebilir:

$$\frac{du_o}{dt} = \frac{i - i_o}{C} \quad (3.10)$$



Yük akımı i_o Eş. 3.11 ile ifade edilebilir:

$$i_o = \frac{u_o}{R_y} \quad (3.11)$$

Eş. 3.11, Eş. 3.10'da yerine yazılarak Eş. 3.12 elde edilebilir.

$$\frac{du_o}{dt} = \frac{i}{C} - \frac{u_o}{R_y \cdot C} \quad (3.12)$$

Eş. 3.7 ve Eş. 3.12 kullanılarak bir fazlı eviricinin durum denklemleri elde edilebilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ u_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_y \cdot C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ u_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_i \quad (3.13)$$

Eş. 3.5, Eş. 3.13'de yerine yazılırsa Eş. 3.14 elde edilmiş olur:

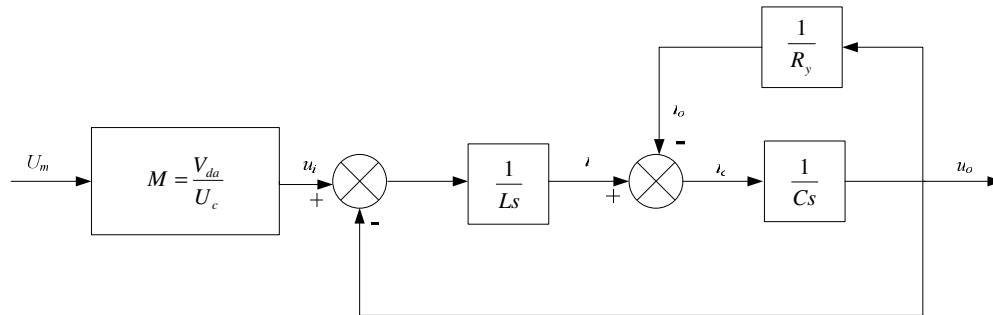
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ u_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_y \cdot C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ u_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u_m \quad (3.14)$$

Yukarıdaki eşitliklere laplace dönüşümü uygulanarak Şekil 3.10'daki blok diyagram elde edilebilir.

3.7. Şebeke Etkileşimli Eviriciler

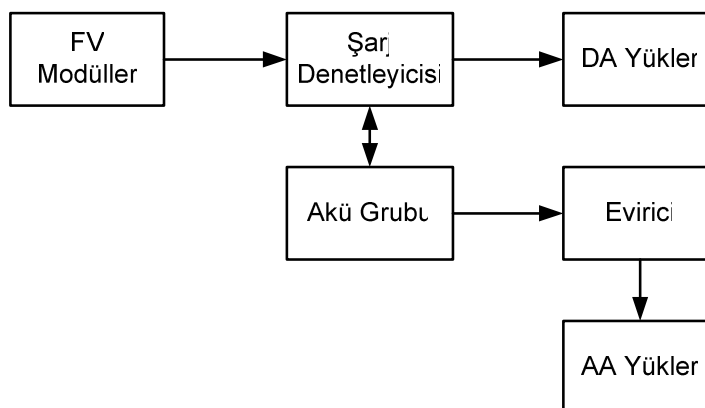
FV paneller güneş enerjisini DA elektrik enerjisine çevirirler. Benzer şekilde yakıt hücreleri de DA elektrik enerjisi üretmektedirler. Şebekenin ve yüklerinin büyük kısmının AA güç talep etmesi nedeniyle üretilen gücün AA'ya dönüştürülmesi gereklidir. Bunun için eviriciler kullanılır. Yenilenebilir enerji uygulamalarında

genellikle ada modlu ve şebeke etkileşimli olmak üzere iki tip evirici kullanılmaktadır [Godoy ve ark., 2006; Shireen ve Arefeen, 1996; Gu ve ark., 2006].



Şekil 3.10. Sinüsoidal darbe geniş modülasyonu anahtarlamalı eviricinin doğrusallaştırılmış matematiksel modeli

Şekil 3.11’de ada modu çalışan eviricinin blok diyagramı görülmektedir. Bu tip eviriciler daha çok elektrik şebekesinin bulunmadığı bölgelerdeki haberleşme vericileri, otoyol aydınlatması ve sinyalizasyonu gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Şekilden de görüldüğü gibi ada modlu evirici FV panel, şarj denetleyicisi, akü grubu ve DA-AA evirici içermektedir. Ayrıca şarj denetleyicisi sistemde bulunan DA yükleri de beslemektedir.



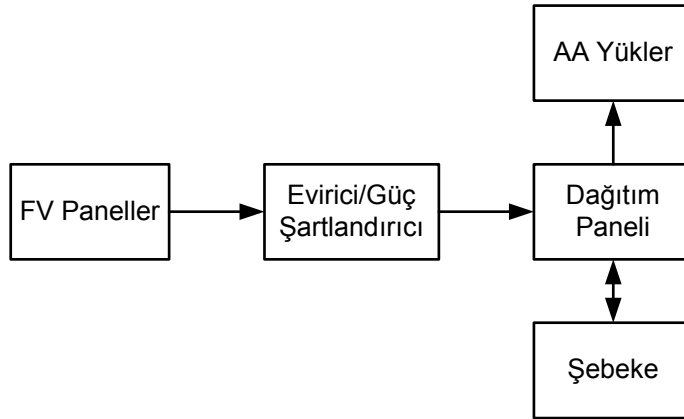
Şekil 3.11. Ada modu çalışan evirici yapısı

Ada modu çalışan eviricilerin kontrolleri daha basit ve maliyetleri daha düşüktür. Bu tip eviricilerde üretilen güç belirli yüklerin beslenmesinde kullanılmaktadır.

Enerjinin sürekliliği için akü grupları kullanılmasını gerektirir. Ancak bu çalışma durumunda alıcının ihtiyacından fazla enerji üretiminin olması durumunda ihtiyaç fazlası enerjinin şebekeye aktarılması söz konusu olmadığından verimli bir çalışma elde edilememektedir. Ayrıca enerji depolamak için kullanılan büyük kapasiteli akü grupları sistemin maliyetini arttırmaktadır [Saha ve Sundarsingh, 1996].

YEK'lerin şebekeye bağlanabilmesi ve böylece daha verimli bir çalışma sağlanabilmesi için şebekeyle paralel çalışabilen ve şebeke etkileşimli adı verilen eviricilere ihtiyaç vardır. Şekil 3.12'de yenilenebilir enerji kaynağı olarak FV panelleri kullanan ve şebeke etkileşimli çalışan bir eviricinin blok diyagramı verilmektedir. Görüldüğü gibi şebeke etkileşimli evirici FV enerji kaynağı, güç şartlandırıcı, dağıtım paneli ve evirici katından oluşmaktadır. Şebeke etkileşimli evirici ile FV panellerde üretilen DA elektrik enerjisi AA elektrik enerjisine dönüştürülmekte olup, evirici çıkışı dağıtım tablosuna bağlanmıştır. Sistemdeki yüklerin tamamı veya bir kısmı eviriciden beslenebildiği gibi üretilen enerjinin ihtiyaçtan fazla olması durumunda şebekeye enerji aktarımı da mümkün olmaktadır. Böylece daha verimli bir çalışma sağlanabilmektedir. Bu tip bir evirici ile küçük güçlü bir FV sisteme sahip bir kullanıcının dahi günün belli saatlerinde satıcı durumuna geçebilmesini mümkün kılar.

YEK'lerin kullanımı dolayısıyla üretici sayısı ve üretim miktarı arttıkça maliyetleri de düşmektedir. Örneğin ABD'de 1992 yılında FV panelin watt başına fiyatı 4,4~7,9 USD iken günümüzde 2,6~3,5 USD'ye düşmüştür. Böylelikle şebeke etkileşimli eviricinin fiyatı toplam sistem maliyeti üzerinde daha etkili olmaya başlamıştır. Bu nedenle eviricinin watt başına maliyetindeki azalma YEK'den üretilen enerjinin daha cazip olabilmesi için önemlidir. Sonuç olarak yeni, ucuz ve yaratıcı evirici çözümleri ve yeni sistem tasarımları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır [Saha ve Sundarsingh, 1996; Gu ve ark., 2006; Li ve Wolfs, 2006].



Şekil 3.12. Şebeke etkileşimli çalışan evirici yapısı

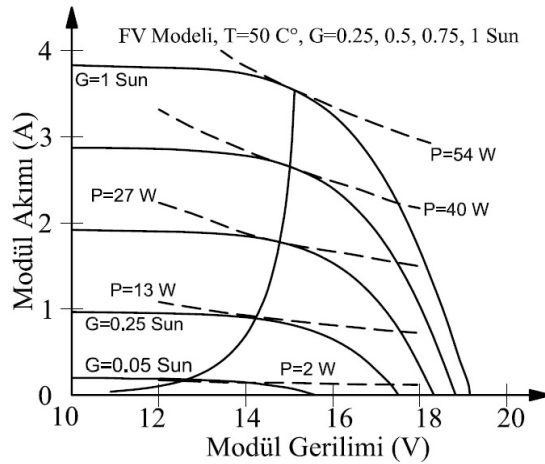
3.7.1. Şebeke etkileşimli bir eviricide bulunması gereken temel özellikler

Tipik bir şebeke etkileşimli eviricinin taşıması gereken özellikler şu şekilde belirlenmiştir;

- Şebekeye sinüs şeklinde akım enjekte etmeli ve bu akımın harmonikleri yönetmeliklerde belirtilen sınırlar içinde olmalıdır.
- Şebeke etkileşimli eviricinin güç faktörü 1 olmalıdır.
- Eviricideki güç elemanlarının yüksek frekanslı anahtarlama nedeniyle oluşan radyo girişimi kontrol altında olmalıdır.
- Şebeke kesildiğinde şebeke etkileşimli evirici şebekeden ayrılmalıdır.
- YEK'in veriminin en yüksek tutulmasını yani FV'lerden her an maksimum güç çekilmesini sağlamalıdır [Alepuş ve ark., 2002; Calais ve ark., 2002; Rahim ve ark., 2007; Jung, ve ark., 2006; Nonaka ve ark., 1990].

Günümüzde ticari FV panellerin verimi %15-%20 civarındadır [Zue ve Chandra, 2006; Hohm ve Ropp, 2002]. FV paneller belirli bir sıcaklık ve ısıtım şiddeti için tek bir akım ve gerilim değerinde maksimum güç verebilmektedirler. Bunların dışındaki akım ve gerilim değerleri çıkış gücünün dolayısıyla verimin düşmesine neden olurlar. Şekil 3.13'de Solarex MSX60 60W FV için farklı ısıtım değerlerinde maksimum güç noktasının değişimi gösterilmiştir [Walker, 2001]. FV paneller tarafından

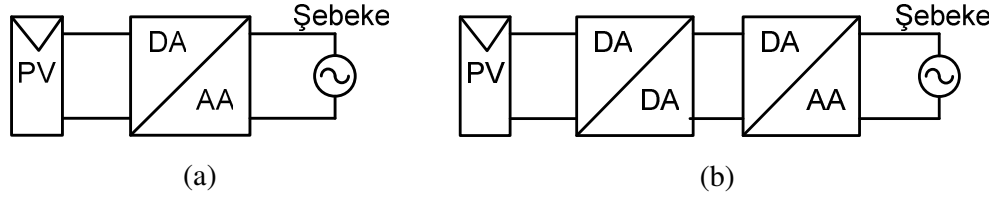
beslenen bir şebeke etkileşimli evirici, panelden her an maksimum güç çekilmesini sağlamalıdır ve bu amaçla güneş panellerinin çalışma noktasının sürekli ayarlanması gerekir [Enslin ve ark. 1997]. Maksimum gücün takip edilmesi için FV panelin maksimum güç noktasını sürekli takip eden aktif ve pasif olarak sınıflandırılabilen pek çok algoritma geliştirilmiştir [Calais ve Hinz, 1998; Patcharaprakti ve ark., 2005; Yuvarajan, ve ark., 2004]. Benzer şekilde küçük güçlü rüzgâr türbinleri ve yakıt hücrelerinin de verimleri çalışma noktalarına göre değişmektedir. En yüksek verimli çalışmanın elde edilebilmesi için yakıt hücrelerinin ve rüzgâr türbinlerin özelliklerine uygun yöntemler geliştirilmiştir [Wang, 2008; Koutroulis ve Kalaitzakis, 2006]. Maksimum güç takibi (MGT) için ayrı bir DA-DA güç dönüştürücüsü kullanılabildiği gibi eviricinin şebekeye enjekte ettiği akımın genliğini kontrol edilerek de kaynaktan her an maksimum gücün çekilmesi sağlanabilmektedir [Rahim ve ark., 2007; Zue ve Chandra, 2006; Wang ve Kazerani, 2003].



Şekil 3.13. FV panel maksimum güç eğrisi

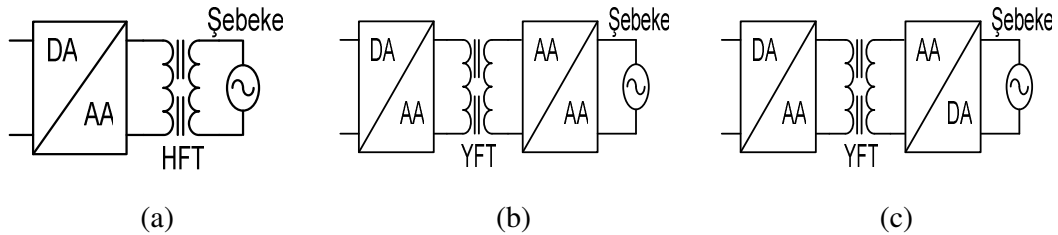
Şebeke etkileşimli eviricilerde tek bir güç işleme aşaması bulunabildiği gibi bunların sayısı iki veya daha fazla olabilir [Jung, ve ark., 2006; Ahmed ve ark., 2006; Hojo ve Ohnishi, 2006; Kang ve ark., 2005]. Şekil 3.14 (a)'da tek aşamalı evirici görülmektedir. Bu evirici MGT, şebeke akımı kontrolü ve eğer gerekli ise gerilim yükseltilmesi gibi bütün görevleri yerine getirmelidir. Şekil 3.14 (b)'de iki aşamalı

evirici görülmektedir. Bu sistemde MGT (ve gerekli ise gerilimin yükseltilmesi) DA-DA dönüştürücü tarafından gerçekleştirilmektedir [Kjaer ve ark., 2005].



Şekil 3.14. a) Tek aşamalı güç işleme b) İki aşamalı güç işleme

FV modüllerin toplam geriliminin şebeke geriliminin tepe değerinden düşük olduğu durumlarda evirici çıkış gerilimi de şebeke geriliminden düşük olacağından şebekeye enerji transfer edilemez. Bu durumda evirici çıkış geriliminin yükseltilmesi için dönüştürme oranı gerilim farkına göre belirlenen bir transformatör kullanılabilir. Bazı eviriciler Şekil 3.15’de gösterildiği gibi DA-DA güç dönüştürücüsü veya DA-AA evirici bünyesinde yüksek frekanslı transformatörler içerirlerken bazıları şebeke tarafında hat frekanslı transformatör kullanırlar. Hat frekanslı transformatör kullanımı IEEE ve IEC gibi standartların sınırlandırdığı ve dağıtım transformatörlerinde doymaların oluşmasına neden olan DA akım transferini engeller ve aynı zamanda şebeke ile FV kaynak arasında elektriki izolasyon sağlar. Topraklanması gereken sistemlerde eviricilerin çalışabilmesi için DA kaynak ile şebeke arasında elektriki izolasyonun bulunması gerekmektedir.



Şekil 3.15. Transformatörlü evirici örnekleri a) Şebeke ile evirirci arasında hat frekanslı transformatör (HFT) bağlı b) YF link şebeke etkileşimli AA-AA eviriciye bütünleşik yüksek frekanslı transformatör (YFT) c) DA-DA güç dönüştürücüsüne gömülü YFT

Daha düşük boyutlardaki yüksek frekanslı transformatörler DA akım enjeksiyonu problemini çözmez. Ancak YEK'in topraklanmasını kolaylaştırır. Hat frekanslı transformatör kullanımının ağırlık, boyut ve fiyatları artırması ve özellikle verimi düşürmesi nedeniyle modern eviricilerde yüksek frekanslı transformatörler tercih edilmektedir [Myrzik ve Calais, 2003].

Ada modu çalışan eviriciler kesintisiz güç kaynağı (KGK) eviricileri ile benzer yapıda olup genellikle gerilim kontrollüdürler. Şebeke etkileşimli eviriciler ise gerilim kontrollü veya akım kontrollü olarak tasarlanabilmektedir. Ancak gerilim kontrollü eviricide gerçekleşen küçük bir senkronizasyon hatası eviricinin aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Akım kontrollü evirici ise bu duruma karşı daha az duyarlı olduğundan şebeke güç aktarımında önerilmektedir [Alepuz ve ark., 2002; Masoud ve Ledwich, 1999; Sefa ve Altin, 2006]. Akım kontrolü için PI, histerezis, deadbeat, bulanık mantık gibi değişik kontrol yöntemleri kullanılmaktadır [Shireen ve Arefeen, 1996; Rahim ve ark., 2007; Jung, ve ark., 2006; Kjaer ve ark., 2005; Patcharaprakiti ve Premrudeepreechacharn, 2002; Uemara ve Yokoyama, 2003]. Ayrıca şebeke etkileşimli eviriciler yüke reaktif güç aktaracak (böylece reaktif güç kompanzasyonu yapabilecek) şekilde de kontrol edilebilmektedir [Barbosa ve ark., 1998; Hojo ve Ohnishi, 2006; Yu ve ark., 2005].

Şebeke etkileşimli evirici uygulamalarında farklı tipte evirici yapıları kullanılmaktadır. Pek çok uygulamada gerilim kaynaklı eviriciler kullanılmış olsa da kısa devrelere karşı yüksek direnç göstermeleri ve ters gerilimi bloke etmeleri gibi özellikleri nedeniyle akım kaynaklı evirici üzerine çalışmalar yapılmaktadır [Nonaka ve ark., 1990; Hirachi ve Tomokuni, 1997]. Kullanılan yapılardan biri de çok seviyeli eviricilerdir. İki seviyeli eviriciye göre ideale yakın performansları, uygun maliyetleri ve yüksek güvenilirliği nedeniyle 3 ve 5 seviyeli eviriciler de incelenmişlerdir [Alepuz ve ark., 2002; Kjaer ve ark., 2005; Baker ve ark., 1998]. Çok seviyeli eviriciler özellikle DA bara geriliminin yüksek olduğu orta ve yüksek güç uygulamaları için cazip bir çözümdür [Alepuz ve ark., 2002].

Şebeke etkileşimli çalışmada herhangi bir nedenle şebekenin kesilmesi durumunda evirici tarafından beslenen bölgede bir elektrik adası oluşur. Durumdan habersiz bakım personeli için tehlikeli olabilecek bu ada durumunun tespit edilmesi ve eviricinin hemen şebekeden ayrılması gereklidir. Ada modunun tespiti için aktif ve pasif yöntemler geliştirilmiştir [Hudson ve ark., 2002; Woyte ve ark., 2003; Tunlasakun ve ark., 2004; Hung ve ark., 2003; Jeong ve ark., 2005; Vachtsevanos ve Kang, 1989].

Alçak/yüksek gerilim rölesi, alçak/yüksek frekans rölesi, gerilim faz sıçramasının tespiti, gerilim harmoniklerinin tespiti, akım harmoniklerinin tespiti gibi pasif metotlar, sadece şebeke parametrelerini izler, güç kalitesi üzerine etkileri yoktur. Aktif metotlar olarak empedans ölçümü, belirli bir frekanstaki empedansın tespiti, frekans eşiği, frekans kaydırma, gerilim kaydırma gibi yöntemler incelenmiştir. Bunlar şebekedeki bozulmaları ortaya çıkarır ve etkiyi izler. Şebekede ortaya çıkarılan bu bozulmalar güç kalitesini etkiler ve şebekeyle paralel çalışan çeşitli eviricilerde olduğu bilinen problemlerin tetikleyicisi olabilir [Enslin ve Heskes, 2004].

Yüksek gerilim rölesi, alçak gerilim rölesi, yüksek frekans rölesi ve alçak gerilim rölesi bulunduran bir evirici temel ada modu tespit yeteneğine sahiptir. Gerilim seviyesi veya frekans normal aralığın dışına çıkarsa şebekenin hatalı olduğu düşünülmektedir ve evirici şebekeden ayrılır. Bununla beraber bu yöntemler ile kaynak-yük dengeli olma durumunda şebeke kesilse dahi ada modu tespit edilemez [Hung ve ark., 2003].

Tespit yeteneğini arttırmak için geliştirilen diğer yöntemlerden biride gerilim harmoniklerinin izlenmesidir. Bu metot dağıtım transformatörlerinin doğrusal olmayan karakteristiklerine dayanır. Güçlü bir gerilim kaynağı (şebeke) olmaz ise evirici tarafından transformatöre enjekte edilen akım büyük gerilim harmoniklerine neden olur [Hung ve ark., 2003]. Harmonik seviyesi arttığında verimli biçimde ada modu tespit edilmiş olur.

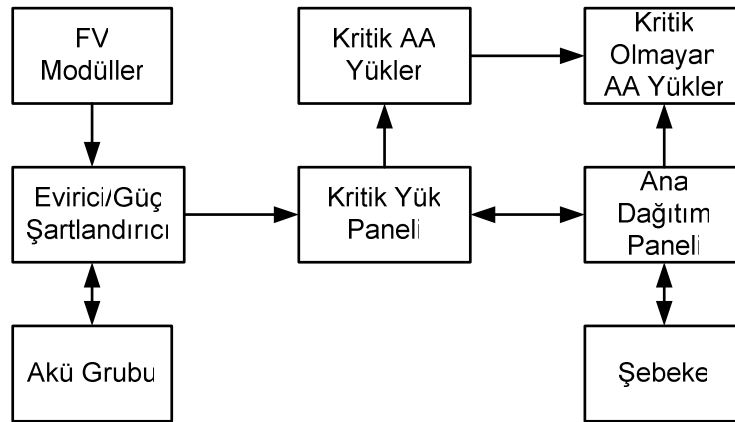
Faz atlama tespit yöntemi adı verilen başka bir yöntem evirici gerilimi ve akımı arasındaki faz farkını izler. Şebeke etkileşimli çalışmada evirici akımı şebeke gerilimi ile aynı fazdadır. Şebeke kesildiğinde ise evirici gerilimi ve akımı arasındaki faz farkı yük tarafından belirlenir. Bu ani faz değişimi koruma devresini tetikler ve evirici durdurulur. Ancak bu yöntem yükün omik olması durumunda ada modunu tespit edemez [Jeong ve ark., 2005]. Sayılan yöntemlerin hepsi pasif yöntemlerdir. Evirici geriliminin izlenmesini temel alırlar ve her yük durumu için başarılı değildirler. Bu sınırlılıkları nedeniyle aktif yöntemler geliştirilmiştir [Hung ve ark., 2003].

Aktif yöntemlerden birisi evirici çıkış gücünü periyodik olarak değiştirmektir. Bu kaynak-yük dengeli durumunda ada modunun tespitini amaçlar. Ancak bu yöntem güç sistemindeki bütün eviriciler arasında zaman senkronizasyonu gerektirdiğinden kolay uygulanabilir değildir. Son zamanlarda bu problemin çözümü için frekans kaydırma metotları incelenmeye başlanmıştır [Hung ve ark., 2003].

Herhangi bir nedenle şebeke kesildiğinde elektrik adalarının ve neden oldukları problemlerin oluşmasını engellemek için şebeke etkileşimli eviriciler durdurulurlar. Ancak bazı uygulamalarda yerel yüklere kesintisiz enerji sağlamak için gerekli tedbirler alınarak eviricinin çalışmasına devam etmesi sağlanır. Bunun için eviricinin yükün enerjisini kesmeden şebeke etkileşimli çalışma durumundan ada modu çalışma durumuna geçmesi gereklidir. Başka bir deyişle akım kontrollü çalışmadan gerilim kontrollü çalışmaya geçmelidir [Gu ve ark., 2006; Jung, ve ark., 2006]. Bu şekilde çalışabilen eviriciler iki durumlu evirici denmektedir. Şekil 3.16'da iki durumlu bir eviricinin blok diyagramı görülmektedir. Şekil 3.16'dan da görüldüğü gibi iki durumlu evirici FV paneller, güç şartlandırıcı/evirici, kritik yük paneli, ana dağıtım paneli ve akü grubundan oluşmaktadır. Bu sistemlerde yükler kritik olan ve olmayan şeklinde gruplandırılmakta ve kritik yük olarak belirlenenlere kesintisiz enerji sağlanmaktadır.

Bu tip uygulamalarda, şebeke kesildiğinde evirici şebekeden ayrılır ve gerilim kontrollü çalışmaya geçerek sadece daha önceden belirlenen yükleri beslemeye

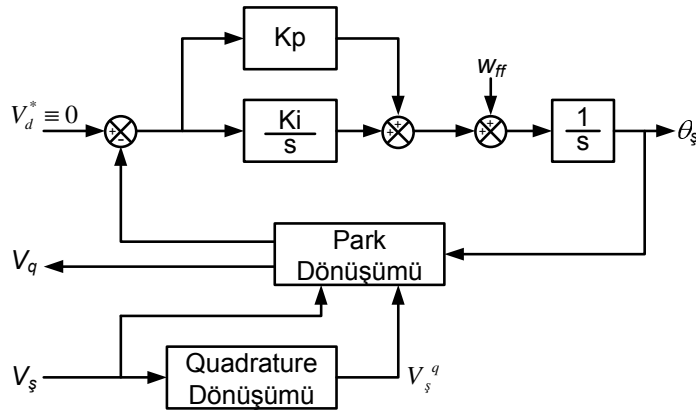
devam eder. Bu işlem sırasında yerel yüklerin enerji kesintisini algılamaması gereklidir. Ayrıca eviriciyi şebekeden ayırmak için kullanılan anahtarların açılması sırasında yerel yük uçlarında herhangi bir gerilim yükselmesi de oluşmamalıdır. Şebeke kesintisi ortadan kalktığına eviricinin otomatik olarak tekrar şebekeye bağlanması ve şebeke etkileşimli yani akım kontrollü olarak çalışmasına devam etmesi istenebilir. Bu durumda şebeke kesintisi ortadan kalktığına evirici gerilim kontrollü olarak çalışırken şebeke gerilimine senkron olmalı ve akımın sıfır geçişinde çalışma durumunu değiştirmelidir. Yine bu geçişten yükler etkilenmemelidir [Godoy ve ark., 2006; Chung, 2000; Svensson, 2001; Kaura ve Blasko, 1997; Arruda ve ark., 2001; Arruda ve ark., 2000; Silva ve ark., 2004].



Şekil 3.16. İki durumlu evirici blok diyagramı

Şebeke etkileşimli çalışmada birim güç faktörünün sağlanabilmesi için şebekeye enjekte edilen akım şebeke gerilimi ile aynı frekansta ve fazda olmalıdır. Bunun için şebeke geriliminin faz ve frekans bilgilerinin bilinmesi gereklidir. Bu bilgileri tespit etmek için elektrik devrelerinde faz ve frekans bilgisinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan faz kilitleme döngüsü (FKD) devreleri kullanılmaktadır [Godoy ve ark., 2006; Woyte ve ark., 2003; Yu ve ark. 2007]. FKD devreleri şebeke etkileşimli eviricilerde şebeke gerilimi ile senkronize akım referansı üretmekte kullanılır. Bu nedenle FKD devreleri, şebeke etkileşimli evirici performansı için belirleyici özelliğe sahiptir [Kaura ve Blasko, 1997].

Şebeke geriliminin sıfır geçiş noktalarının tespiti kullanılan basit bir FKD yöntemidir [Chung, 2000; Svensson, 2001]. Bu yöntemde, her yarı saykılada (50Hz için saniyede 100 defa) sıfır geçişi tespit edilse de, bu tespit noktaları arasında faz izleme işlemi mümkün olmadığından hızlı izleme performansı elde etmek mümkün değildir. Ayrıca şebeke gerilimindeki düzensizlikler (gerilim harmonikleri, frekans değişimi ve gerilim çentikleri vb.) sıfır geçişinin tespit edilememesine ve dolayısıyla sistem tepkisinin yavaşlamasına neden olabilir [Tao ve ark., 2007]. Bu nedenle daha gelişmiş FKD teknikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Üç fazlı sistemler için geliştirilen, dq dönüşümü ve uygun biçimde tasarlanmış döngü filtresi ile gerçekleştirilen FKD devresi Şekil 3.17’de gösterilmiştir [Chung, 2000; Kaura ve Blasko, 1997; Arruda ve ark., 2001; Arruda ve ark., 2000]. Bu yöntemde faz tespiti dq dönüşümü ile yapılırken filtre parametreleri (sönüm faktörü, doğal frekansı) sistemin dinamik karakteristiğini belirler [Jung, ve ark., 2006; Nonaka ve ark., 1990]. Ayrıca bir fazlı sistemler için benzer özellikleri taşıyan ve dq - $\alpha\beta$ dönüşümlerinin birlikte kullanıldığı bir FKD devresi geliştirilmiştir [Godoy ve ark., 2006; Silva ve ark., 2004].



Şekil 3.17. Üç fazlı FKD yapısı

3.7.2. Şebeke etkileşimli eviricilerin uyması gereken uluslararası standartlar

Şebeke etkileşimli evirici, şebekeye bağlanacağından kuruluşlarının belirlediği IEC61727, EN61000-3-2, IEEE1547, EN 50330-1, IEEE 929-2000 ve U.S. National Electrical Code (NEC) 690 gibi standartlara uymalıdır. Bu standartlar güç kalitesi,

ada modunun tespiti, topraklama, şebeke empedansının izlenmesi vb. gibi konularla ilgilidir. IEC61727, IEEE1547 ve EN61000-3-2 Çizelge 3.1’de özetlenmiştir [Kjaer ve ark., 2005].

Çizelge 3.1. Şebeke etkileşimli sistemler ile ilgili belli başlı standartların özeti

KONU	IEC61727	IEEE1547	EN61000-3-2
Anma gücü	10 kW	30 kW	16A X 230V = 3,7 kW
Derecesine göre harmonik akım limitleri	(3-9) %4,0 (11-15) %2,0 (17-21) %1,5 (23-33) %0,6	(2-10) %4,0 (11-16) %2,0 (17-22) %1,5 (23-34) %0,6 (>35) %0,3	(3) 2,30 A (5) 1,14 A (7) 0,77 A (9) 0,40 A (11) 0,33 A (13) 0,21 A (15-39) 2,25/h
	Bu aralıktaki çift sıralı harmonikler listelenen tek sıralı harmoniklerden %25 daha az olmalıdır.		Tek sıralı harmoniklerin yaklaşık %30'u kadar
Maksimum akımTHD'si	5,00%	5,00%	-
Anma gücünün %50'sinde güç faktörü	0,9	-	-
DA akım enjeksiyonu	Anma çıkış akımının %1,0'ından az	Anma çıkış akımının %0,5'inden az	<0,22 A - 50W yarım dalga doğrultucuya uyan
Normal çalışma için gerilim aralığı	%85 - %110 (196V - 253V)	%88 - %110 (97V - 121V)	-
Normal çalışma için frekans aralığı	50±1 Hz	59,3 Hz - 60,5Hz	-

Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi günümüzde uygulanmakta olan IEEE ve IEC standartları, EN standardına göre akım harmonikleri konusunda daha katıdır. Bu durum, büyük güçlü tristörlü şebekeye etkileşimli eviriciler yerine daha küçük güçlü IGBT/Mosfet’li olanların kullanılmasına neden olmuştur [Kjaer ve ark., 2005].

Ayrıca NEC 690 standardı maksimum çıkış geriliminin 50V gibi belirli bir değere ulaşan FV panellerin topraklı ve toprak arızalarına karşı izlenen bir sistem olmasını

gerektirir. Sistem topraklaması, FV panelin negatif (veya pozitif) ucunun toprağa bağlanmasını gerektirir. Bu, şebekenin faz-nötr uçlarına bağlanan bir fazlı eviricinin zaten şebeke tarafında topraklı olması nedeniyle, pek çok transformatörsüz sistem için sorun olabilir. Diğer standartlar elektriki izolasyonun olmaması durumunda sadece donanımın topraklanmasını isterler. Donanımın topraklanması çerçevelerin ve diğer metalik parçaların toprağa bağlanmasıdır.

FV sistemler için anti-ada modunu da kapsayan test standartları IEEE 929-2000 (Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems) ile belirtilmiştir. IEEE 929 pek çok konuya işaret etse de en önemli bölümleri normal olmayan şebeke koşullarında FV eviricilerin tepkisini içeren güvenlik ve koruma fonksiyonları ile ilgili olanlardır. Bu normal olmayan koşullar gerilim ve frekans değişimi ile istenmeyen elektrik adalarının oluşmasına neden olan şebekenin kesilmesi durumlarıdır. IEEE 929'a göre hangi durumlarda ve en fazla ne kadar zaman içinde eviricinin şebekeden ayrılması gerektiği Çizelge 3.2'de gösterilmiştir [Hudson ve ark., 2002].

Çizelge 3.2. IEEE 929 standartlarına göre şebekeden ayrılma durumları ve zamanları

Şebeke Etkileşimli Çalışma İçin Gerilim ve Frekans Sınırları			
Durum	Gerilim	Frekans	Max. Açma Zamanı
A	$0,5 V_{nom}$	f_{nom}	6 saykıl
B	$0,5 V_{nom} < V < 0,88 V_{nom}$	f_{nom}	2 saniye
C	$0,88 V_{nom} \leq V \leq 1,10 V_{nom}$	f_{nom}	-
D	$1,10 V_{nom} < V < 1,37 V_{nom}$	f_{nom}	2 saniye
E	$1,37 V_{nom} \leq V$	f_{nom}	2 saykıl
F	V_{nom}	$f < f_{nom} - 0,7 \text{ Hz}$	6 saykıl
G	V_{nom}	$f > f_{nom} + 0,5 \text{ Hz}$	6 saykıl

Şebeke empedansındaki değişiklikler şebekeyle paralel çalışan eviricilerin kararsızlığa gitmesine neden olur. Bu nedenle EN 50330-1 gibi standartlar şebeke

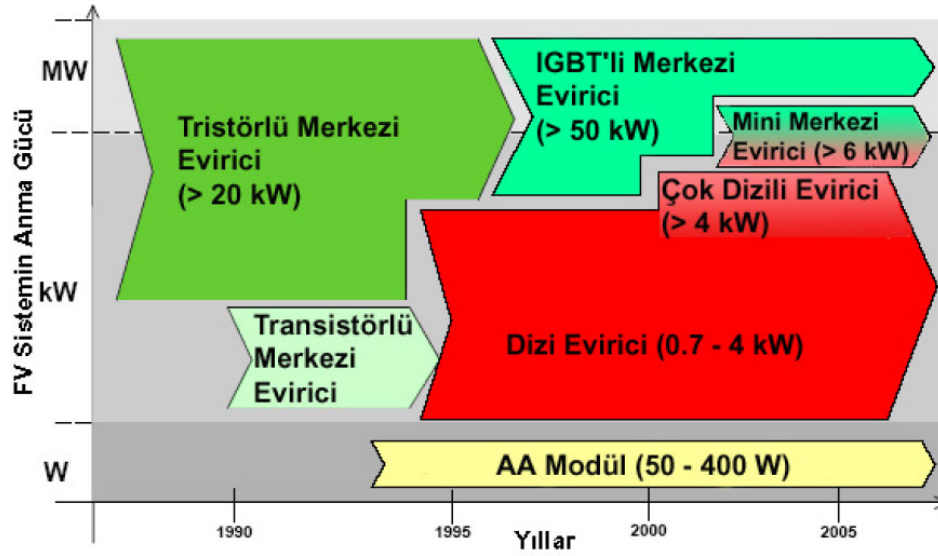
empedansında 0.5Ω değişim meydana geldiğinde 5 saniye içinde eviricinin şebekeden ayrılmasını şart koşmaktadır. Bu amaçla şebeke empedansının sürekli olarak ölçölmesi ve izlenmesi gereklidir. Şebeke empedansını online ölçen çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [Asiminoaei ve ark., 2005; Liserre ve ark., 2004; Matsui ve ark., 2001; Acharyya ve Plusquellic, 2003; Liserre ve ark., 2007].

3.7.3. Eviricilerin gelişimi

Yenilenebilir enerjisi uygulamalarında kullanılacak olan eviriciler, uygun maliyetli, kolay kurulumlu ve uzun ömürlü olmalıdır. Bununla birlikte kullanıcı, doğal şartlar nedeniyle geniş bir aralıkta değişebilen giriş gerilimi ve güç değerleri için veriminin yüksek olması istenilir [Svensson, 2001; Kaura ve Blasko, 1997; Arruda ve ark., 2001; Arruda ve ark., 2000; Silva ve ark., 2004].

Yarı iletken teknolojisindeki ve yüksek frekanslı nüveler gibi manyetik malzemelerdeki gelişmelerin yanında talebinde artmasıyla daha düşük maliyet ve yüksek verim için farklı evirici topolojileri ve bunların kontrol devreleri geliştirilmiştir. Buna paralel olarak da şebeke etkileşimli eviriciler, araştırmalar sonucu elde edilen verilerin de etkisiyle Şekil 3.18’de gösterildiği gibi bir gelişim göstermiştir [Engel ve Meinhardt, 2006].

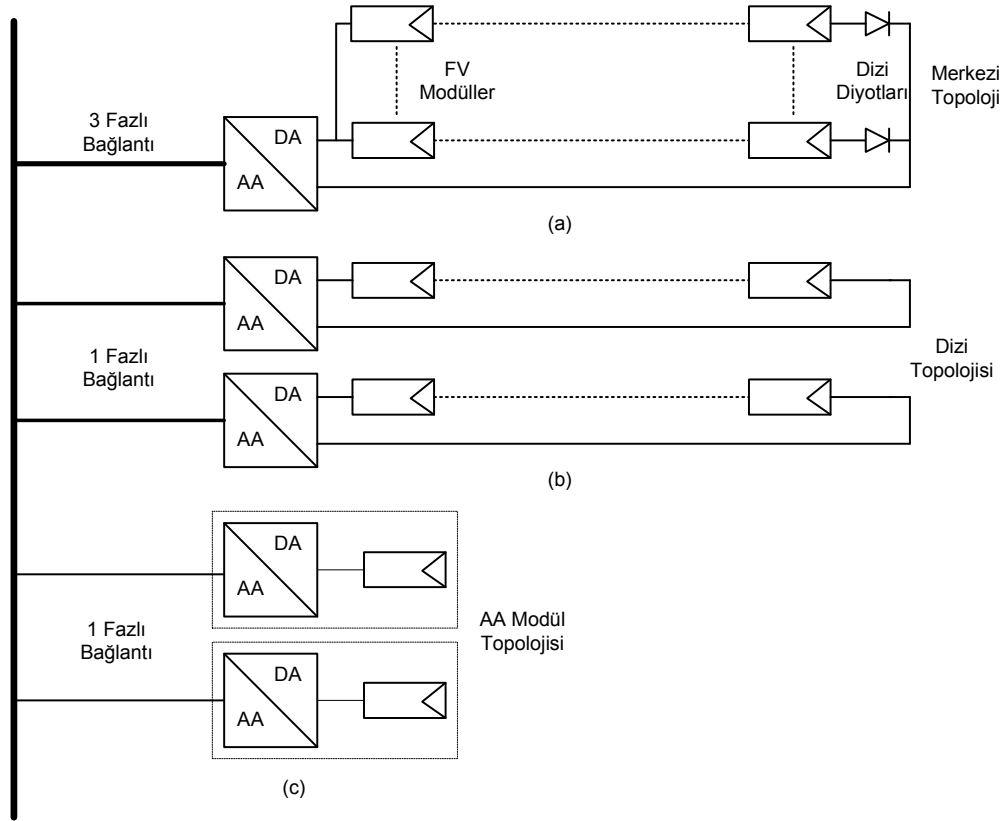
Geçtiğimiz 10 yıl içinde güneş enerjisi uygulamalarında kullanılan eviricilerin maliyetleri %50 oranında azalırken verimleri de %97’nin üstüne çıkmıştır. Günümüzde maliyet ve verim en önemli değerler olsa da elektromanyetik uyumluluk, güvenlik, güvenilirlik ve izleme fonksiyonlarının da önemi her geçen gün artmaktadır. FV sistemlerde evirici bir panele bağlı olabildiği gibi pek çok panele de bağlanabilir. Eviriciye bağlanan FV panel sayısı evirici yapısındaki pek çok bileşenin tespitinde önemli rol oynamaktadır. Bağlanan FV panel sayısına bağlı olarak eviricileri, merkezi eviriciler, dizi eviricileri ve AA modül eviriciler olarak sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 3.18. Eviricilerin tarihi gelişimi

Geçmiş yaklaşımlar–merkezi eviriciler

1980'lerin ortalarında merkezi eviricilerin kullanıldığı büyük güçlü şebeke etkileşimli güneş enerjili sistemler yaygındı. Bu eviriciler FV uygulamaları için optimize edilmeden sürücülerde kullanılan eviricileri temel alınarak geliştirilmişlerdir. Geçmişteki uygulamalar Şekil 3.19 (a)'da gösterildiği gibi çok sayıdaki FV paneli şebekeye bağlamayı temel alır. Bu uygulamalarda FV paneller dizi olarak adlandırılan seri kollara bölünmüştür. Her kolun gerilimi, yükseltme gereksinimini ortadan kaldıracak kadar yüksek olmalıdır. Bu seri kollar yüksek güç üretebilmek için dizi diyotları üzerinden paralel bağlanmışlardır. 1990'ların başlarından itibaren yapılan araştırmalar merkezi eviricilerin, FV paneller ve evirici arasındaki yüksek gerilimli bağlantı kabloları, merkezi MGT nedeniyle oluşan güç kayıpları, dizi diyotlarının güç kaybı ve FV panellerin karakteristiklerinin aynı olmaması gibi bazı ciddi teknoloji eksikliklerini ve dezavantajlarını ortaya çıkarmıştır [Kjaer ve ark., 2002].



Şekil 3.19. FV eviricilere tarihsel bakış a) Geçmişte kullanılan merkezi teknolojisi b) Günümüzde kullanılan dizi teknolojisi c) Günümüzdeki ve gelecekteki AA modül ve AA hücre teknolojileri

Ayrıca büyük bir alana yayılmış büyük güçlü bir FV sistemin eşit miktarda ısınım almaması da bir sorun oluşturmaktadır. Üzerine gölge düşen modül yük etkisi yapar ve çıkış gücünün düşmesine neden olur. 160 panelden oluşan bir sistemde normal ısınım alan panellerin hücre sıcaklıkları 22°C artarken gölgelenen modülün hücre sıcaklığının 70°C 'den fazla ısındığı tespit edilmiştir. Isınan hücreler modül ömrünü azalttığı için bu durum oldukça önemlidir [Kjaer ve ark., 2002].

Merkezi eviricilerde şebeke bağlantı bölümü genellikle hat komütasyonludur ve tristörlerle kurulur. Bu akım harmoniklerinin artmasına ve güç kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için kullanılan özel filtre ve kompanzasyon devreleri düşük olan maliyetlerini artırmaktadır [Al-Nasseri ve Redfern, 2004].

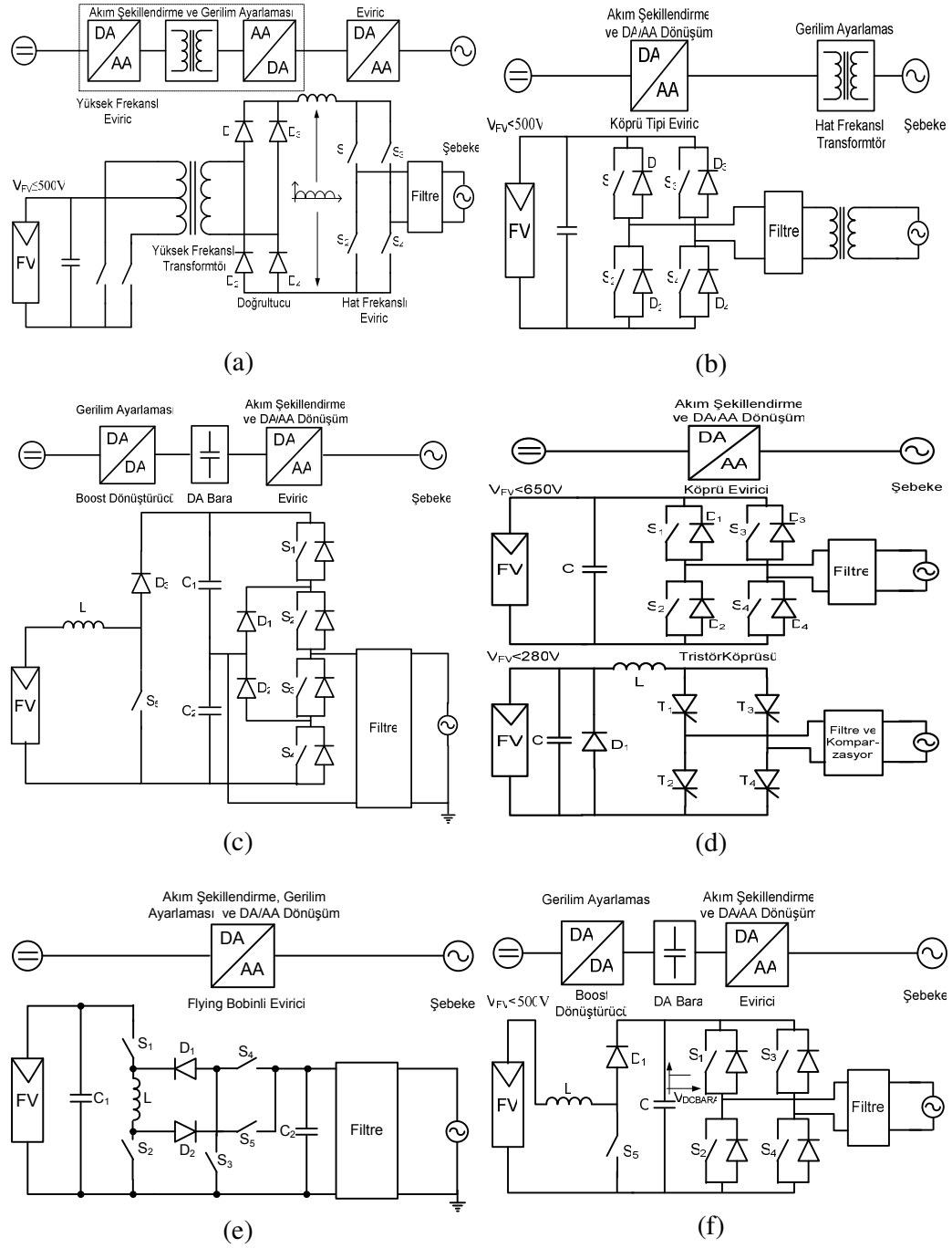
Ayrıca bu eviricilerin müşteri gereksinimlerine göre genişletilebilirlik ve uyarlanabilirliği büyük ölçüde kısıtlıdır.

Günümüz yaklaşımları – dizi eviriciler ve AA modüller

Sistem veriminin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi için 1990'ların ortalarında dizi eviriciler geliştirilmiştir. Dizi eviriciler merkezi eviriciler ile modül birleşimli eviricinin arasında bir çözümdür ve bir dizi FV panelden oluşan bir sistem için tasarlanmıştır [Myrzik ve Calais, 2003]. Dizi kavramı özellikle Almanya'da yoğun bir şekilde incelenmektedir [Al-Nasseri ve Redfern, 2004].

Yarı iletken ve filtre elemanlarındaki gelişmeler evirici veriminin artmasını sağlamış olmasına rağmen günümüzde dizi eviricilerin verimleri %94-%97 aralığındadır. Bu alanda bir miktar daha iyileşme beklenmektedir. Evirici üreticileri daha yüksek verim ve daha düşük maliyet için takım kavramı ve ana-uydu kavramı gibi yeni sistem kavramları üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu kavramlar dizi teknolojisinin avantajları ile merkezi eviricilerin düşük maliyet özelliğini birleştirmektedir. Ayrıca tüm sistemin verimini arttırmakta, harmonik miktarını azaltmakta ve izleme özelliklerini genişletmektedir [Myrzik ve Calais, 2003; Maranda ve ark., 1998].

Şekil 3.18 (b)'de gösterile dizi evirici, merkezi eviricinin küçültülmüşüdür. 2-3 kW güçlere kadar bir miktar FV panel bir eviriciye bağlanır. Giriş gerilimi genellikle 150-450 V aralığındadır. Bu tip uygulamalarda pek çok farklı topoloji kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 3.20'de gösterilmiştir [Kang ve ark., 2005; Myrzik ve Calais, 2003; Yuvarajan, ve ark., 2004; Calais ve ark., 1999]. Dizi diyotlarında oluşan kayıpların önlenmiş olması, her dizi için bağımsız MGT yapılabilmesi, en önemli avantajlarındanıdır. Bu nedenle verimi merkezi eviriciye göre daha yüksektir [Calais ve ark., 2002].



Şekil 3.20. Günümüz evirici topolojileri a)Birden çok güç dönüşüm ünitesi ve yüksek frekanslı transformör kullanılan evirici b)Hat frekanslı transformörlü evirici c)Nötr noktası bağlantılı evirici d)Transformatörsüz alçaltıcı evirici e)Flying bobinli evirici f)Birden çok güç dönüşüm üniteli transformatörsüz evirici

Merkezi eviricilerin dezavantajlarından kaçınmak için modüler sistem teknolojisi geliştirilmiştir. En küçük güçlü şebeke etkileşimli sistem olan AA modül, Şekil 3.19 (d)'de görüldüğü gibi evirici ve FV panelin bir elektrik aygıtında birleştirilmiş halidir. Güçleri genellikle 500 W'dan küçüktür [Myrzik ve Calais, 2003]. Her FV panel kendi eviricisine bağlandığı için uygunsuzluk kayıpları önlenmiş, ayrı ayrı MPPT sayesinde en iyi ayar imkânı sağlanmıştır. Modüler yapısı sayesinde kolaylıkla genişletilebilmektedir [Calais ve Hinz, 1998; Faiman ve ark., 2003; Krampitz ve Kreutzman, 2002].

Tak-kullan özellikleri sayesinde kısıtlı elektrik bilgisine sahip personelin dahi kurulumlarını gerçekleştirmesine imkân vermektedir. Ayrıca DA akım taşıyan iletkenler de en aza indirilmiştir. Diğer taraftan gerilim yükseltme ve daha karışık devre topolojilerinin kullanım gereksinimleri toplam verimlerini azaltırken Watt başına maliyetlerini arttırır. Bununla beraber evirici arızalarında değiştirilmelerinin zor ve pahalı olması, Watt başına maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [Saha ve Sundarsingh, 1996; Maranda ve ark., 1998].

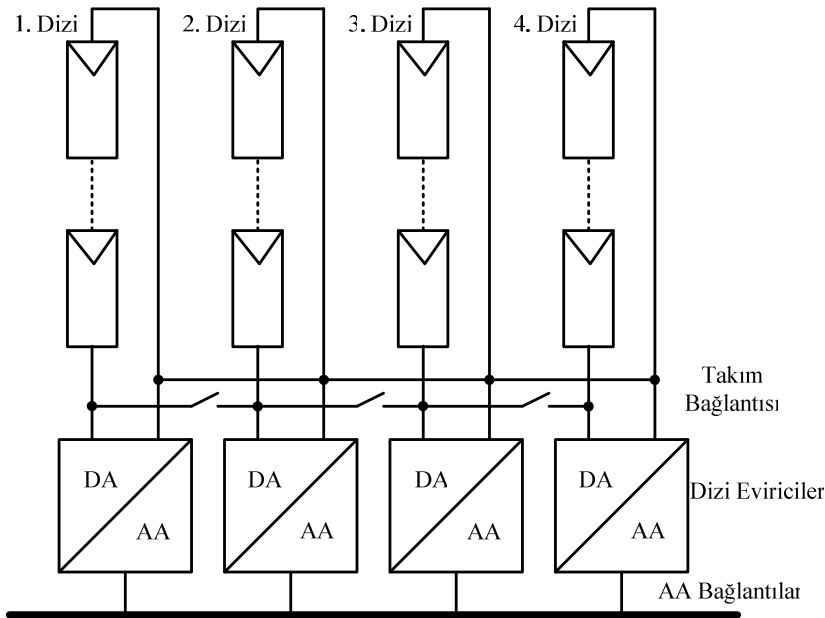
Günümüz uygulamalarında, standartlara uygun yüksek güç kalitesi sağlayabilmek için güç ve gerilim seviyesine göre anahtarlama frekansı aralığı 16-32 kHz olan IGBT/Mosfet'li DA-AA eviriciler kullanılmaktadır [Calais ve ark., 2002].

Gelecek için öngörülen yaklaşımlar – çok dizili eviriciler, AA modüller ve AA hücreler

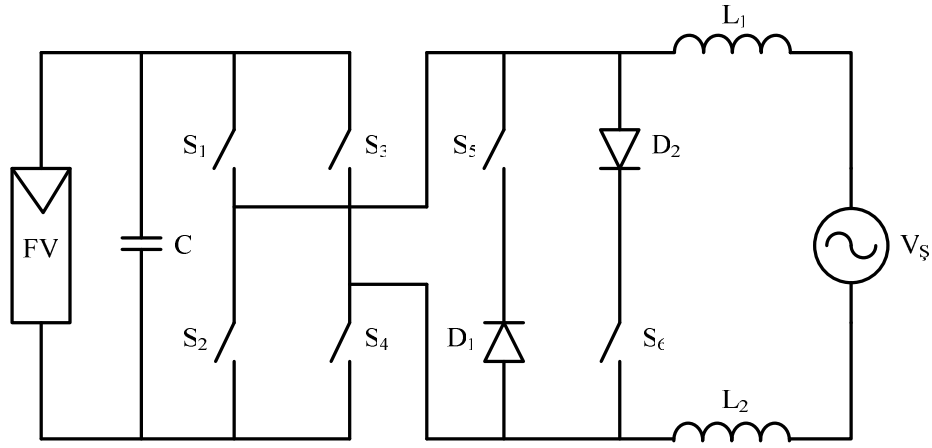
Özellikle kurulum sürelerinin kısa olması, enerji güvenilirliği, yüksek enerji kalitesi, şebeke güvenliği, esnek yapıları, enerji kaynaklarını çeşitlendirmesi gibi üstün özellikleri ve dağıtılmış enerji üretimine uygunluğunun anlaşılması sonucunda ülkeler YEK'lerin yaygınlaşması konusunda teşvikler uygulayarak yatırımcıya destek sağlamaya başlamışlardır [Myrzik ve Calais, 2003; Al-Nasseri ve Redfern, 2004]. Bu durum büyük güçlü eviricilere olan ilgiyi arttırmış ve bazı üreticiler üretim aralıklarını 100-300 kW ve hatta daha büyük güçlere arttırmışlardır. Pek çoğu 3,4 veya daha fazla eviriciyi ana-uydu yöntemi ile birbirine bağlamaktadır. Bu yöntemde

bütün eviriciler DA baraya paralel bağlanır, ana evirici güneş enerjisinin durumuna göre kaç adet uydu eviricinin çalışacağını belirler ve bunları kontrol eder. Bu çalışma ile düşük ışınlım durumlarında tüm eviricilerin çalıştığı duruma göre daha yüksek verim elde edilebilmektedir [Myrzik ve Calais, 2003].

Takım kavramı bir başka FV sistem kavramıdır [Krampitz ve Kreutzman, 2002; Myrzik ve Calais, 2003]. Dizi teknolojisi ile ana-uydu teknolojisini birleştirerek çok eviricili FV sistemlerde ayrı ayrı çalışan eviricilere göre sistem verimliliğini artırır. Bir kaç dizi eviricinin takım kavramında çalışması Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Çok düşük ışınlım durumlarında tüm FV sistem sadece bir eviriciye bağlanır. Işımanın artması ile her eviricinin anma yüküne yakın bir yük ile çalışması sağlanıncaya kadar FV sistem küçük dizilere ayrılır. Bu durumda her dizi kendi MGT denetleyicisi ile beraber çalışır. Düşük güneş ışıması altında eviriciler ana-uydu durumunda çalışmaktadır. Benzetim sonuçları %4 daha fazla enerji elde edildiğini göstermiş, uygulama sonuçları ile de benzetim sonuçlarının aşılabileceği belirlenmiştir [Myrzik ve Calais, 2003].



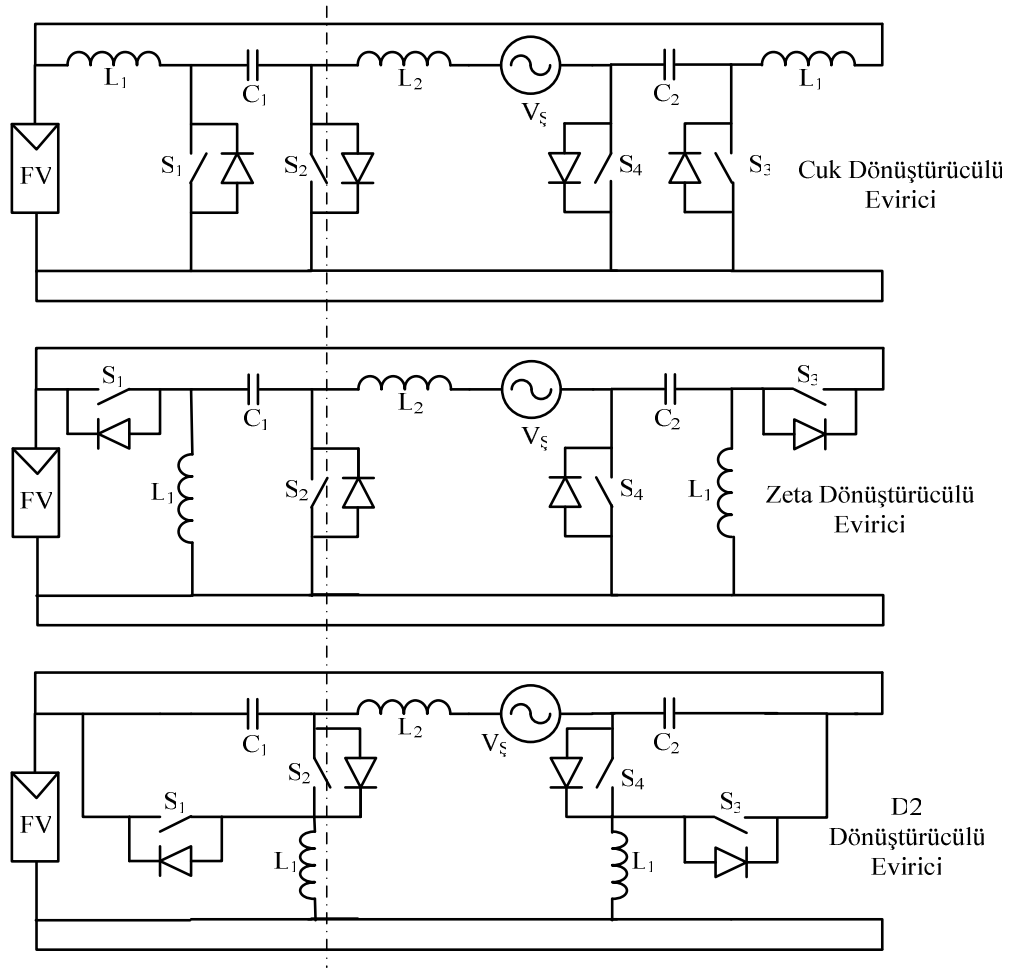
Şekil 3.21. Takım kavramı



Şekil 3.23. HERIC evirici

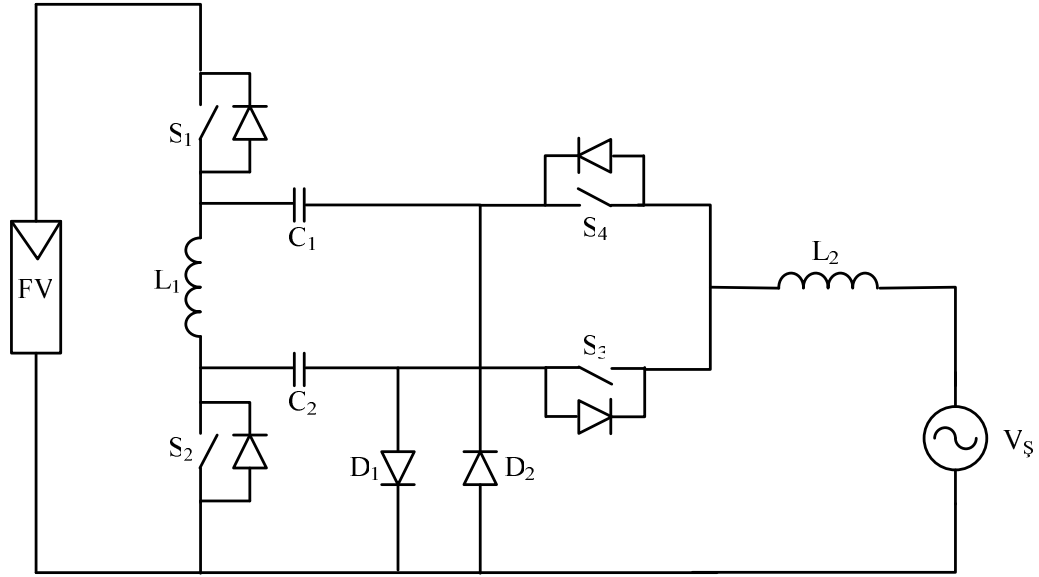
Bu topolojinin diğer bir avantajı ise çift kutuplu anahtarlama metodunun FV uçlarında şebeke frekansında ve maksimum gerilimi şebeke geriliminin yarısı olan sinusoidal bir gerilime neden olmasıdır.

FV evirici endüstrisindeki en önemli hedeflerinden birisi özellikle watt başına maliyetleri hala yüksek olan küçük dizi ve modüle yönelik eviricilerde maliyetlerin düşürülmesidir. Bu eviricilerin verimleri ve maliyetleri kaskat bağlı ikinci güç dönüştürücüsünün bağlanmasından veya düşük FV gerilimini şebeke gerilimi seviyesine yükseltmek için transformatör kullanılmasından olumsuz etkilenmektedir. Bu bağlantılardan kaçınmak için yeni topolojilerde sunulmuştur [Myrzik, 2001]. Bu topolojiler iki azaltan-artıran (cuk, zeta, D2 veya bunların yüksek frekans transformatörlü çeşitleri gibi) güç dönüştürücüsünün paralel-seri bağlantısını temel alır. Örnekler Şekil 3.24’de gösterilmiştir. Yaygın kullanılan PWM yöntemleri ile anahtarlar kontrol edilebilir. Doğrusal kontrol fonksiyonunun gerçekleştirilebilmesi için çıkış bobini sürekli yük akımını taşıırken giriş bobininin kesintili iletim modunda çalışması gereklidir. Yarı iletkenler ve giriş bobini üzerindeki yüksek gerilim ve akım nedeniyle bu eviricilerin verimleri dizi eviricilerden yaklaşık %1,5 daha düşüktür. Bu eviricilerin en önemli avantajı manyetik malzemelerin %40 oranında azaltılmasıdır. Bu maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu topolojiler FV geriliminin şebeke geriliminden düşük olduğu uygulamalar için uygundur.



Şekil 3.24. Cuk, Zeta ve D2 güç dönüştürücülü topolojiler

Diğer transformatörsüz topolojiler gibi bu topolojide şaseye göre FV geriliminde dalgalanmalara neden olur. Şaseye göre FV geriliminin sabit kalmasını sağlayan bir topoloji geliştirilmiştir [Myrzik ve Calais, 2003]. Yeni topoloji, aynı güç dönüştürücüsünden iki adet (2 adet Cuk, 2 adet Zeta veya 2 adet D2 güç dönüştürücüsü) bağlamak yerine Şekil 3.25’de gösterildiği gibi Cuk ve Zeta güç dönüştürücüsünün seri-paralel bağlanması ile geliştirilmesidir. Çıkış akımının pozitif alternansını üretebilmek için evirici Zeta güç dönüştürücüsü olarak çalışmakta iken çıkış akımının negatif alternansında evirici Cuk güç dönüştürücüsü olarak çalışmakta ve Cuk güç dönüştürücüsünün çıkış gerilimini ters çevirme özelliğinden faydalanılmaktadır. Ayrıca bu topolojinin rezonans anahtarlama da imkan sağlayan diğer tipleri gösterilmiştir [Myrzik ve Calais, 2003].



Şekil 3.25. Şaseye göre FV geriliminin sabit kalmasını sağlayan topoloji

Bunlardan başka büyük güçlü bir FV sistemin bir DA-AA eviriciye bağlandığı AA hücre eviriciler üzerinde de araştırmalar devam etmektedir. Bu sistemle ilgili asıl zorluk, metre kareye 100 W ve 0,5~1,0V gibi çok düşük gerilimi yüksek verimle şebekeye yakın bir değere yükseltmektir. Bunun için tamamen yeni güç dönüştürücüsü tasarımları gereklidir [Kjaer ve ark., 2005; Wilk ve ark., 2002; Riatsch ve ark., 1997].

Bu noktaya kadar incelenen şebeke etkileşimli evirici topolojilerinin güç seviyesi, güç kalitesi, verim, maliyet, boyut gibi özellikleri Çizelge 3.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. Evirici topolojilerinin özellikleri

Kriterler	Evirici Topolojisi				
	Geçmiş	Günümüz		Gelecek	
	Merkezi Eviriciler	Dizi Eviriciler	AA Modüller	AA Hücreler	Çok Dizili Eviriciler
Güç	MW mertebesinde	0,7-4kW	<500W	<500W	100-300kW
Güç Kalitesi	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Verim	<90	%94-%97	%95-%98	%95-%98	%94-%97
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek	Orta	Orta
Boyut	Büyük	Orta	Küçük	Küçük	Büyük
Şebeke İle İzolasyon	Orta gerilimli (OG) şebekeye bağlantıda zorunlu	İsteğe ve FV panel sayısına bağlı	Yok	Yok	İsteğe ve FV panel sayısına bağlı
FV Karakteristiğine Uygunluk	Kısmen Uygun	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
MPPT Yöntemi	Merkezi	Ayrı	Ayrı	Ayrı	Ayrı
Anahtarlama Frekansı	Düşük (<3 kHz)	Orta (~10kHz)	Yüksek (16-32 kHz)	Yüksek (16-32 kHz)	Orta (~10kHz)
Anahtarlama Elemanı	Tristör, GTO	IGBT, MOSFET	IGBT, MOSFET	IGBT, MOSFET	IGBT
Güç artırımı	Kısıtlı	Kısıtlı	Kolay	Kolay	Kolay

4. BULANIK MANTIK VE BULANIK SİNİRSEL DENETLEYİCİLER

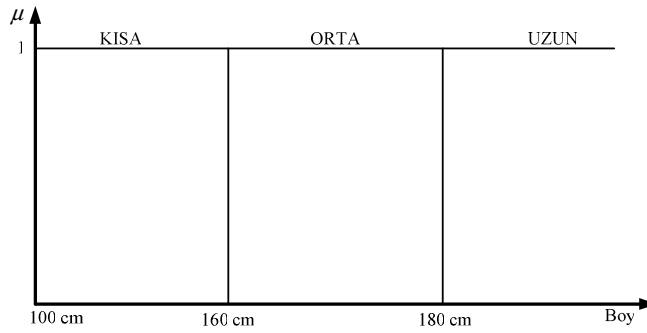
Diferansiyel denklemler gibi geleneksel matematiksel araçlar kullanılarak sistemlerin modellenmesi kesin olmayan veya iyi tanımlanmamış sistemler için uygun değildir. Bunun yanında “EĞER-ÖYLE İSE” bulanık kurallarından oluşan bulanık çıkarım sistemi insan tecrübesinin niteleyici bakış açılarını ve muhakeme süreçlerini tam niceliksel analiz kullanmadan modelleyebilir. Bulanık modelleme ve bulanık tanımlama ilk önce Takagi ve Sugeno tarafından incelenmiş [Takagi ve Sugeno, 1985] kontrol, tahmin (kestirim) ve çıkarım (anlam çıkarma) gibi alanlarda pek çok uygulaması gerçekleştirilmiştir [Jang, 1993]. Bununla beraber bu yaklaşımın daha iyi anlaşılması ve açıklanması gereken bazı yönleri bulunmaktadır:

- İnsan bilgi veya tecrübesini bulanık kurallarına ve/veya veri tabanına dönüştürmek için standart bir metot yoktur.
- Çıkış hatasının en aza indirilerek en yüksek performansın elde edilebilmesi için üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi ve biçimlendirilmesi için etkin yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

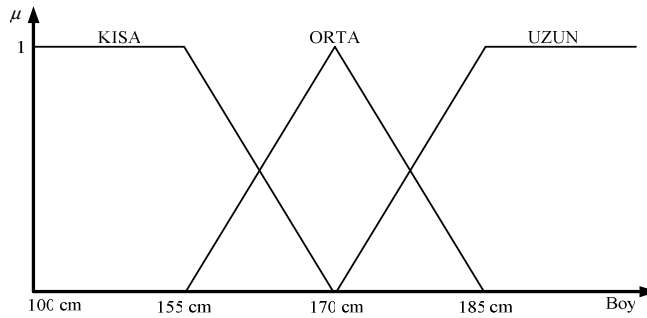
Bu nedenlerle bir uygulama için yüksek performanslı bir bulanık mantık denetleyici tasarlamak her zaman kolay olmamakta ve bazen uzun bir süreç gerektirmektedir. Hatta bu uzun süreç sonunda dahi en iyi kurallar veya en uygun üyelik fonksiyonların bulunamaması ihtimali de her zaman bulunmaktadır. Bu işlemleri kolaylaştırabilmek için yapılarına öğrenme algoritmaları eklenmiş uyarlamalı bulanık mantık denetleyici sistemler geliştirilmiştir. Bu tip uyarlamalı modeller mevcut bilgiye dayanan yöntemlerdir. Eldeki verilerden öğrenme yeteneğine sahip olan yapay sinir ağlarının bulanık mantık denetleyicilerin uyarlanmasında kullanımı yoğun ilgi görmüş ve farklı alanlarda gerçekleştirilen uygulamalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu alandaki ilk tasarımlar bulanık sinirsel sistemler (neuro fuzzy systems veya fuzzy neural systems) olarak adlandırılmıştır [Elmas, 2003].

4.1. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, ilk defa 1965’de bulanık kümelerin Prof. Zadeh tarafından sunulmasıyla ortaya çıkmış matematiksel bir düşüncedir. Geleneksel kümeler kesin sınırlara sahiptir ve evrensel kümenin her bir elemanına 0 veya 1 değerini atayarak, o elemanın kendisine ait olup olmadığını belirler. 1 değerini alan nesne o geleneksel kümenin elemanı iken 0 değerini alan geleneksel kümenin elemanı değildir. Bulanık kümelerde ise bir eleman birden fazla kümenin elemanı olabilirken üyelik (aitlik) derecesi de 0-1 aralığında değişmektedir [Bose, 1994; Chang ve Zadeh, 1972]. Gerçekte üyelik derecesi adına üyelik fonksiyonu denilen bir fonksiyon ile tanımlanır. Bulanık küme tarafından tanımlanan üyelik fonksiyonu, ilgili kümeye üyelik derecesi büyük olan elemanlar için 1’e doğru büyüyen, üyelik derecesi küçük olan elemanlarda 0’a doğru küçülen üyelik dereceleri vermektedir [Zadeh, 1977]. Boy uzunlukları ile ilgili kümeler klasik ve bulanık kümeler ile sırasıyla Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Boy uzunlukları klasik kümeleri



Şekil 4.2. Boy uzunlukları bulanık kümeleri

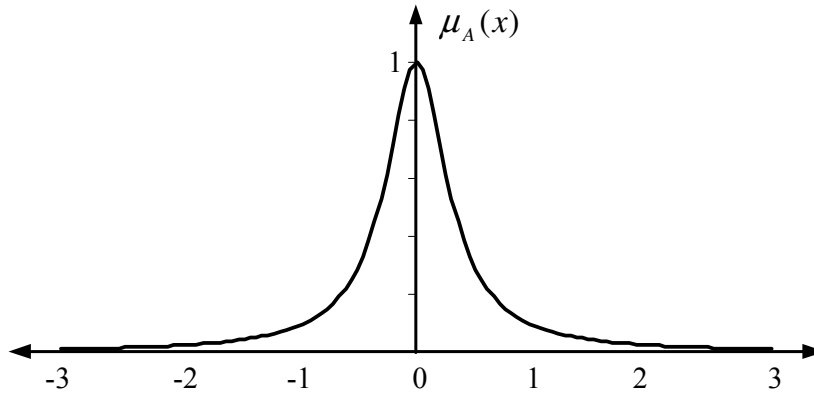
Örnek olarak X evrensel kümesinde tanımlanan, A bulanık kümesi için üyelik fonksiyonu μ_A şöyle ifade edilmektedir [Elmas, 2003]

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (4.1)$$

μ_A üyelik fonksiyonu $[0,1]$ kapalı aralığında gerçek bir sayıyı göstermektedir. Örnek olarak gerçek sayılar kümesinde üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)$ Eş. 4.2 ile tanımlanabilir.

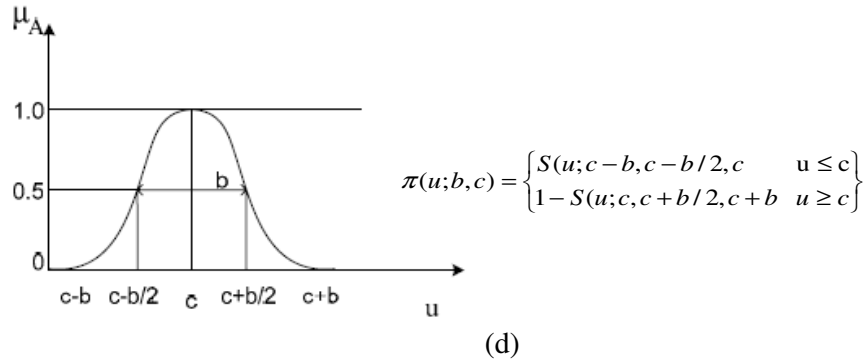
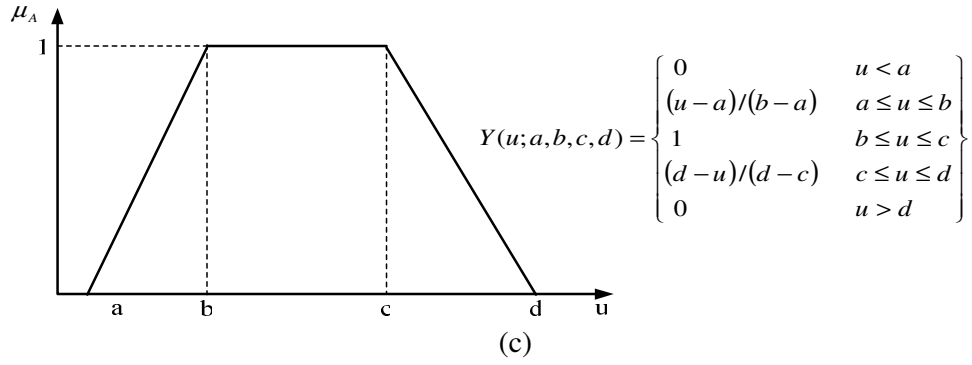
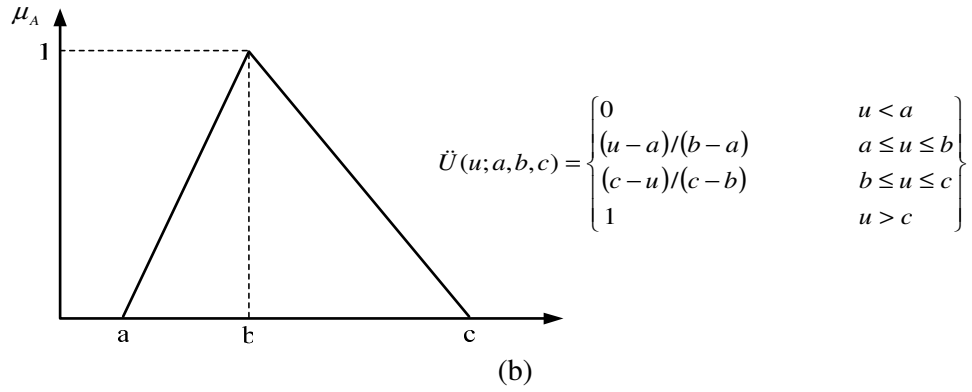
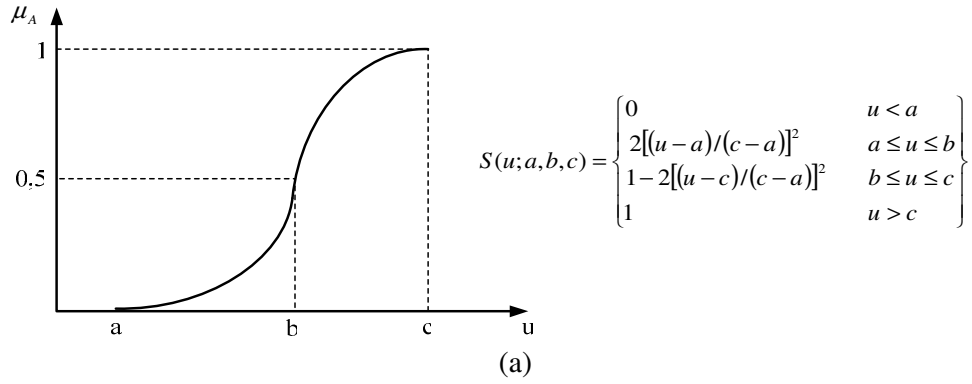
$$\mu_A(x) = \frac{1}{1+10x^2} \quad (4.2)$$

Bu fonksiyonun eğrisi Şekil 4.3’de görülmektedir.



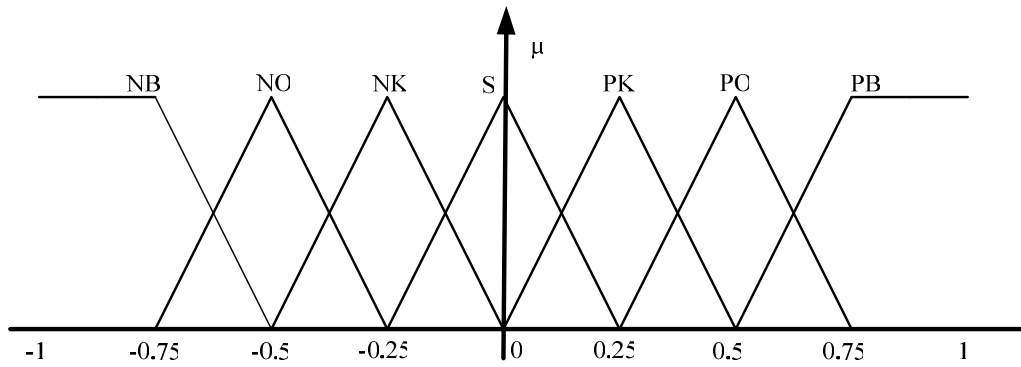
Şekil 4.3. Örnek üyelik fonksiyonu eğrisi

Bulanık mantıkta bir kümede bir fiziksel değişkenin üyelik derecesini tanıtmak için kullanılan üyelik fonksiyonları yukarıda gösterildiği gibi farklı şekillerde olabilir. Ancak uygulamada en çok üçgen, π , yamuk ve S fonksiyonu kullanılmaktadır [Ardam, 2002]. Şekil 4.4’de en çok kullanılan üyelik fonksiyonlarının şekilleri ve matematiksel ifadeleri görülmektedir.



Şekil 4.4. En çok kullanılan üyelik fonksiyonları a)S üyelik fonksiyonu b)Üçgen üyelik fonksiyonu c)Yamuk üyelik fonksiyonu d) π üyelik fonksiyonu

Üyelik fonksiyonları genellikle negatif büyük, negatif orta, negatif küçük, sıfır, pozitif küçük, pozitif orta, pozitif büyük gibi dilsel etiketlerle tanımlanmaktadır. Güç elektroniği uygulamalarında çoğunlukla giriş ve çıkışlar için 3, 5 veya 7 adet üyelik fonksiyonu belirlenmektedir. En yaygın kullanılan 7 etiketli üyelik fonksiyonu Şekil 4.5’de görülmektedir.

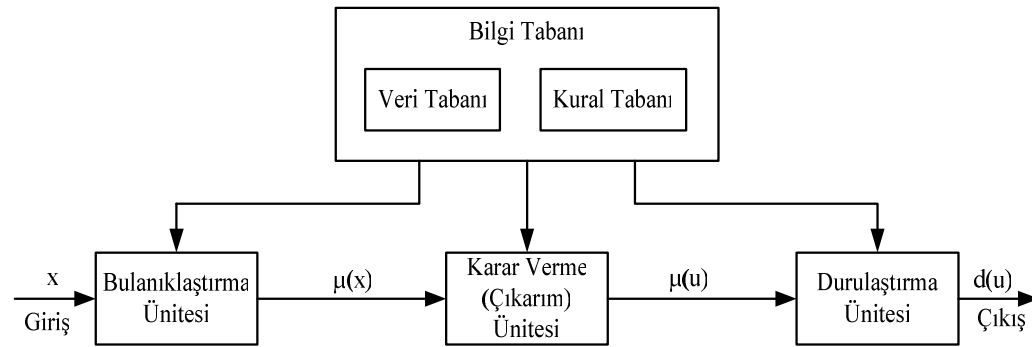


Şekil 4.5. 7 Etiketli üyelik fonksiyonu

4.2. Bulanık Mantık Denetleyiciler

Bir denetim sistemi, fiziksel sistemin tepkisini veya davranışını denetleyen ve istenilen duruma getirip minimum hatada tutarak kararlı biçimde çalışmasını sağlamak amacıyla bir araya getirilmiş bileşenlerden oluşmaktadır. Geleneksel denetim sistemleri denetlenecek sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymaktadır. Ancak bazı sistemlerin matematiksel modellerinin elde edilmesi zor iken bazılarının matematiksel modelleri ise doğrusal olmayan çok sayıda değişken içeren karmaşık bir denklem olabilir. Böyle bir sistemin denetimi yapılması gerektiğinde genellikle sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duymayan uzman bir kişinin deneyimlerinden faydalanılması tercih edilir. Uzman kişi günlük hayatta kullanılan az, çok, biraz az, biraz çok gibi dilsel niteleyiciler kullanarak gerçekleştirdiği esnek bir denetim yaklaşımı ile sistemin denetimini gerçekleştirebilmektedir. Bulanık mantık denetleyici (BMD), insanın sezgilerini ve tecrübelerini kullanarak sergilediği bu denetim işlemini bulanık küme teorisi kullanarak taklit etmektedir.

BMD tasarımında öncelikle giriş ve çıkış değişkenleri belirlenir. Bulanık alt kümelerin her bir değişkeni için belirli bir aralık tanımlanır ve bu bulanık alt kümenin her birine dilsel bir etiket atanır. Bu bulanık alt kümelerin her biri için bir üyelik fonksiyonu seçilir. Giriş değişkenlerine ait bulanık alt kümeler ile çıkış değişkenine ait bulanık alt kümeler arasındaki ilişkiler yani bulanık kurallar belirlenir. Giriş değişkenlerinin $[-1,1]$ aralığında olması için gerekli ölçeklendirme katsayıları belirlenir. Genel olarak bir BMD'nin temel yapısı Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. BMD temel yapısı

Görüldüğü gibi BMD 4 bölümden oluşmaktadır. Burada x BMD girişini, $\mu(x)$ bulanıklaştırılmış giriş değerini, $\mu(u)$ çıkarım işlemi sonucu elde edilen bulanık çıkış değerini ve $d(u)$ ise çıkış değerini göstermektedir. Bulanıklaştırma ünitesi denetleyici girişine uygulanan keskin sinyalleri bulanıklaştırarak onları dilsel değişkenler ile ifade edilir hale dönüştürmektedir. Bilgi tabanı, veri tabanı ve kural tabanı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Veri tabanı kullanılan bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarını içerirken kural tabanı giriş ve çıkış değişkenlerine ait bulanık alt kümeler arasındaki eşleştirme için gerekli olan kuralları içerir. Karar verme (çıkarım) ünitesi, insanın düşünerek karar verme yeteneğini taklit ederek istenilen sonucun elde edilmesi için çıkarım yapmaktadır. Durulaştırma ünitesi ise karar verme ünitesinden elde edilen bulanık değerleri gerçek değerlere dönüştürerek BMD'nin çıkış sinyalini üretir.

4.2.1. Bulanıklaştırma ünitesi

Bulanıklaştırma, sistemden alınan giriş bilgilerini sembolik değerlere dönüştürme işlemidir. Üyelik fonksiyonlarından faydalanılarak giriş bilgilerinin ait olduğu bulanık alt kümeyi veya kümeleri ve her alt küme için üyelik derecelerini tespit ederek, giriş sinyaline küçük, en küçük gibi dilsel etiketler atar. Sistemin verimli çalışmasını sağlamak amacıyla en uygun üyelik fonksiyonu (üçgen, yamuk, çan eğrisi vb.) kullanılabilir [Elmas, 2003].

4.2.2. Bilgi tabanı

Bilgi tabanı, karar verme biriminin kural tabanının da kullandığı bilgileri aldığı veri tabanı ve denetim amaçlarına uygun dilsel denetim kurallarının bulunduğu kural tabanı olmak üzere iki bölüme ayrılabilir. Genel olarak uygulama dönemindeki bilgilerden ve denetim amaçlarından oluşur. Dilsel denetim kurallarının tanımlanmasında ve bulanık mantık denetimdeki bulanık bilgi işleme süresince yararlanır. Kurallar kümesi denetim amaçlarını ve denetim stratejisini belirler.

Denetimi yapılan sistemle ilgili, bulanıklaştırma, bulanık çıkarım, durulaştırma işlemleri sırasında gerek duyulan üyelik fonksiyonu ve kural tablosu bilgileri bilgi tabanından kullanıma sunulmaktadır.

Girişler ve çıkışlar arasındaki bağlantılar, kural tabanındaki kurallar kullanılarak sağlanır. A ve B giriş değişkenleri, C ise çıkış değişkeni olan bir sistem için

EĞER $A=x_1$ ve $B=x_2$ ise O HALDE $C=z$

şeklinde bir kural A ve B 'nin aldığı değerlere göre C çıkış değişkeninin bulanık değerini belirlemektedir. Çizelge 4.1'de örnek bir kural tablosu görülmektedir.

Çizelge 4.1. Kural tablosu

		X ₁						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
X ₂	NB	NB	NB	NB	NB	NO	NK	S
	NO	NB	NB	NB	NO	NK	S	PK
	NK	NB	NB	NO	NK	S	PK	PO
	S	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
	PK	NO	NK	S	PK	PO	PB	PB
	PO	NK	S	PK	PO	PB	PB	PB
	PB	S	PK	PO	PB	PB	PB	PB

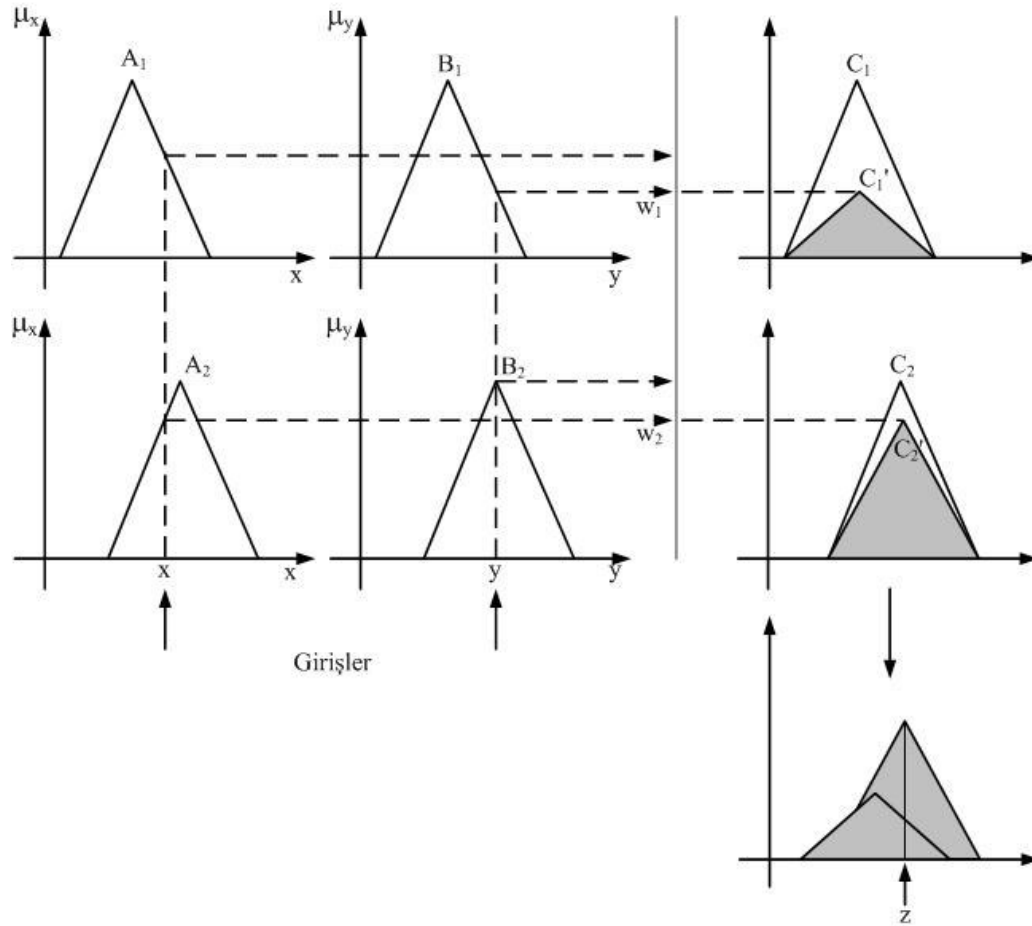
4.2.3. Karar verme birimi

Karar verme birimi, çıkarım motoru olarak da adlandırılır. Bu ünite insanın karar verme ve çıkarım yapma yeteneğini taklit ederek bulanık kavramları işler ve çıkarım yaparak gerekli denetim sinyalini belirler. Burada birçok bulanık işlem yapılarak insan beyninin bir benzetimi yapılamaya çalışılmaktadır. BMD içindeki bu benzetim bulanık içermeye, bileşke kural çıkarımları ve cümle bağlayıcıları ile ilgilidir. Genel olarak bir bulanık denetim kuralı bir bulanık ilişkidir ve bulanık içermeye ile açıklanır. Bulanık mantıkta bulanık içermeyi tanımlamanın birçok yolu vardır ve BMD içinde hangi tipin kullanılacağı daha çok sezgisel olarak belirlenir. Bulanıklaştırma işlemiyle sayısal değerlerden, sembolik değerler çıkarılmıştır. Bulanık çıkarımda ise denetimi yapılan sistemi kullanan uzman operatörün kullandığı dilsel niteleyiciler ve kurallar kullanılarak bulanık sonuç elde edilir. BMD'nin beyni olarak ifade edilebilecek olan karar verme birimi bulanık çıkarım işlemini gerçekleştirirken veri tabanı ve kural tabanını kullanmaktadır. Veri tabanı, bulanık kümelerin giriş çıkış değişkenleri ile üyelik fonksiyonlarını, kural tabanı ise bulanık kural cümlelerini içerir [Mendel, 1995; Elmas, 2003].

Bulanık çıkarım için farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Aşağıda en çok kullanılan 4 yöntem verilmiştir.

Max-Dot yöntemi

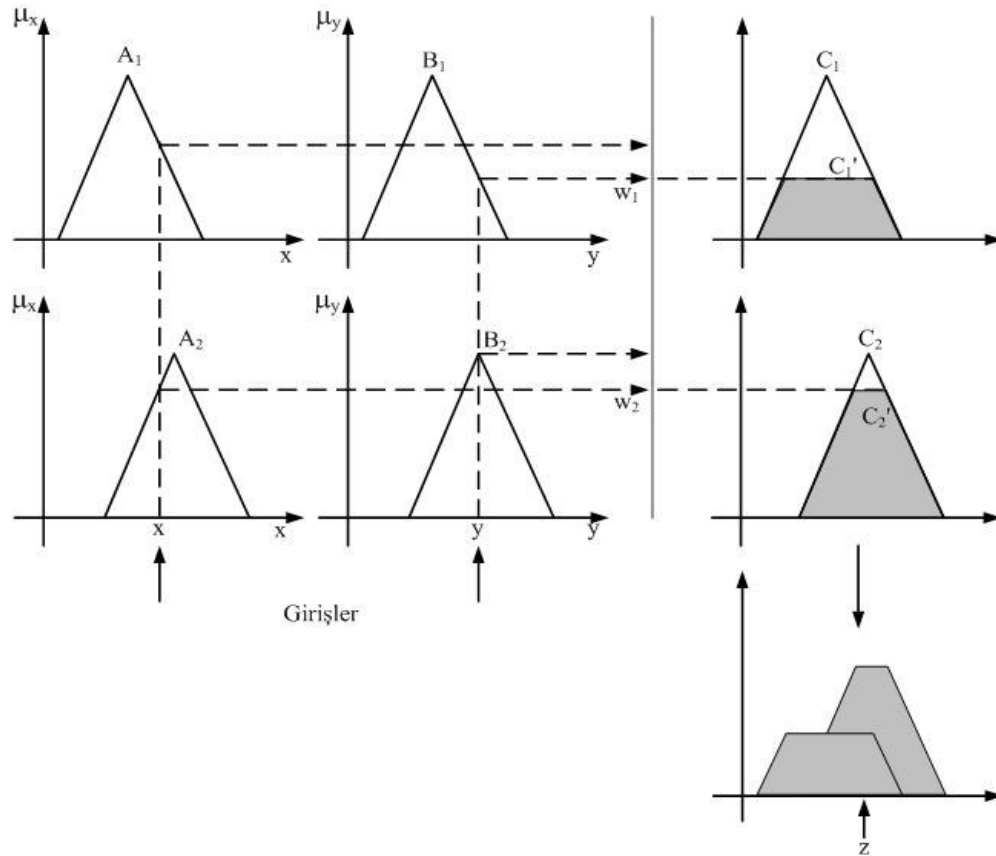
Larsen'in cebirsel çarpım işlemi olarak da adlandırılır. Her bir giriş değeri, ait olduğu üyelik işlevindeki üyelik derecesine bağlı olarak ilgili bulanık kümeyi yeniden ölçeklendirilir. Çıkış değeri tüm girişler için yeniden ölçeklendirilmiş bu bulanık kümeler içerisindeki en büyük değer alınarak bulunur. Max-Dot çıkarım Şekil 4.7'de gösterilmiştir [Lee,1990; Elmas, 2003].



Şekil 4.7.Max-Dot çıkarım

Min-Max yöntemi

Mamdani yöntemi olarak da bilinir. Her bir giriş değeri için ait olduğu üyelik fonksiyonundaki üyelik derecesine bağlı olarak ilgili bulanık kümenin üyelik değerinin üstündeki kısmı kesilir. Çıkış değeri, elde edilen bu bulanık mantık kümelerine genellikle ağırlık ortalaması yönteminin uygulanmasıyla bulunur. Şekil 4.8’de Min-Max çıkarım yöntemi gösterilmiştir.

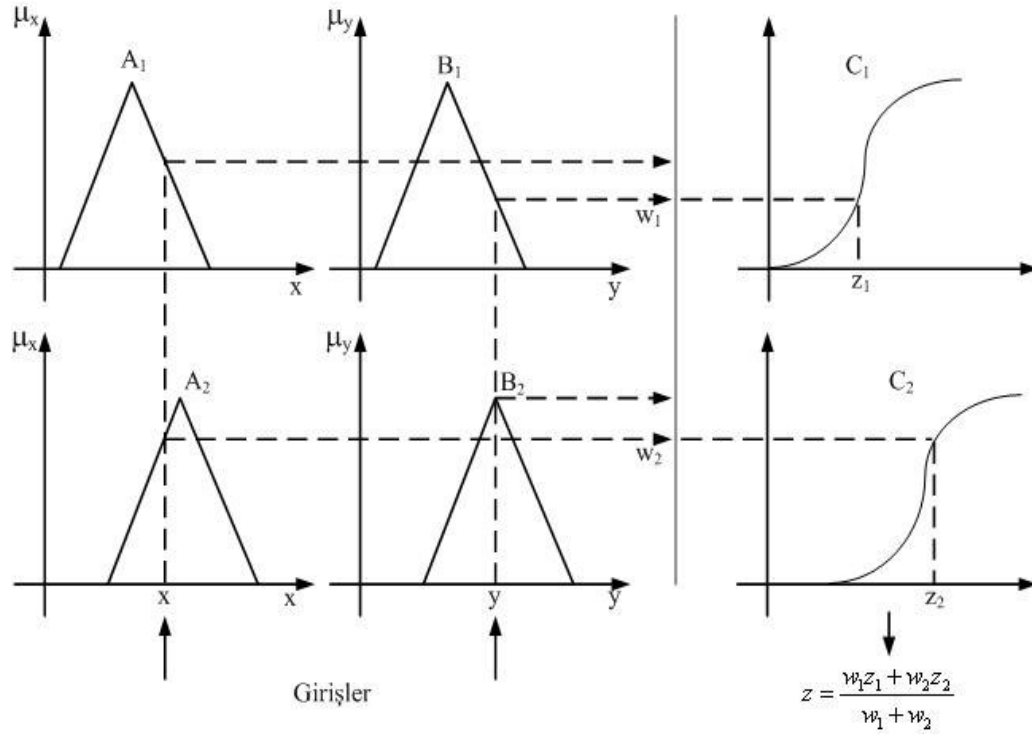


Şekil 4.8. Min-Max çıkarım yöntemi

Tsukamoto yöntemi

Bu yöntemde çıkış üyelik fonksiyonu tek yönlü bir fonksiyon olarak seçilirken girişlerin tek yönlü fonksiyon olmasına gerek yoktur. Çıkış değeri her bir kuralın

keskin çıkış değerinin ağırlık ortalaması alınarak bulunur. Tsukumato çıkarım yöntemi Şekil 4.9'da görülmektedir (Tsukumato, 1979; Elmas, 2003].



Şekil 4.9. Tsukumato çıkarım yöntemi

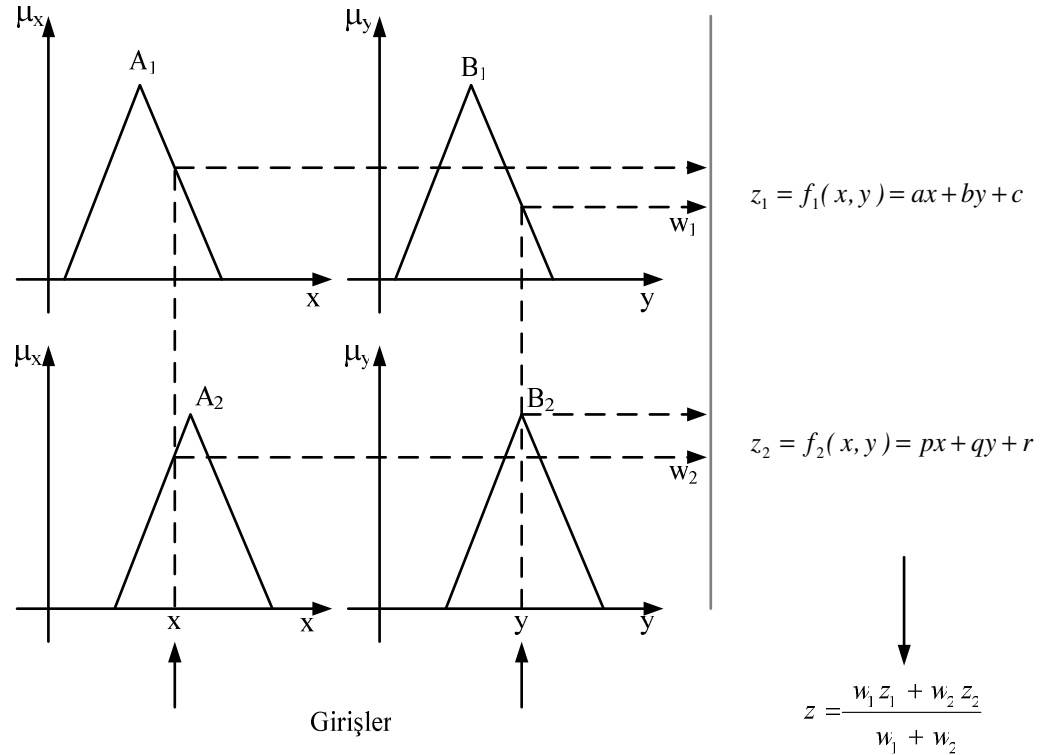
Takagi-Sugeno yöntemi

Her bir kuralın çıkışı giriş değerlerinin doğrusal birleşimiyle bulunur. Keskin çıkış değeri ise ağırlık ortalaması alınarak bulunur (Jang, 1992). Bu yöntem Takagi-Sugeno tarafından kıvrımlı bir hata değeri için otomobilin yavaşça hareketini sağlamak ve otomobilin bir garaja kendi kendini park etmesini sağlamak için uygulanmıştır [Lee, 1990]. Takagi-Sugeno çıkarım Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

4.2.4. Durulaştırma birimi

Karar verme biriminin sonucu bulanık bir kümedir. Bu değer sisteme uygulanabilmesi için giriş değeri gibi sayısal değere dönüştürülmesi gerekir. Bu

işleme durulaştırma denir [Lee, 1990]. Durulaştırma birimi karar verme biriminden gelen bulanık ifadeleri bulanık olmayan ve gerçek hayatta kullanılabilecek değerlere dönüştürmektedir. Durulaştırma işleminde değişik metotlar kullanılmaktadır. En çok kullanılan durulaştırma yöntemleri aşağıda açıklanmıştır [Elmas, 2003].



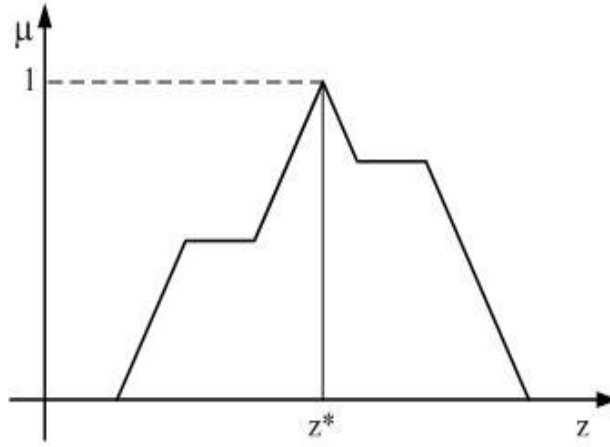
Şekil 4.10. Takagi-Sugeno çıkarım

Maksimum üyelik yöntemi

Yükseklik metodu olarak da adlandırılmaktadır [Lee, 1990]. Çıkış işaretinin değeri en büyük üyelik derecesinin değerine eşittir ve Eş. 4.3 ile ifade edilir.

$$\mu_c(z^*) \geq \mu_c(z) \quad z \in Z \quad (4.3)$$

Z^* çıkış değerinin elde edilişi Şekil 4.11'de görülmektedir [Elmas, 2003].

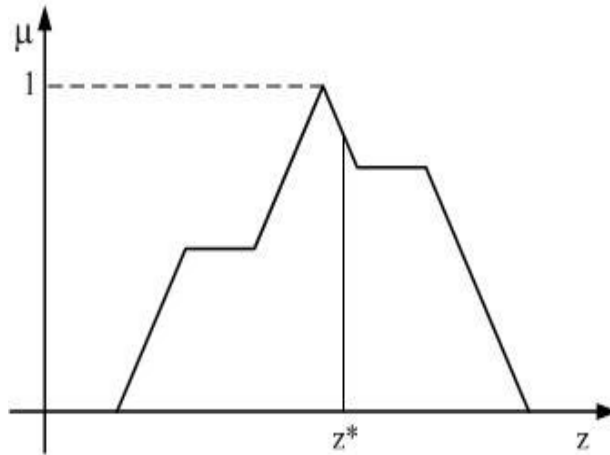


Şekil 4.11. Maksimum üyelik yöntemi

Ağırlık merkezi yöntemi

Şekil 4.12’de gösterilen ve alan merkezi olarak da bilinen bu yöntem en yaygın kullanılan durulaştırma yöntemlerinden birisidir. Eş. 4.4’de matematiksel olarak verilmiştir [Sugeno, 1985].

$$z^* = \frac{\int \mu_{\tilde{C}}(z) \cdot z dz}{\int \mu_{\tilde{C}}(z) dz} \quad (4.4)$$

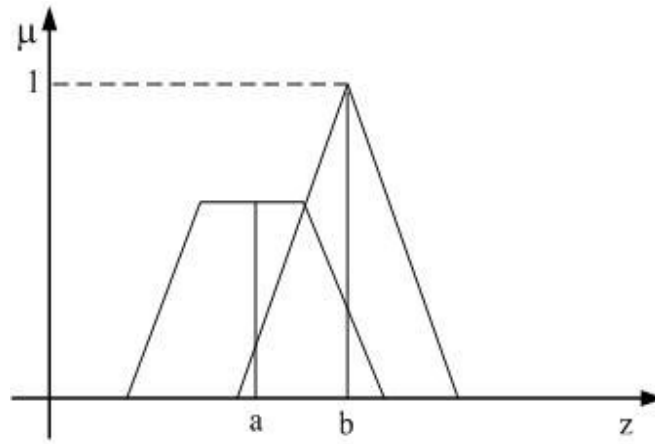


Şekil 4.12. Ağırlık merkezi yöntemi

Ağırlık ortalaması yöntemi

Bu yöntemde girişlerden elde edilen bütün bulanık değerler ile üyelik değerleri kullanılarak durulaştırma yapılır. Sayısal değer Eş. 4.5 kullanılarak bulunur. Çıkış sayısal değerinin bulunuşu Şekil 4.13’de görülmektedir.

$$z^* = \frac{\sum \mu_{\tilde{C}}(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu_{\tilde{C}}(\bar{z})} \quad (4.5)$$

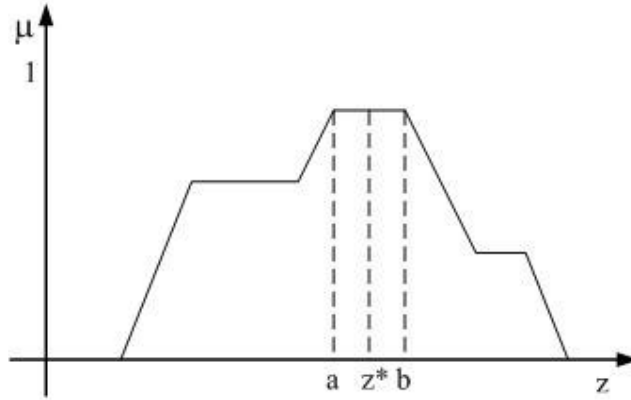


Şekil 4.13. Ağırlık ortalaması yöntemi

Mean-Max üyelik yöntemi

Maksimumların ortalaması olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem maksimum üyelik derecesi tek bir nokta olmayıp Şekil 4.14’deki gibi düz olabilen sistemler için kullanılabilir. Eş. 4.6 kullanılarak çıkış işareti hesaplanabilir.

$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (4.6)$$



Şekil 4.14. Mean-Max üyelik yöntemi

4.3. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları (YSA), gizemli ve karmaşık bir hesaplayıcı olan insan beyninin öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yeteneklerini taklit etmek için geliştirilmiş bilgisayar sistemleridir. YSA'lar, insanlar tarafından gerçekleştirilmiş örnekleri kullanarak olayları öğrenebilen ve daha sonra ortaya çıkan durumlarda gerekli ilişkileri kurarak kendi tepkisini belirleyebilen sistemlerdir. YSA'lar, insan beyninin aktivitelerini taklit etmek için tasarlandıklarından biyolojik sinir ağları ve beynin işleyiş kurallarından esinlenilerek geliştirilmişlerdir.

YSA üzerine ilk çalışma 1940'lı yıllarda yapılmış ve 1943 yılında McCulloch ve Pitts tarafından YSA sisteminin matematiksel modeli sunulmuştur [McCulloch ve Pitts, 1943]. Bu araştırmacılar herhangi bir hesaplanabilir fonksiyonun sinir ağları ile hesaplanabileceğini ileri sürmüş, mantıksal “VE” ve “VEYA” işlemlerinin gerçekleştirilebildiğini göstermişlerdir. Bu ağ yapılarının uygun tanımlanması halinde öğrenme yeteneğinin de kazandırılabilceğini belirtmişlerdir. 1949 yılında Hebb “Organisation of Behavior” adlı kitabında sinir hücreleri arasındaki bağlantı şiddetlerini değiştirmeden bağlantı sayılarının değiştirilmesi ile sinir ağının eğitilebileceğini savunmuş ve uyum sağlayan ağlar için temel oluşturan matematiksel bir yaklaşım önermiştir. Daha sonra öğrenme yeteneğini başarılı biçimde açıklayan ilk modellerden birisi olan Perceptron modeli tanıtılmıştır [Rosenblatt, 1958].

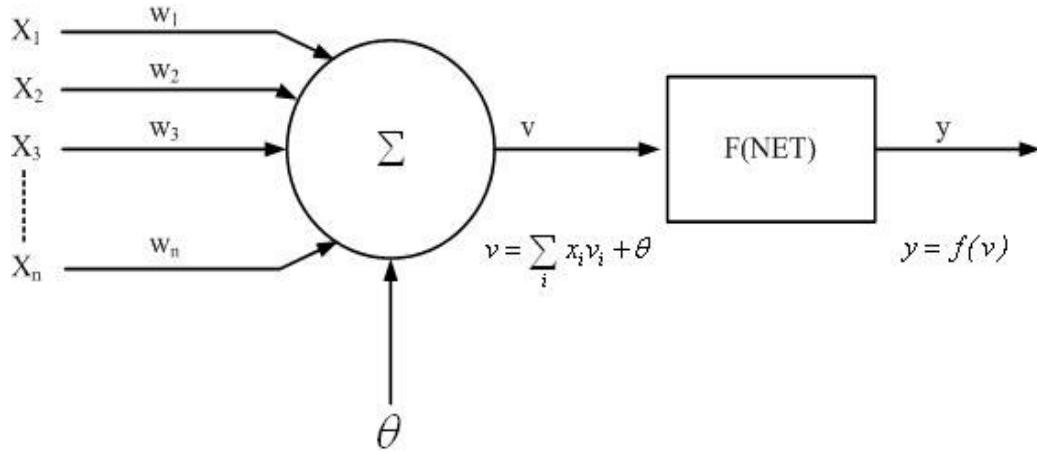
Perceptron'a benzeyen bir YSA sistemi olan ADALINE (Adaptive Linear Network) geliştirilmiştir [Widrow, 1959]. Bundan sonra YSA'ların bilgi kodlama, görüntü işleme gibi farklı alanlarda kullanımına ilişkin çalışmalar yapılsa da 1969 yılında Minsky ve Papaert tarafından perceptron'un XOR gibi bazı basit problemleri çözemediğinin gösterilmesi ile 1980'li yıllara kadar YSA ile ilgili çalışmalar büyük oranda duraklamıştır [Sağıroğlu ve ark., 2003; Minsky ve Papaert, 1969]. 1986 yılında XOR gibi doğrusal olmayan fonksiyonların çok katmanlı ağlar tarafından çözülebileceğini ve çok katmanlı ağların tek katmanlı ağlarda karşılaşılan pek çok sınırlamayı kaldırdığını göstermiş ve çok katmanlı ağlardaki gizli katman ağırlıklarının değiştirilmesi için geri yayılım yöntemini önermişlerdir [Rumelhart ve ark., 1986]. Geri yayılım metodunun tanıtılmasıyla pek çok farklı alanda YSA üzerine yapılan çalışmalar hızlı biçimde artmıştır.

4.3.1. Yapay sinir ağı yapısı

Biyolojik sinir ağları, birbiri ile bağlanarak fonksiyonları yerine getiren çok sayıda sinir hücresinden oluşmaktadır. Benzer şekilde YSA'larda birbirine bağlı doğrusal ve/veya doğrusal olmayan çok sayıda yapay sinir hücresinden oluşmaktadır. Bir yapay sinir hücresi biyolojik sinir hücresinin temel işlevlerini taklit etmektedir. Şekil 4.15'de yapay sinir hücresi yapısı gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bir yapay sinir hücresi girişler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, etkinlik fonksiyonu ve çıkıştan oluşmaktadır. Burada $i=1, \dots, n$ için x_i girişleri, w_i , girişler ile sinir hücresi arasındaki bağlantı ağırlığını göstermektedir.

Girişler

Girişler, dış dünyadan ve/veya diğer sinir hücrelerinden aldıkları bilgileri yapay sinir hücresine iletirler. Bir sinir hücresine kendisinden de bilgi gelebilir.



Şekil 4.15. Yapay sinir hücresi

Ağırlıklar

Ağırlıklar bir yapay sinir hücresine gelen bilginin önemini ve etkisini belirleyen katsayılardır. Ağırlık değerinin büyük, küçük, pozitif veya negatif olması ağırlığın sinir hücresi için önemli veya önemsiz olduğu anlamına gelmez. Ağırlıklar sabit olduğu gibi değişken de olabilir.

Toplama fonksiyonu

Bu fonksiyon sinir hücresine gelen net girdiyi hesaplar. Bunun için farklı fonksiyonlar kullanılabilmektedir. Her giriş sinyalinin kendi ağırlığıyla çarpımlarının toplamı olan ve Eş. 4.7 ile ifade edilebilen ağırlıklı toplam en yaygın kullanılan toplama fonksiyonudur.

$$v = \sum_i^n x_i w_i \quad (4.7)$$

Farklı uygulanan farklı toplama fonksiyonları da kullanılabilmektedir. Çizelge 4.2’de diğer toplama fonksiyonları verilmiştir [Öztemel, 2003].

Çizelge 4.2. Toplama fonksiyonları

Net Giriş	Açıklama
Çarpım: $\text{Net Girdi} = \prod_i G_i A_i$	Ağırlık değerleri girişler ile çarpılır ve daha sonra bulunan değerler birbiri ile çarpılarak net girdi hesaplanır.
Maksimum: $\text{Net Girdi} = \text{Max}(G_i A_i), \quad i=1 \dots n$	Girişler ağırlıklar ile çarpılır, elde edilen en büyük değer net girdi olarak belirlenir.
Minimum: $\text{Net Girdi} = \text{Min}(G_i A_i), \quad i=1 \dots n$	Girişler ağırlıklar ile çarpılır, elde edilen en küçük değer net girdi olarak belirlenir.
Çoğunluk: $\text{Net Girdi} = \sum_i \text{sgn}(G_i A_i)$	Girişler ağırlıklar ile çarpılır, sonuçlardan pozitif ve negatif olanlar ayrılır. Büyük olan sayı sinir hücresinin net girdi olarak kabul edilir.
Kümülatif Toplam: $\text{Net Girdi} = \text{Net}(\text{eski}) + \sum G_i A_i$	Sinir hücresine gelen bilgilerin ağırlıklı toplamı alınır ve bir önceki ağırlıklı toplam ile toplanarak net girdi bulunur.

Herhangi bir uygulamada en uygun toplama fonksiyonunun seçilmesine yönelik bulunmuş bir yöntem yoktur. Bazı yapay sinir ağı modelleri kullanılması gereken toplama fonksiyonunu belirlemektedir. Bir yapay sinir ağında bulunan bütün sinir hücrelerinde aynı toplama fonksiyonu kullanılabildiği gibi her sinir hücresinde ayrı veya bir bölümünde bir toplama fonksiyonu diğer bölümünde başka bir toplama fonksiyonu da kullanılabilir.

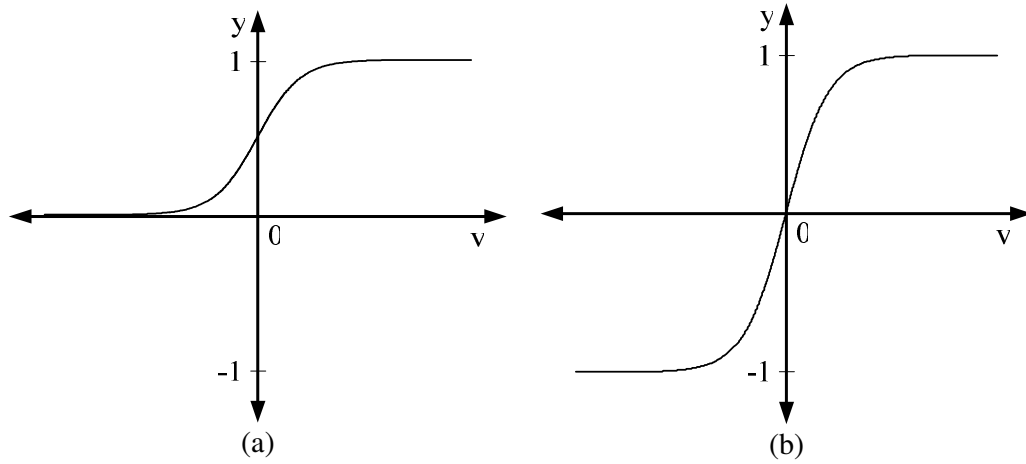
Etkinlik fonksiyonu

Transfer fonksiyonu veya öğrenme eğrisi olarak da adlandırılmaktadır. Toplama fonksiyonunda hesaplanan net girdiyi işleyerek [0,1] veya [-1, 1] aralığında çıkış işaretini belirleyen fonksiyondur. Toplama fonksiyonunda olduğu gibi farklı etkinlik fonksiyonları kullanılabilir. En uygun etkinlik fonksiyonunun belirlenmesine yönelik herhangi bir yöntem bulunmamaktadır. Çok katmanlı algılayıcı gibi bazı sinir ağı

yapıları etkinlik fonksiyonunun türevi alınabilir bir fonksiyon olmasını gerektirir. Bir yapay sinir ağındaki bütün sinir hücrelerinde aynı etkinlik fonksiyonu kullanılabildiği gibi her sinir hücrelerinde farklı etkinlik fonksiyonları da kullanılabilir. Şekil 4.16'da gösterilen tanjant hiperbolik ve sigmoid fonksiyonları en yaygın kullanılan etkinlik fonksiyonlarıdır. Şekil 4.16(a)'da gösterilen sigmoid fonksiyonu matematiksel olarak Eş. 4.8 ile ifade edilebilir.

$$y = \frac{1}{1 + e^{-v}} = \frac{1}{2} \left(\tanh\left(\frac{v}{2}\right) + 1 \right) \quad (4.8)$$

Tek kutuplu etkinlik fonksiyonu olarak da bilinen bu fonksiyonun en etkin olduğu bölge 0,2-0,8 aralığındadır.



Şekil 4.16. a) Sigmoid etkinlik fonksiyonu b) Tanjant hiperbolik etkinlik fonksiyonu

Şekil 4.16(b)'de gösterilen tanjant hiperbolik fonksiyonu matematiksel ifadesi Eş. 4.9'da verilmiştir.

$$y = \frac{1 - e^{-2v}}{1 + e^{-2v}} \quad (4.9)$$

YSA uygulamalarında sigmoid ve tanjant hiperbolikten başka fonksiyonlarda etkinlik fonksiyonu olarak kullanılabilir. YSA uygulamalarında kullanılan çeşitli etkinlik fonksiyonları Şekil 4.17’de görülmektedir. Bu etkinlik fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri de aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.17(a)’da verilen doğrusal fonksiyon Eş. ile ifade edilmektedir.

$$y = A \cdot v \quad (4.10)$$

Burada A sabit bir katsayıdır. ADALINE olarak da adlandırılan bu etkinlik fonksiyonu klasik işaret işleme ve istatistik regresyon analizinde kullanılmaktadır.

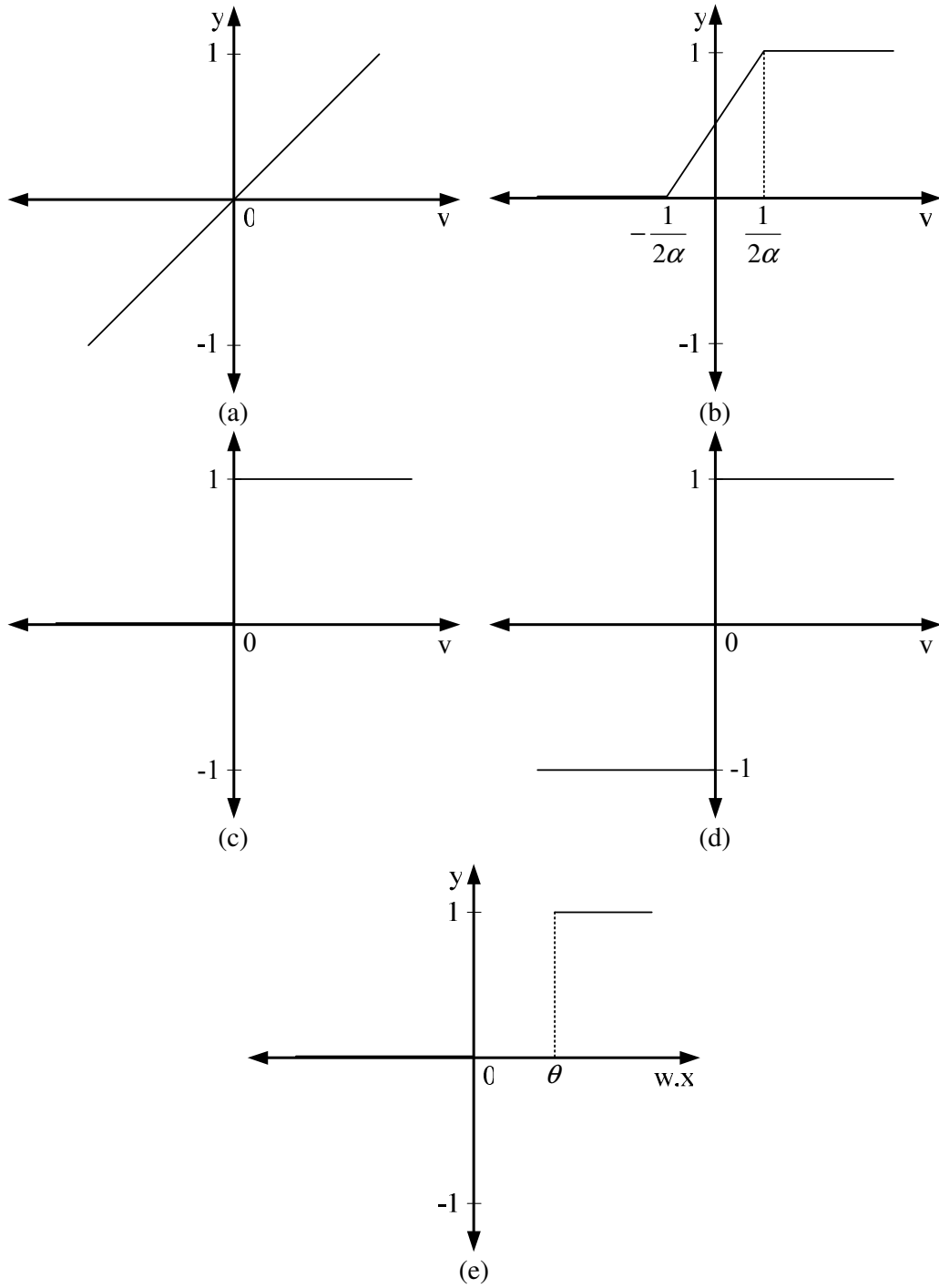
Şekil 4.17(b)’da gösterilen parçalı doğrusal fonksiyon Eş. 4.11 ile ifade edilmektedir.

$$y = F(v) = \begin{cases} 0 & v \leq -1/2\alpha \\ \alpha v + \frac{1}{2} & |v| < 1/2\alpha \\ 1 & v > 1/2\alpha \end{cases} \quad (4.11)$$

Doğrusal bir sigmoid fonksiyonu olan parçalı doğrusal fonksiyon küçük etkinlik potansiyeli için α kazancı olan doğrusal fonksiyon gibi çalışır. Büyük etkinlik potansiyeli için fonksiyon doyuma ulaşır ve çıkış sinyali 1 olur ve basamak fonksiyona dönüşür.

Perceptron olarak adlandırılan işlemcinin kullandığı basamak fonksiyonu tek veya iki kutuplu olabilir. Şekil 4.17(c)’de gösterilen tek kutuplu basamak fonksiyonu Eş. 4.12 ile ifade edilebilir.

$$y = F(v) = \begin{cases} 1 & v \geq 0 \\ 0 & v < 0 \end{cases} \quad (4.12)$$



Şekil 4.17. Diğer etkinlik fonksiyonları

Şekil 4.17(d)'de gösterilen tek kutuplu basamak fonksiyonu matematiksel olarak Eş. 4.13 'de verilmiştir.

$$y = F(v) = \begin{cases} 1 & v \geq 0 \\ -1 & v < 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Şekil 4.17(e)'de gösterilen kutuplamalı basamak fonksiyonu Eş. 4.14 ile ifade edilir.

$$y = F(v) = \begin{cases} 1 & w \cdot x \geq \theta \\ 0 & w \cdot x < \theta \end{cases} \quad (4.14)$$

Bu fonksiyonda giriş sinyali eşik değeri θ aşıldığı zaman sinir hücresi aktif olur. Yukarıda eşik değeri tek kutuplu basamak fonksiyonuna eklenmiştir. Benzer olarak eşik değeri iki kutuplu doğrusal fonksiyona da eklenebilir.

Çıkış

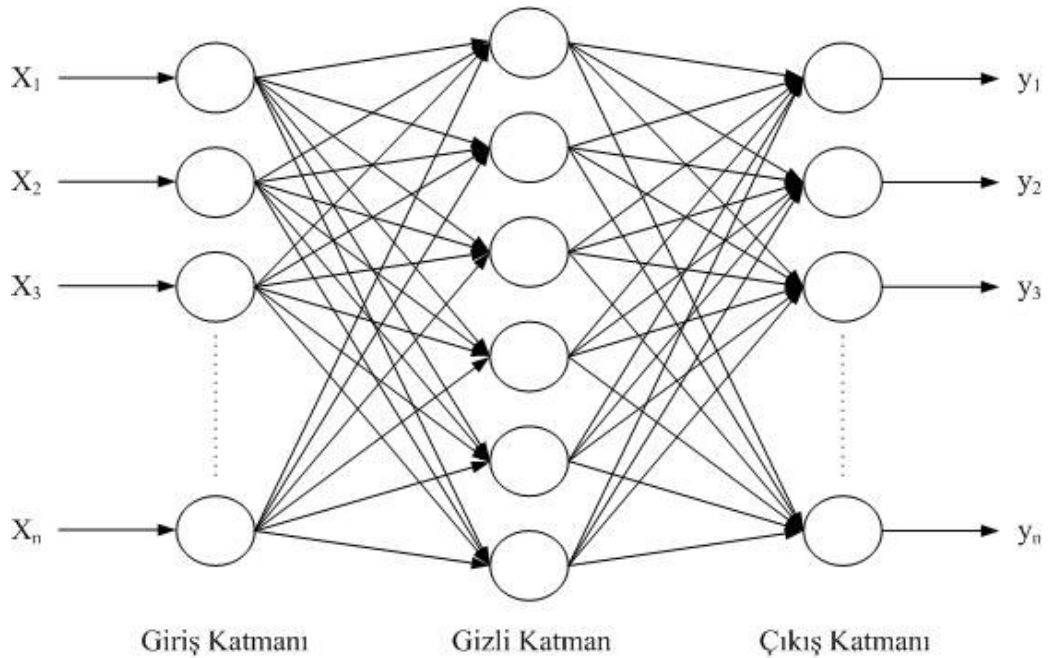
Etkinlik fonksiyonu tarafından elde edilen sonucun diğer sinir hücrelerine veya dışarıya gönderilmesini sağlar. Hücre kendi çıktısını kendisine girdi olarak da gönderilebilir. Yapay sinir hücresinin birden fazla girişi olmasına rağmen sadece bir çıkışı vardır. Ancak bu çıkış sinyali birden fazla sinir hücresinin girişine bağlı olabilir.

4.3.3. Yapay sinir ağı mimarisi

Yapay sinir ağları, çok sayıda yapay sinir hücrelerinin birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanmalarından oluşmaktadır. Yapay sinir ağı girişine uygulanan giriş sinyali sinir hücreleri tarafından işlendikten sonra bağlantılar ile diğer hücrelere giriş olarak gönderilmektedir. Yapay sinir ağlarının sinir hücrelerinin ve bağlantıların çok değişik şekillerde bir araya getirilebilir. YSA'lar bu bağlantıların yönlerine veya ağ içinde işaretlerin akış yönüne göre birbirlerinden ayrılmaktadır. YSA'lar,

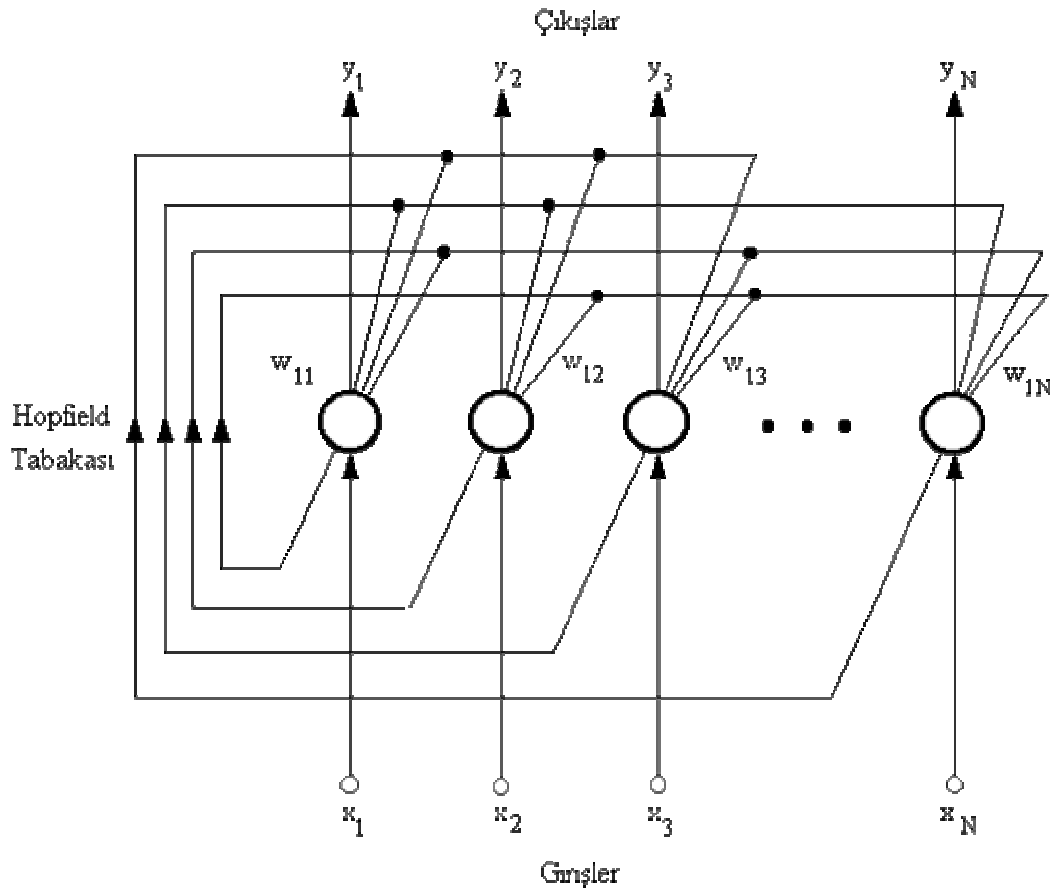
yapılarına göre ileri beslemeli (feedforward) ağlar ve geri beslemeli (feedback) ağlar olmak üzere iki temel yapıda incelenmektedir.

İleri beslemeli ağda sinir hücreleri katmanlar şeklinde düzenlenmişlerdir. İşaretler giriş katmanından çıkış katmanına doğru tek yönlü olarak bağlantılarla iletilir. İleri beslemeli ağlar doğrusal olmayan statik bir işlevi yerine getirmektedir. Sinir ağından istenilen sonucun elde edilebilmesi için ağırlıklar ile bağlantıların doğru belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle statik ağlar olarak da bilinirler. Şekil 4.18’de bir gizli katmanlı ileri beslemeli ağ mimarisi görülmektedir. Sadece giriş ve çıkış katmanından oluşan ağlar karmaşık fonksiyonları hesaplayamamaktadır. Bu nedenle ağ yapısına yeteri kadar hücresi bulunan en az bir gizli (ara) katman eklenmiştir. İleri beslemeli ağlara örnek olarak çok katmanlı perceptronlar ve Linear Vector Quantization (LVQ) ağları gösterilebilir. Bu ağların eğitiminde gradient descent yöntemini kullanan geri yayımlı (back propoagation) öğrenme yaygın biçimde kullanılmaktadır [Jain ve ark. 1996; Lin ve Hoft, 1993].



Şekil 4.18. İleri beslemeli ağ mimarisi

Geri beslemeli ağ yapısında çıkış ve ara katmanda bulunan sinir hücreleri giriş birimlerine veya kendi bulunduğu katmandan önceki katmalara geri beslenmekte böylece girişler iki yönlü (hem ileri hem de geri yöne) aktarılmaktadır. Bu yapıdaki sinir ağları dinamik hafızaya sahip ağlardır ve herhangi bir andaki çıkış sinyali hem o andaki hem de önceki girişleri yansıtmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı önceden tahmin uygulamaları için uygundur. Bu yapıya örnek olarak Hopfield, Elman ve Jordan ağları gösterilebilir. Şekil 4.19'da geri beslemeli Hopfield ağı gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Hopfield ağı

4.3.3. Yapay sinir ağlarında öğrenme

Öğrenme; toplanan yeni bilgiler yoluyla davranışların değiştirilerek iyileştirilmesi olarak tanımlanabilir. Yapay sinir ağlarında öğrenme, bilginin depolandığı bağlantı

ağırlıklarının değiştirilmesi ile gerçekleşir. Yapay sinir ağlarında öğrenme işleminin gerçekleştirilmesi için değişik algoritmalar kullanan farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler danışmanlı, danışmansız ve takviyeli olmak üzere üç farklı gruba ayrılmaktadır.

Danışmanlı öğrenmede, YSA'ya eğitime kümesi olarak adlandırılan örnek bir veri seti girilir. Her bir örnek için giriş bilgileri ve o girişler için oluşması gereken çıkış bilgileri sisteme verilir. YSA, girişler için ürettiği çıkışlar ile istenilen çıkışları karşılaştırarak hatayı bulur. Hata değeri belirlenen hata kriterini sağlayana kadar aşama aşama bu işlem gerçekleştirilir ve her aşamada ağdaki bağlantıların ağırlıkları değiştirir. İstenilen hata kriteri sağlandığında ağırlık değerleri sabitlenir ve öğrenme süreci sonlandırılır. Öğrenme işleminin başarılı biçimde gerçekleştirilebilmesi için örneklerin ihtiyaç duyulan bütün durumları içermesi gerekmektedir. Delta kuralı, genelleştirilmiş delta kuralı veya geri besleme (back propagation) algoritması danışmanlı öğrenme algoritmalarına örnek olarak verilebilir.

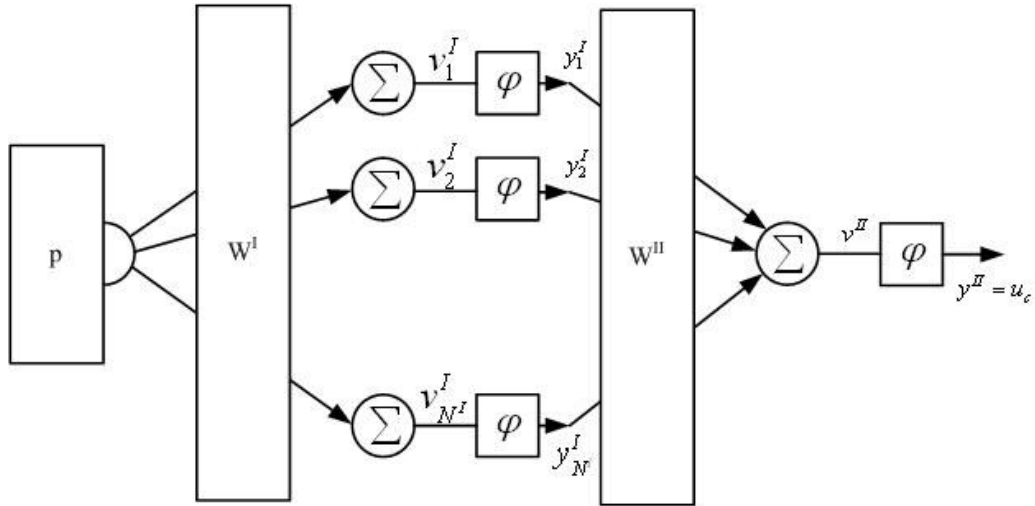
Danışmansız öğrenmede, istenilen çıkış değerinin bilinmesine gerek yoktur. Öğrenme süresince sadece giriş bilgileri ağa verilir. Girişe verilen örnekten elde edilen çıkış bilgisine göre ağ sınıflandırma kurallarını kendi kendine geliştirir ve bağlantı ağırlıklarını aynı özellikleri gösteren öbekler oluşturmak üzere ayarlar. Bu öğrenme yönteminin matematiksel algoritmaları daha basit olduğundan ağ daha hızlı eğitilebilir. Grossberg tarafından geliştirilen ART (Adaptive Resonance Theory), Kohonen tarafından geliştirilen SOM (Self Organizing Map) öğrenme kuralı, Hebbian öğrenme kuralı danışmansız öğrenmeye örnek olarak verilebilir.

Takviyeli öğrenme (Reinforcement learning) öğrenme kuralı danışmanlı öğrenme kuralına benzemektedir. Bu yöntemde de bir danışman bulunmaktadır. Ancak danışman giriş sinyalleri için doğrudan çıkış sinyalini vermez, ağın verilen giriş bilgisi için çıkış üretmesini bekler. Daha sonra üretilen bu çıkış bilgisini belirlenen değerlendirme kriterine göre iyi veya kötü olarak sınıflandırır. Sistem danışmandan gelen değerlendirme sinyaline göre öğrenme sürecini devam ettirir. Takviyeli

öğrenmeye örnek olarak Hinton ve Sejnowski tarafından optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilen Boltzmann kuralı verilebilirler.

4.3.4. Geri yayımlı öğrenme

Matematiksel olarak kolayca ispatlanabilen ve kolay anlaşılabilen geri yayımlı öğrenme kuralı yapay sinir ağlarının eğitilmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Katmanlar halinde düzenlenen iki katmanlı bir yapay sinir ağı Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. İki katmanlı sinir ağının şematik gösterimi

Yapay sinir ağının p vektörü ile gösterilen giriş verileri kontrol edilecek olan sistemin dinamik değişkenleri ve durumlarını ifade etmektedir. Giriş bilgileri ağırlıklar ile çarpılarak etkinleştirme fonksiyonuna girilir. Şekil 4.20 deki ağın ilk katmanı için Eş. 4.15 ve Eş. 4.16 yazılabilir.

$$v_j^I(t) = \sum_{i=1}^{N^0} w_{ji}^I p_i(t) \quad j = 1, \dots, N^I \quad (4.15)$$

$$y_j^I(t) = A^I \tanh(\beta^I v_j^I(t)) \quad j = 1, \dots, N^I \quad (4.16)$$

Burada N^0 p vektörünün boyutları, N^I birinci katmandaki sinir hücrelerinin sayısı ve w_{ji}^I birinci katmanın ağırlık değerleridir. Her j değeri için aynı girişe bağlı farklı ağırlıklar ifade edilmektedir. Eş. 4.16'da j sinir hücresi için $\tanh$ etkinlik fonksiyonu verilmiştir. A^I ve B^I sezgisel olarak belirlenmiş katsayılardır. Birinci katman (y^I) etkinlik işlevi sonucu ikinci katmanın girdisini oluşturmaktadır. Benzer şekilde ikinci katman için Eş. 4.17 ve Eş. 4.18 yazılabilir.

$$v^II(t) = \sum_{j=1}^{N^I} w_{ji}^{II} y_j^I(t) \quad j = 1, \dots, N^I \quad (4.17)$$

$$u_c(t) = A^{II} \tanh(B^{II} v^II(t)) \quad j = 1, \dots, N^I \quad (4.18)$$

Burada w_{ji}^{II} ikinci katman ağırlıkları, A^{II} ve B^{II} sezgisel olarak belirlenmiş katsayılar ve u_c sinir ağı çıkışı (kontrol işareti)'dir (Liut, 1999).

İki katmanlı bir çıkışlı bir yapay sinir ağı için geri yayılım algoritması ile ağırlıklar ayarlanmaktadır. Birinci katman ağırlık değerleri Eş. 4.19'da ikinci katman ağırlık değerleri Eş. 4.20'de verilmiştir.

$$w_{ji}^I(k) = w_{ji}^I(k-1) + \Delta w_{ji}^I(k) \quad (4.19)$$

$$w_{ji}^{II}(k) = w_{ji}^{II}(k-1) + \Delta w_{ji}^{II}(k) \quad (4.20)$$

Aşağıda $\Delta w_{ji}^I(k)$ ve $\Delta w_{ji}^{II}(k)$ değerlerinin hesaplanarak ağırlıkların ayarlanması işlemi verilecektir (Liut, 1999).

Bu işleme sinir ağının istenilen çıkışı $\delta_d = \delta_d(t)$ ile o andaki ağırlıklar için ağın çıkış değeri $\delta_c = \delta_c(t)$ arasındaki hata $e = e(t)$ tanımlanarak başlanır. Hata değeri Eş. 4.21 ile hesaplanabilir.

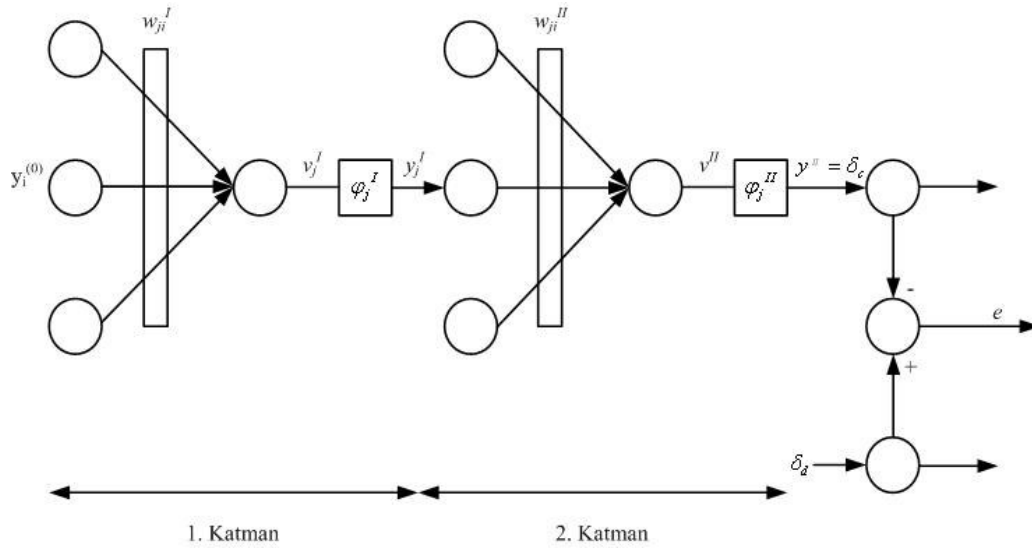
$$e(t) = \delta_d(t) - \delta_c(t) \quad (4.21)$$

Öğrenme işleminin devam edip etmeyeceğini belirleyecek olan performans indeksi veya ölçütü (Θ) olarak Eş. 4.22’de verilen hatanın karesinin yarısı belirlenmiştir.

$$\Theta = \frac{1}{2} e^2 = \frac{1}{2} (\delta_d - \delta_c) \quad (4.22)$$

Geri yayılım yöntemi performans ölçütünü en aza indiren ağırlık değerlerini araştırmaktadır. Şekil 4.21’de Haykin tarafından önerilen iki girişli bir çıkışlı ağ yapısı gösterilmiştir. Burada y^I ikinci katmanın girdisi olan birinci katmandaki sinir hücrelerinin çıkışını, $y^{II} = \delta_c$ ikinci katmanın aynı zamanda da ağın çıkışını gösterir [Haykin, 1994]. Çıkış katmanı için duyarlılık faktörü Eş. 4.22 ile verilmiştir.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial w_j^{II}} = \frac{\partial \Theta}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y^{II}} \frac{\partial y^{II}}{\partial v^{II}} \frac{\partial v^{II}}{\partial w_j^{II}} \quad (4.22)$$



Şekil 4.21. İki katmanlı bir çıkışlı sinir ağı yapısı

Eş. 4.17’den Eş. 4.23 yazılabilir.

$$y_j^I = \frac{\partial v''}{\partial w_j''} \quad (4.23)$$

Eş. 4.23, Eş. 4.22'de yerine yazılarak Eş. 4.24 elde edilebilir.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial w_j''} = \frac{\partial \Theta}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y''} \frac{\partial y''}{\partial v''} y_j^I \quad (4.24)$$

İkinci katman için yerel minimum noktası Eş. 4.25 ile bulunabilir.

$$\delta'' = \frac{\partial \Theta}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y''} \frac{\partial y''}{\partial v''} \quad (4.25)$$

Eş. 4.25 kullanılarak Eş. 4.24 yeniden yazılacak olursa Eş. 4.26 elde edilir.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial w_j''} = \delta'' y_j^I \quad (4.26)$$

Eş. 4.21 ve Eş. 4.22'nin e ve y'' 'ne göre türevleri alınırsa Eş. 4.27 ve Eş. 4.28 elde edilir.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial e} = e \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial e}{\partial y''} = -1 \quad (4.28)$$

Eş. 4.27 ve Eş. 4.28, Eş. 4.25'de yerine yazılarak Eş. 4.29 bulunabilir.

$$\delta'' = -e \varphi''(v'') \quad (4.29)$$

Burada $\varphi''(v'') = \frac{\partial y''}{\partial v''}$ olarak yazılabilir. Her adımda delta kuralı uygulanarak ağırlıktaki değişim $\Delta w_j''$ duyarlılık faktörüne bağlı olarak Eş. 4.30 ve Eş. 4.31 yazılabilir.

$$\Delta w_j''(k) = \lambda'' \frac{\partial \Theta}{\partial w_j''}(k) \quad (4.30)$$

$$\Delta w_j''(k) = \lambda'' \delta''(k) y_j'(k) \quad (4.31)$$

Burada λ'' ikinci katman için öğrenme katsayısıdır. Birinci katman için duyarlılık faktörü Eş. 4.32 ile bulunabilir.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial w_{ji}'} = \frac{\partial \Theta}{\partial y_j'} \frac{\partial y_j'}{\partial v_j'} \frac{\partial v_j'}{\partial w_{ji}'} \quad (4.32)$$

Eş. 4.15 kullanılarak $p_i = \frac{\partial v_j'}{\partial w_{ji}'}$ bulunabilir. Bu eşitlik Eş. 4.32'de yerine yazılırsa

$$\frac{\partial \Theta}{\partial w_{ji}'} = \frac{\partial \Theta}{\partial y_j'} \frac{\partial y_j'}{\partial v_j'} p_i \quad (4.33)$$

bulunur. 1. katman için yerel minimum değeri Eş.4.34 ile bulunabilir.

$$\delta_j' = \frac{\partial \Theta}{\partial y_j'} \frac{\partial y_j'}{\partial v_j'} \quad (4.34)$$

Eş. 4.32, Eş. 4.34 kullanılarak yeniden yazılırsa Eş.4.35 elde edilir.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial w_{ji}^I} = \delta_j^I p_i \quad (4.35)$$

Birinci katmanda delta kuralı uygulanırsa Eş. 4.36 ve Eş. 4.37 elde edilir.

$$\Delta w_{ji}^I = \lambda^I = \frac{\partial \Theta}{\partial w_{ji}^I} \quad (4.36)$$

$$\Delta w_{ji}^I = \lambda^I \delta_j^I p_i \quad (4.37)$$

Burada λ^I birinci katman için öğrenme katsayısı ve δ_j^I Eş. 4.38 ile verilen yerel minimum değeridir.

$$\delta_j^I = \frac{\partial \Theta}{\partial y_j^I} \frac{\partial y_j^I}{\partial v_j^I} = [\delta'' \quad w''] \cdot [\phi'^I(v_j^I)] \quad (4.38)$$

Burada $\frac{\partial y_j^I}{\partial v_j^I} = \phi'^I(v_j^I)$ ve $\frac{\partial \Theta}{\partial y_j^I} = \frac{\partial \Theta}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y''} \frac{\partial y''}{\partial v''} \frac{\partial v''}{\partial y_j^I} = \delta'' w_j''$ 'dır. Öğrenme katsayıları

λ^I ve λ^I sezgisel olarak belirlenmektedir.

Öğrenme işleminin yerel minimum noktalarında sonlandırılmasını engellemek amacıyla sayısal ivmelenme yöntemi uygulanabilir. Bu işlem yeni ağırlık değerleri hesaplanırken $0 < \mu < 1$ aralığında sezgisel olarak belirlenen bir ivmelenme sabiti kullanılarak gerçekleştirilir [Haykin, 1994]. Birinci ve ikinci katmanlar için yeni ağırlıklar sırasıyla Eş. 4.39 ve Eş. 4.40 kullanılarak bulunabilir.

$$w_{ji}^I(k+1) = w_{ji}^I(k) + \mu^I [w_{ji}^I(k) - w_{ji}^I(k-1)] \quad (4.39)$$

$$w_{ji}''(k+1) = w_{ji}''(k) + \mu'' [w_{ji}''(k) - w_{ji}''(k-1)] \quad (4.40)$$

4.4. Bulanık Sinirsel Denetleyiciler

Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi, kimliklendirilmesi veya denetlenmesinde bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi yöntemler yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Doğrusal olmayan ve/veya tam tanımlanmış sistemlerin uzman deneyimine dayalı tanımlanan kurallar ile tanımlanmasını prensibine dayanan bulanık mantık ile öğrenebilme, paralel işlem yapabilme, uyarlama ve genelleme yapabilme gibi özellikleri bulunan yapay sinir ağlarının güçlü hesaplama yeteneği bir araya getirilerek hızlı ve etkin denetim yöntemleri geliştirilebilmektedir [Dandıl ve Gökbulut, 2005]. Birbirini tamamlayıcı özellikleri olan bu iki denetim yönteminin birleştirilmesi ile elde edilen denetim yöntemine Bulanık Sinirsel Denetim denir. Bulanık sinirsel denetleyicilerde genellikle bulanık mantık denetleyiciye, yapay sinir ağlarının öğrenme, uyarlama ve genelleme yapma yeteneklerinin kazandırılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle elde edilen öğrenebilen, uyarlama ve genelleme yapabilen bulanık sinirsel mantık denetleyici, bulanık denetleyicilerin kullanıldığı bütün uygulamalarda kullanılabilmektedir [Elmas, 2003].

YSA ile BMD'yi birleştiren farklı özellikteki uygulamalar için pek çok yaklaşım geliştirilmiştir [Nauck ve ark. 1997]. Bunlardan bazıları şunlardır: GARIC [Berenji ve Khedkar, 1992], FALCON [Nauck ve ark. 1997], ANFIS [Catarina ve ark., 2005; Jang, 1993], NEFCLASS [Nauck ve Kruse, 1995], NEFCON [Nauck ve ark., 1997], FUN [Sulzberger, 1993], SONFIN [Juang ve ark., 1998], FINEST [Tano ve ark., 1996], EFuNN [Abraham ve Nath, 2001]. NEuro Fuzzy CLASSification (NEFCLASS) bir bilgi tabanından bulanık sınıflandırma kurallarını belirleyen önemli bulanık sinirsel yaklaşımlarından birisidir [Nauck ve Kruse, 1995]. Üyelik fonksiyonlarının şekilleri, yerleri öğrenme süresince tekrarlamalı olarak ayarlanmaktadır. Böylece optimum BMD tasarımı için harcanacak zaman ve emek azaltılmıştır.

Bu çalışmada Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) kullanıldığı için takip eden kısımlarda ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

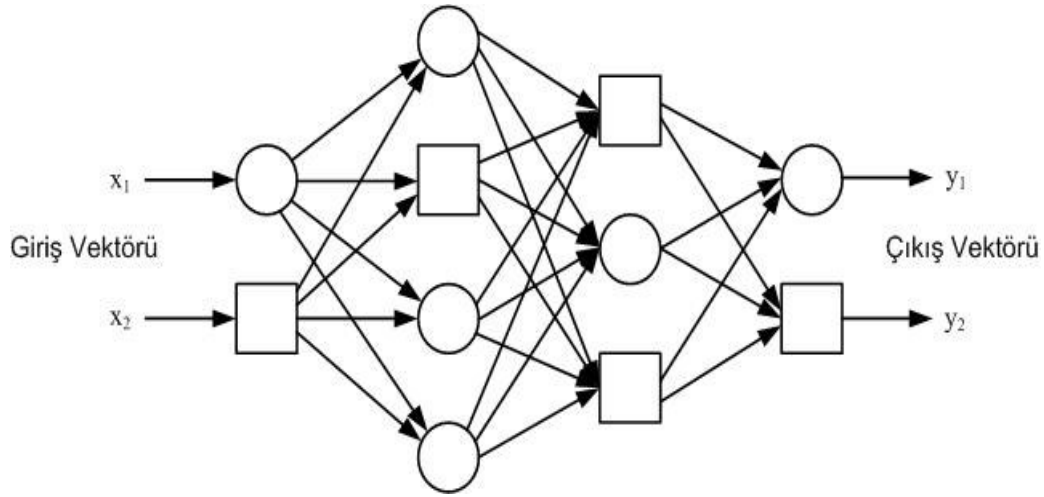
4.4.1. Uyarlamalı ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi

Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System-ANFIS) 1993 yılında Jang Tarafından tanıtılmıştır [Jang, 1993]. Tanıtıldığı günden sonra birçok araştırmacının ilgisini çeken ANFIS pek çok farklı uygulamada kullanılmıştır.

Uyarlamalı ağ, adından da anlaşılacağı gibi düğümler ve bu düğümler arasındaki bağlantılardan oluşan bir ağ yapısıdır. Bununla beraber bu düğümlerin tamamı veya bir kısmı uyarlanabilir yapıdadır. Bu, düğüm çıkışlarının kendilerine ait olan parametrelere göre değiştiği anlamına gelmektedir. Öğrenme kuralı hata değerini en aza indirmek için bu parametrelerin nasıl değiştirileceğini açıklamaktadır.

Uyarlamalı ağlarda kullanılan temel öğrenme algoritması gradient descent (azaltımı) ve zincir (chain) kuralına dayanmaktadır. Temel öğrenme algoritmasının yavaşlığı ve yerel minimum noktasına takılmaya müsait olması gibi özellikleri bilindiği için öğrenme işlemini büyük oranda hızlandıran melez öğrenme algoritması önerilmiştir [Jang, 1991].

Uyarlamalı ağ, Şekil 4.22’de görüldüğü gibi her düğümün gelen sinyaller üzerinde o düğüme ait olan parametre kümesini kullanarak özel bir işlem gerçekleştirdiği ileri beslemeli çok katmanlı bir ağıdır. Her düğümü için formüller farklı olabilir ve bunların seçimi ağın gerçekleştirmesi beklenen giriş-çıkış fonksiyonuna bağlı olarak seçilir. Bu ağ yapısında bağlantılar sadece akış yönü göstermektedir ve bağlantıların ağırlıkları yoktur. Farklı uyarlama yeteneklerini yansıtabilmek için düğümler daire ve kareler ile gösterilmektedir. Kare şeklinde gösterilen düğüm uyarlanabilen bir parametreyi gösterirken daire şeklindeki düğümler sabit bir parametreyi göstermektedir. Uyarlamalı ağın parametre kümesi, uyarlanabilen düğümlerin parametre kümelerinin birleşiminden oluşmaktadır. İstenilen giriş-çıkış bağıntısının sağlanabilmesi için bu parametrelerin girilen eğitim verileri için aşağıda açıklanan gradient tabanlı öğrenme kuralına göre değiştirilmesi gereklidir.



Şekil 4.22. Uyarlamalı ağ yapısı

L katmanlı ve k 'ninci katmanında $\#k$ düğüm bulunan bir uyarlamalı ağın verildiği kabul edilsin. Burada k 'ninci katmanda i 'nci pozisyonda bulunan düğümü (k,i) ile ve düğümün çıkışı da O_i^k ile gösterilebilir. Düğüm çıkışı giriş sinyaline ve parametre kümesine bağlı olduğu için belirtilen düğümün çıkışı O_i^k için Eş. 4.41 yazılabilir [Jang, 1993].

$$O_i^k = O_i^k(O_1^{k-1}, \dots, O_{\#(k-1)}^{k-1}, a, b, c, \dots) \quad (4.41)$$

Burada a, b, c vb. ile ifade edilen parametreler düğümü temsil eden katsayılardır. Eğitim veri setinin P adet veriden oluştuğu kabul edilirse, p 'inci giriş için $(1 \leq p \leq P)$ hata ölçümü, hataların karelerinin toplamı şeklinde Eş. 4.42 kullanılarak elde edilebilir.

$$E_p = \sum_{m=1}^{\#(L)} (T_{m,p} - O_{m,p}^L)^2 \quad (4.42)$$

Burada $T_{m,p}$ p 'inci hedef çıkış vektörünün m 'inci bileşenini ve $O_{m,p}^L$ 'de p 'inci giriş vektörü tarafından üretilen gerçek çıkış vektörünün m 'inci bileşenini göstermektedir. Bu nedenle tüm hata ölçümü Eş. 4.43 ile yapılabilir.

$$E = \sum_{p=1}^p E_p \quad (4.43)$$

Parametre uzayında bulunan E için gradient descent yöntemini uygulayan öğrenme algoritması geliştirmek için ilk önce eğitim veri setinin p 'inci değeri ve her düğüm çıkışı O için hata oranı $\frac{\partial E_p}{\partial O}$ hesaplanmalıdır. Çıkış düğümü (L, i) için hata oranı Eş. 4.44 ile hesaplanabilir.

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} = -2(T_{i,p} - O_{i,p}^L) \quad (4.44)$$

Herhangi bir (k, i) dahili düğümü için hata oranı Eş. 4.45 ile bulunabilir.

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k} = \sum_{m=1}^{\#(k+1)} \frac{\partial E_p}{\partial O_{m,p}^{k+1}} \frac{\partial O_{m,p}^{k+1}}{\partial O_{i,p}^k} \quad (4.45)$$

Burada $1 \leq k \leq L-1$ 'dir. Eş.4.45' den, dahili bir düğüme ait olan hata oranının bir sonraki kaymandaki düğümlerin hata oranlarının doğrusal bileşiminden oluştuğu söylenebilir. Bu nedenle bütün $1 \leq k \leq L$ ve $1 \leq i \leq \#k$ değerleri için Eş. 4.44 ve Eş. 4.45 kullanılarak $\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k}$ değeri hesaplanabilir.

Buradan, α verilen uyarlamalı ağırlık bir parametresi olmak şartıyla hata oranı için Eş. 4.46 yazılabilir.

$$\frac{\partial E_p}{\partial \alpha} = \sum_{O^* \in S} \frac{\partial E_p}{\partial O^*} \frac{\partial O^*}{\partial \alpha} \quad (4.46)$$

Burada S , çıkışları α 'ya bağlı olan düğümler kümesini göstermektedir. Buradan tüm sistemin hata ölçümü E 'nin α 'ya göre türevi Eş.4.47 ile bulunabilir.

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{p=1}^p \frac{\partial E_p}{\partial \alpha} \quad (4.47)$$

α 'değerinin güncelleştirme formülüne göre Eş. 4.48 yazılabilir.

$$\Delta \alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha} \quad (4.48)$$

Burada η öğrenme sabitini temsil etmektedir ve Eş. 4.49 ile hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_{\alpha} \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha} \right)^2}} \quad (4.49)$$

Eş. 4.49'da, parametre uzayında her gradient değişimi uzunluğu adım büyüklüğü olarak tanımlanmakta ve k ile gösterilmektedir. Genellikle yakınsama hızını ayarlamak için k değeri değiştirilir.

4.4.2. ANFIS mimarisi

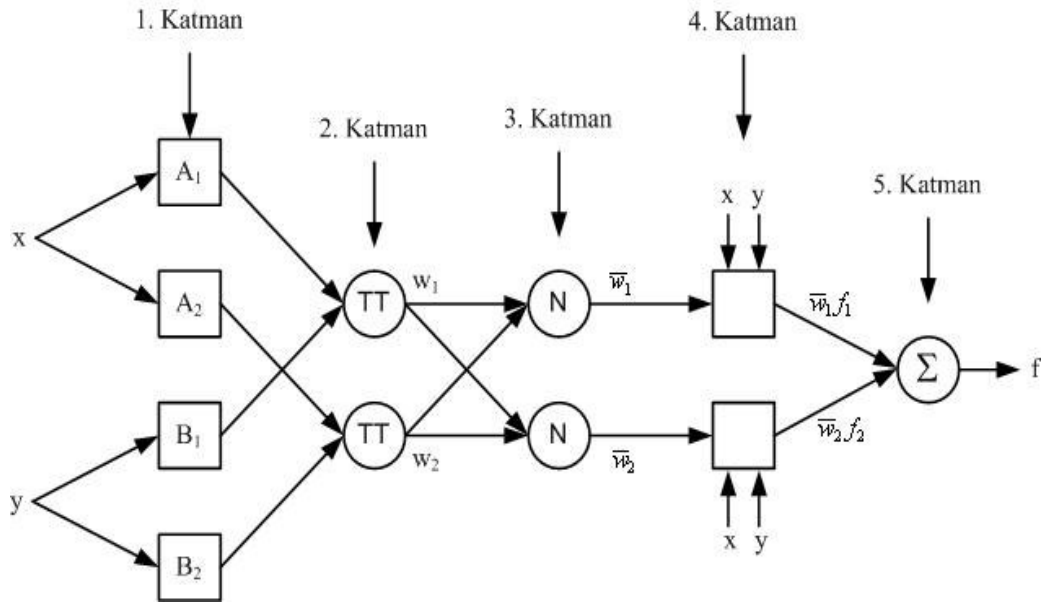
Uyarlamalı ağıın düğüm fonksiyonları ile ilgili türevi alınabilir olma haricinde herhangi bir sınırlama yoktur. Yapısıyla ilgili de sadece ileri beslemeli olma zorunluluğu olan ANFIS, bu özelliği ile hemen kullanılmaya başlanmış ve pek çok farklı alanda yaygın biçimde kullanım alanı bulmuştur.

Basit olması için Şekil 4.23'de gösterilen iki girişli, bir çıkışlı, iki kurallı ve Takagi-Sugeno bulanık çıkarım yöntemini kullanan bir bulanık çıkarım sistemi ele alınacaktır. Bu sistemin kuralları aşağıda verilmiştir.

Kural 1: EĞER $x=A_1$ ve $y=B_1$ ise O HALDE $f_1=p_1x+q_1y+r_1$

Kural 2: EĞER $x=A_2$ ve $y=B_2$ ise O HALDE $f_2=p_2x+q_2y+r_2$

Burada x, y giriş büyüklükleri, f çıkış fonksiyonu, A_i - B_i girişler için belirlenen üyelik fonksiyonlarını, p, q, r çıkış değişkenlerini göstermektedir.



Şekil 4.23. Takagi-Sugeno çıkarım yöntemi kullanan iki girişli bir çıkışlı ANFIS yapısı

Şekilde görüldüğü gibi ANFIS farklı işlevleri yerine getiren 5 katmandan oluşmaktadır. Bu katmanların işlevleri aşağıda açıklanacaktır [Jang, 1993].

1. Katman

Bu katmandaki her düğüm kare şeklindedir yani uyarlanabilir düğümlerdir. Bu düğümler x, y girişleri için bulanık kümeleri temsil etmektedir. Bu katmandaki düğümlerin çıkış değerleri Eş. 4.50 ile verilmiştir.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (4.50)$$

Burada x, i düğümüne uygulanan giriş sinyalini ve A_i 'de bu düğüm için belirlenmiş dilsel etiketi (küçük, büyük vb.) ifade etmektedir. O_i çıkış sinyali, giriş değerleri ve

üyelik fonksiyonları için üyelik derecelerini verir. Başka bir deyişle bulanıklaştırma işlevini bu katmanda yerine getirilmektedir. Genellikle bu katmanda Eş. 4.51 ve Eş. 4.52 ile ifade edilen, en yüksek değeri 1, en düşük değeri 0 olan çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonları kullanılır.

$$\mu A_i(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (4.51)$$

$$\mu A_i(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (4.52)$$

Burada a_i , b_i , c_i çan eğrisi şeklindeki üyelik fonksiyonun şeklini ve dolayısıyla girişlere karşılık gelen üyelik derecesini değiştiren parametre kümesidir ve ağ eğitilirken bu parametreler ayarlanmaktadır. Burada çan eğrisi yerine üçgen veya parçalı fonksiyon da kullanılabilir.

2. Katman

Bu katmandaki bütün düğümler daire şeklindedir ve girişine uygulanan sinyallerine t-norm operatörlerinden birini uygulayarak çıkışa aktarır. Çıkış ifadesi Eş. 4.53'de verilmiştir.

$$O_i^2 = w_i = \mu A_i(x) \times \mu B_i(y) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.53)$$

Genellikle t-norm operatörü olarak Eş. 4.53'de gösterildiği gibi çarpım işlemi kullanılmaktadır. Bu katman çıkarım işlemini yerine getirmektedir ve her düğümün çıkış kuralın ateşlenme seviyesini gösterir.

3. Katman

Bu katmandaki her düğüm daire şeklindedir ve N ile etiketlenmiştir. Bu katmandaki i 'nci düğüm, Eş. 4.54'de görüldüğü gibi i 'nci kuralın ateşleme seviyesinin toplam ateşleme seviyesine oranını verir.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2. \quad (4.54)$$

Başka bir deyişle normalize edilmiş ateşleme seviyesini hesaplar.

4. Katman

Bu katmandaki her düğüm kare şeklindedir ve düğüm fonksiyonu Eş. 4.55 ile tanımlanabilir.

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (4.55)$$

Burada $\bar{w}_i$, 3. katmanın çıkış değeri ve p_i , q_i , r_i , sonuç parametreleri olarak adlandırılan parametre kümesidir. Bu katman normalize edilmiş ateşleme değeri ile sonuç fonksiyonu arasında uyarlanabilen bir bağıntı kurmaktadır.

5. Katman

Bu katmanda daire şeklinde tek bir düğüm vardır ve Σ ile etiketlenmiştir. Eş.4.56 görüldüğü gibi giriş sinyallerini toplayarak çıkış sinyalini elde eder.

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (4.56)$$

ANFIS yapısında farklı çıkarım metotları kullanılabilir. Mamdani tip bulanık çıkarımın seçilmesi durumunda işlemler karmaşıklaşmakta ancak öğrenme yeteneğinde önemli bir gelişme ortaya çıkmamaktadır. Bu nedenle en fazla Takagi-Sugeno ve Tsukamoto yöntemi kullanılmaktadır [Elmas, 2003].

4.4.3. ANFIS için geri yayımlı öğrenme algoritması

Geri yayımlı öğrenme algoritmasında ağı çıkışında elde edilen hata değeri giriş katmanına kadar geriye doğru yansıtılarak parametreler ayarlanmaktadır. Burada amaç öğrenme işlemi sonucunda hata değerini öğrenme veri seti için sıfıra düşürmektir. Ağı çıkışındaki hata istenilen çıkış değerinden (d^*) gerçekleşen çıkış değerinin çıkarılması ile bulunabilir. Hata ölçütü E ise en küçük kareler metodu kullanılarak Eş. 4.57 ile hesaplanabilir.

$$E = \frac{1}{2} (d^* - d)^2 \quad (4.57)$$

Hata ölçütü ve geri yayılım algoritması kullanılarak hata geriye doğru yansıtılır ve her katmandaki uyarlanabilir fonksiyonlar aşağıdaki gibi güncellenir [Elmas, 2003].

5. Katman

Bu katmanda çıkış hatası katman çıkışına yansımaktadır.

$$\delta^5 = e = (d^* - d) = -\frac{\partial E}{\partial d} = -\left[\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial d} \right] \quad (4.58)$$

4. Katman

Bu katmanda sonuç parametreleri (p_i, q_i, r) Eş. 4.59-Eş. 4.62 kullanılarak ayarlanır.

$$\Delta p_i = -\frac{\partial E}{\partial p_i} = \left[\frac{\partial E}{\partial d} \right] \left[\frac{\partial d}{\partial p_i} \right] \quad (4.59)$$

$$\left[\frac{\partial d}{\partial p_i} \right] = \bar{\mu}_i \cdot x \Rightarrow \Delta p_i = \delta^5 \cdot \bar{\mu}_i \cdot x \quad (4.60)$$

Aynı işlemler q ve r'deki değişimleri bulmak içinde de tekrarlanmalıdır.

$$\Delta q_i = \delta^5 \cdot \bar{\mu}_i \cdot y \quad (4.61)$$

$$\Delta r_i = \delta^5 \cdot \bar{\mu}_i \quad (4.62)$$

3. Katman

Bu katmanda da katman çıkışına yansıyacak olan hata değeri Eş. 4.63 - Eş. 4.65 ile hesaplanır.

$$\delta^3 = -\frac{\partial E}{\partial \bar{\mu}_i} = \left[-\frac{\partial E}{\partial d} \right] \left[\frac{\partial d}{\partial \bar{\mu}_i} \right] \quad i=1,2 \quad (4.63)$$

$$\frac{\partial d}{\partial \bar{\mu}_i} = d_i \quad (4.64)$$

$$\delta^3 = \delta^5 d_i \quad (4.65)$$

2. Katman

Bu katmanda da parametre ayarlaması yoktur, çıkış hatası Eş.4.66 - Eş.4.68 ile katmana yansıtılır.

$$\delta^2 = -\frac{\partial E}{\partial \mu_i} = \left[-\frac{\partial E}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \bar{\mu}_i} \frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \mu_i} \right] \quad i = 1,2 \quad (4.66)$$

$$\bar{\mu}_i = \frac{\mu_i}{\sum_i \mu_i} \Rightarrow \sigma = \sum_i \mu_i \quad (4.67)$$

$$\frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \mu_i} = \left[\frac{\sigma - \mu_i}{\sigma^2} \right] \quad (4.68)$$

1. Katman

Bu katmanda hata değerine göre Eş. 4.69 – Eş. 4.74 kullanılarak üyelik fonksiyonlarının parametreleri değiştirilmektedir.

$$\delta^1 = -\frac{\partial E}{\partial \mu_{A_i}} = \left[-\frac{\partial E}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \bar{\mu}_i} \frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \mu_i} \right] \left[\frac{\partial \mu_i}{\partial \mu_{A_i}} \right] \quad i = 1,2 \quad (4.69)$$

$$\frac{\mu_i}{\mu_{A_i}} = \mu_{B_i} \quad (4.70)$$

$$\delta_i^1 = \delta_i^2 \mu_{B_i} \quad (4.71)$$

$$\delta_{i+2}^1 = -\frac{\partial E}{\partial \mu_{B_i}} = \left[-\frac{\partial E}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial \bar{\mu}_i} \frac{\partial \bar{\mu}_i}{\partial \mu_i} \right] \left[\frac{\partial \mu_i}{\partial \mu_{B_i}} \right] \quad (4.72)$$

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial \mu_{B_i}} = \mu_{A_i} \quad (4.73)$$

$$\delta_{i+2}^1 = \delta_i^2 \mu_{A_i} \quad (4.74)$$

5. BİR FAZLI ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ TASARIMI

Bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin tasarımı kontrol donanımı ve yazılımı olmak üzere iki kısımda açıklanacaktır.

5.1. Kontrol Donanımı

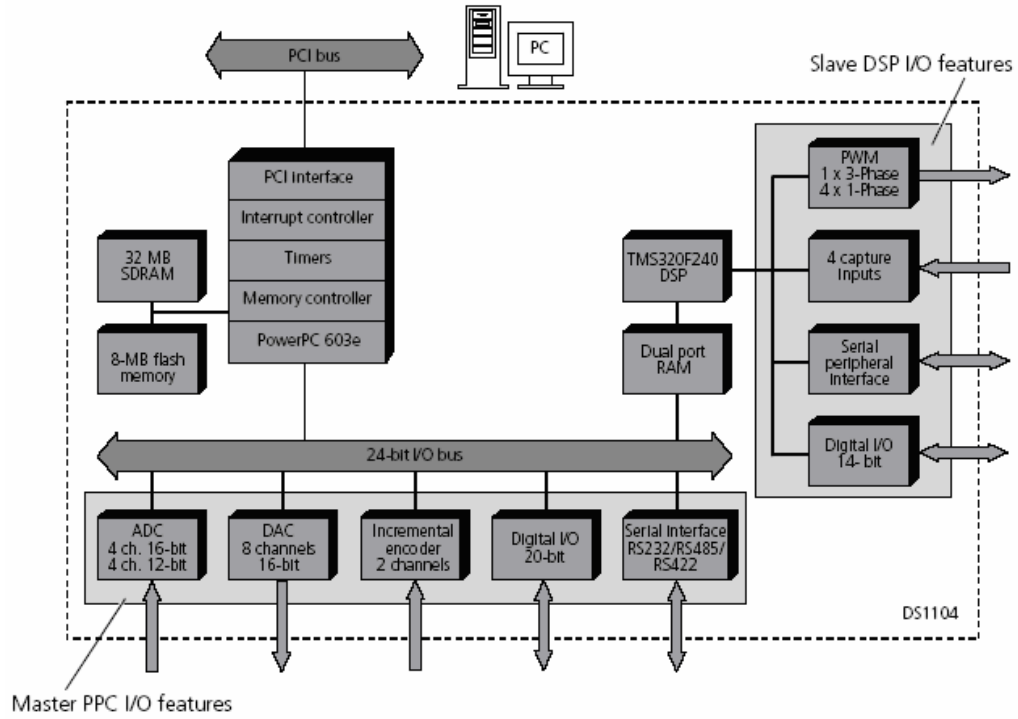
Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici, gerilim kaynaklı evirici yapısı, hat frekanslı yükseltici tip bir transformatör ve LCL tipi çıkış filtresinden oluşmaktadır. Evirici çıkış gerilimi hat frekanslı transformatör ile şebeke gerilimi seviyesine yükseltildiğinden giriş DA gerilim seviyesi 85-150V aralığında iken şebekeye enerji aktarımı sağlanmıştır. Ayrıca denetleyiciden alınan gate sinyallerini IGBT'leri tetikleyebilecek özelliklerde sinyallere dönüştürmek için bir sürücü kartı hazırlanmıştır. Ayrıca şebeke etkileşimli eviricinin denetiminde ihtiyaç duyulan şebeke gerilimi ile evirici çıkış akımının algılanması için bir okuma kartı tasarlanmıştır.

5.1.1. DS1104 kontrol kartı

Kontrol sisteminde DS1104 dSpace kartı kullanılmıştır. dSpace sistemleri MATLAB/Simulink benzetimleri ile donanım kontrolünü bir sistemde birleştirdiklerinden oldukça popüler bir kontrol platformudur. Elektrik motorlarının ve güç elektroniği dönüştürücülerinin denetiminde, otomasyon sistemlerinde ve otomobil üretim endüstrisi gibi alanlarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Şekil 5.1'de DS1104'ün mimarisi ve fonksiyon birimleri görülmektedir [Li ve ark., 2006; Rodriguez ve Emadi, 2007].

PC'nin ana kartındaki PCI slota takılı olan DS1104 DSP kontrol kartının, Master (MPC8240) ve Slave (TMS320F240) olmak üzere iki işlemcisi vardır. Bağlantı Paneli CP1104, DS1104 kartı ile arayüz kartı (sürücü ve analog değerleri okuma kartları) arasında bağlantıyı sağlar. DS1104'ün master işlemci birimi, MPC8240, aşağıdaki bileşenleri içermektedir [dSPACE, 2005]:

- Kontrol modellerinin gerçekleştirildiği PowerPC 603 işlemci (master PPC)
 - 250 MHz (CPU clock)
 - 16-KByte L1 data cache
 - 16-KByte L1 instruction cache
 - Kesme denetleyici
 - Zamanlayıcılar
 - PCI arayüz (5V, 32 bit, 33MHz)



Şekil 5.1. DS1104'ün mimarisi ve fonksiyon birimleri

DS1104'ün slave işlemci birimi aşağıdaki bileşenleri içermektedir:

- Texas Instruments TMS320F240 DSP
 - 20 MHz (CPU clock)

- Master PPC ile iletişimde kullanılan 4Kx16 bit dual-port memory (DPMEM)

Benzetim çalışmalarından istenilen sonuçlar elde edildikten sonra MATLAB/Simulink modeli “Build” komutu ile hedeflenen C koduna dönüştürülerek DS1104’e otomatik olarak yüklenmektedir. Bundan sonra bütün işlemler DS1104 tarafından bilgisayardan bağımsız olarak yapılmaktadır. Böylece her türlü analog veya dijital giriş çıkış bilgisinin okunması ve kontrolü sağlanabilmektedir. Ayrıca ControlDesk yazılımı kullanılarak hazırlanan Grafik Kullanıcı Arayüzleri ile sistemin çalışması ve değişkenleri gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir. Ayrıca ControlDesk yazılımı kartı çalıştırıp durdurmak için de kullanılmaktadır [dSPACE, 1999].

DS1104’ün temel özellikleri aşağıdaki gibidir [dSPACE, 2005]:

- 12 veya 16 bit çözünürlüğünde 8 kanal ADC ve 8 kanal DAC-
- 2 arttırımlı encoder
- Onboard bağımsız 64-bit floating point işlemci (master PPC)
- Onboard Slave DSP
- Onboard hafıza (memory)
- Diğer I/O yetenekleri

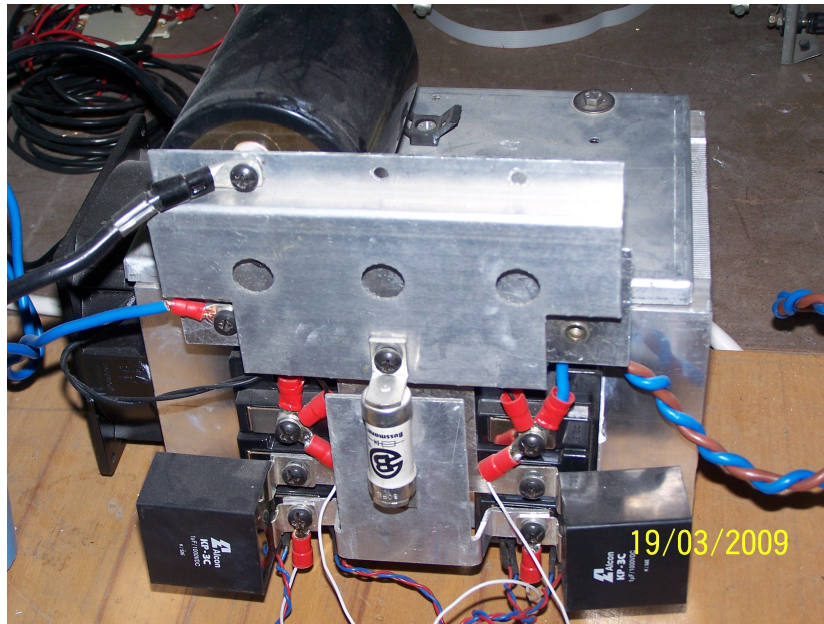
Evirici kontrolünde kullanılan sistem üç ana bileşen içermektedir:

- PCI geliştirme board (DS1104)
- I/O çıkış kutusu (CP1104)
- ControlDesk yazılımı ve yazılım koruma dongle’ı

5.1.2. Evirici güç devresi

Şebeke etkileşimli evirici uygulamalarında gerilim kaynaklı, akım kaynaklı eviriciler yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca son yıllarda özellikle yüksek gerilimli

uygulamalarda çok seviyeli eviriciler de kullanılmaya başlanılmıştır. Bu çalışmada bir fazlı köprü tipi gerilim kaynaklı evirici yapısı tercih edilmiştir. Evirici devresinde CM75DU-12H ürün kodlu Mitsubishi marka 600V, 75A'lık modül IGBT'ler kullanılmıştır. Uygulama çalışmalarında evirici girişine uygulanacak olan DA gerilim 3 fazlı bir doğrultucu üzerinden sağlanmaktadır. Doğrultucu devresinde International Rectifier firmasının ürünü olan IRKD236/16 ürün kodlu 1600V 230A değerlerinde bir fazlı modül diyotlar kullanılmıştır. 3 fazlı kontrolsüz doğrultucu diyotları ile eviricide kullanılan IGBT'ler aynı soğutucu üzerine yerleştirilmişlerdir. Hazırlanan evirici devresi ve bara sistemi Resim 5.1'de, doğrultucu devresi ise Resim 5.2'de görülmektedir.

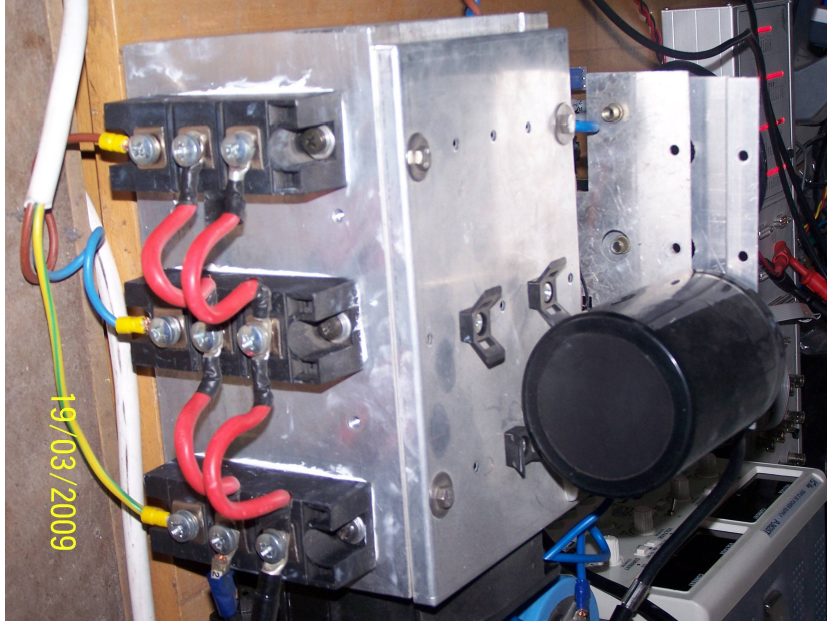


Resim 5.1. Evirici devresi

5.1.3. IGBT sürücü devresi

Denetleyicide üretilen gate sinyallerini IGBT'leri tetikleyebilecek seviyeye yükseltmek ve denetleyici ile IGBT'ler arasında elektriksel izolasyon sağlamak amacıyla Resim 5.3'de gösterilen sürücü kartı hazırlanmıştır. Sürücü kartında Powerex M57962CL hybrid IGBT sürücü entegresi kullanılmıştır. M57962CL'nin

blok diyagramı Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Denetleyici ve sürücü kartı tarafından üretilen gate sinyalleri Şekil 5.3’de, sürücü kartının devre şeması Şekil 5.4’de gösterilmektedir.



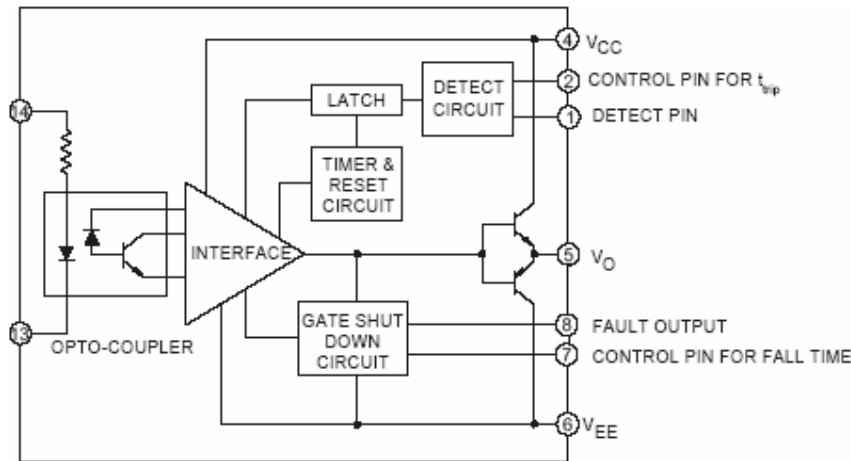
Resim 5.2. Doğrultucu devresi



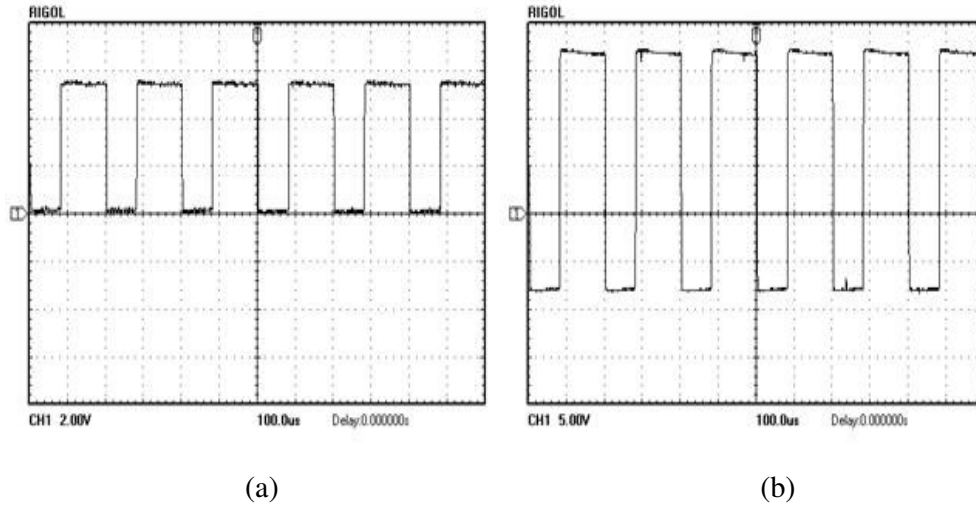
Resim 5.3. IGBT sürücü kartı

Bu sürücüler, sürmek için kullanıldıkları IGBT modüller için izoleli yükselteç gibi çalışırlar. Sürücü entegre dahilinde bulunan optokuplör ile giriş ile çıkış arasında elektriki izolasyon sağlarlar. Kısa devre koruması yine sürücü içerisinde bulunan desaturasyon tespit edici ile sağlanır. Bu birim kısa devre tespit edildiğinde hata sinyali üretmektedir [Powerex, 2009]. Şekil 5.3’de görüldüğü gibi denetleyici dijital 0 sinyali için 0V, dijital 1 sinyali için ise 5V üretirken sürücü kartı bunları sırasıyla -8, 15V değerlerine dönüştürmektedir.

Sürücü kartına ayrıca M57962CL ve analog okuma kartı için gerekli olan değişik seviyedeki gerilimleri üretmek amacıyla bir anahtarlama mod güç kaynağı bulunmaktadır.



Şekil 5.2. M57962CL’nin blok diyagramı



Şekil 5.3. a) Denetleyicinin ürettiği gate sinyalleri b) Sürücü kartı tarafından üretilen gate sinyalleri

Tasarımı yapılan bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin deney düzeneği Resim 5.4’de gösterilmiştir.

5.1.4. LCL filtre tasarımı

Evirici çıkışında kullanılan hat filtreleri genellikle filtre bobinlerinden (L) oluşa da bobin ve kondansatörün farklı bağlantıları ile elde edilen LC veya LCL hat filtreleri de kullanılmaktadır. Sadece bobinden oluşan hat filtresi 1. derece bir filtredir ve zayıflatması tüm frekans aralığında 20dB/decade’dir. Bu filtre kullanıldığında etkili bir bastırma sağlanabilmesi için anahtarlama frekansının oldukça yüksek olması gerekmektedir.

Şebeke etkileşimli evirici uygulamalarında özellikle kesintisiz güç kaynaklarında yaygın biçimde kullanılmakta olan LC filtre kullanıldığında rezonans frekansı sabit kalmayıp şebeke endüktansının değişiminden etkilenmektedir. Bu nedenle bu çalışmada LCL filtre tercih edilmiştir. LCL filtrenin rezonans frekansı Eş. 5.1’de görüldüğü gibi sadece filtre elemanlarının değerlerine bağlıdır.





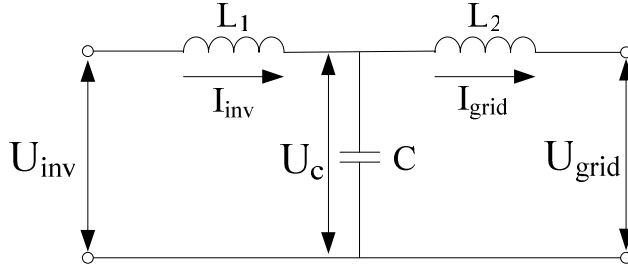
Resim 5.4. Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici deney düzeneği

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (5.1)$$

LCL filtrelerin daha düşük reaktif güç üretimine neden olmaları, rezonans frekansının üstünde 60 dB/decade zayıflatma etkisine sahip olmaları, daha düşük anahtarlama frekanslarının kullanılmasına imkan sağlamaları gibi avantajları bulunmaktadır.

Şekil 5.5’de LCL filtre gösterilmiştir. Bu filtrenin transfer fonksiyonu Eş. 5.2’de verilmiştir.

$$\frac{I_{grid}}{U_{inv}} = \frac{1}{s^3 L_1 L_2 C + s^2 (R_1 L_2 C + R_2 L_1 C) + s(R_1 R_2 C + L_1 + L_2) + R_1 + R_2} \quad (5.2)$$



Şekil 5.5. LCL filtre

LCL filtrenin performansı seçilen rezonans frekansı, C kondansatörü ile L_1 ve L_2 endüktanslarının değerlerinden etkilenmektedir. Rezonans frekansının seçiminde Eş. 5.3 dikkate alınmalıdır.

$$10f_g \leq f_r \leq f_{sw}/2 \quad (5.3)$$

Benzer kriterler bobin ve kondansatör değerleri içinde gereklidir. Bu kriterlerin açıklanmasından önce Eş 5.4-5.10'da tanımlanan bazı referans değerleri belirlemek kolaylık sağlayacaktır.

$$S_{REF} = S_n \quad (5.4)$$

$$U_{REF} = U_g \quad (5.5)$$

$$f_{REF} = f_g \quad (5.6)$$

$$I_{REF} = \frac{S_{REF}}{U_{REF}} \quad (5.7)$$

$$Z_{REF} = \frac{U_{REF}^2}{S_{REF}} = \frac{U_{REF}}{I_{REF}} \quad (5.8)$$

$$L_{REF} = \frac{Z_{REF}}{2\pi f_{REF}} \quad (5.9)$$

$$C_{REF} = \frac{1}{2\pi f_{REF} Z_{REF}} \quad (5.10)$$

Filtrede kullanılan C kondansatörü güç faktörünün düşmesine neden olmaktadır. Şebeke etkileşimli evirici uygulamasında birim güç faktörü istendiğinden C değeri genellikle Eş. 5.11 ile sınırlandırılmaktadır.

$$C = 0,05 C_{REF} \quad (5.11)$$

Herhangi bir rezonans frekansı için C değerinin düşük seçilmesi bobin değerlerinin büyümesine dolayısıyla sistemin boyut ve maliyetinin artmasına neden olduğundan C kondansatörünün kapasite değeri Eş. 5.11'deki sınıra yakın seçilmelidir.

Ayrıca toplam endüktans değeri AA gerilim düşümünü dolayısıyla ihtiyaç duyulan DA seviyesini etkilediğinden L_{REF} değerinin %10'undan düşük olmalıdır. Ayrıca L_1 ve L_2 endüktans değerlerinin birbirine oranı toplam endüktans aynı iken farklı olabilmektedir. Bu değer evirici ve şebeke uçlarında müsaade edilen maksimum akım ripıl değerine bağlıdır ve bu çalışmada Eş. 5.12'de görüldüğü gibi 2 seçilmiştir.

$$L_1 = 2L_2 \quad (5.12)$$

Eş. 5.3-5.12 kullanılarak hesaplanan LCL filtre elemanlarının değerleri Eş. 5.13-15'de verilmiştir. Filtrenin rezonans frekansı 2756 Hz olarak tespit edilmiştir.

$$L_1 = 10mH \quad (5.13)$$

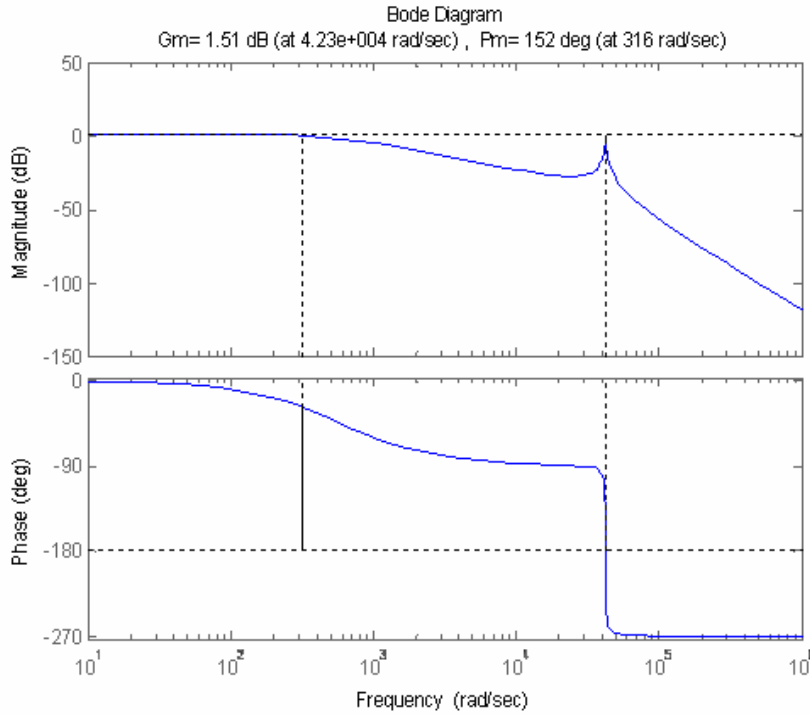
$$L_2 = 5mH \quad (5.14)$$

$$C = 1\mu F \quad (5.15)$$

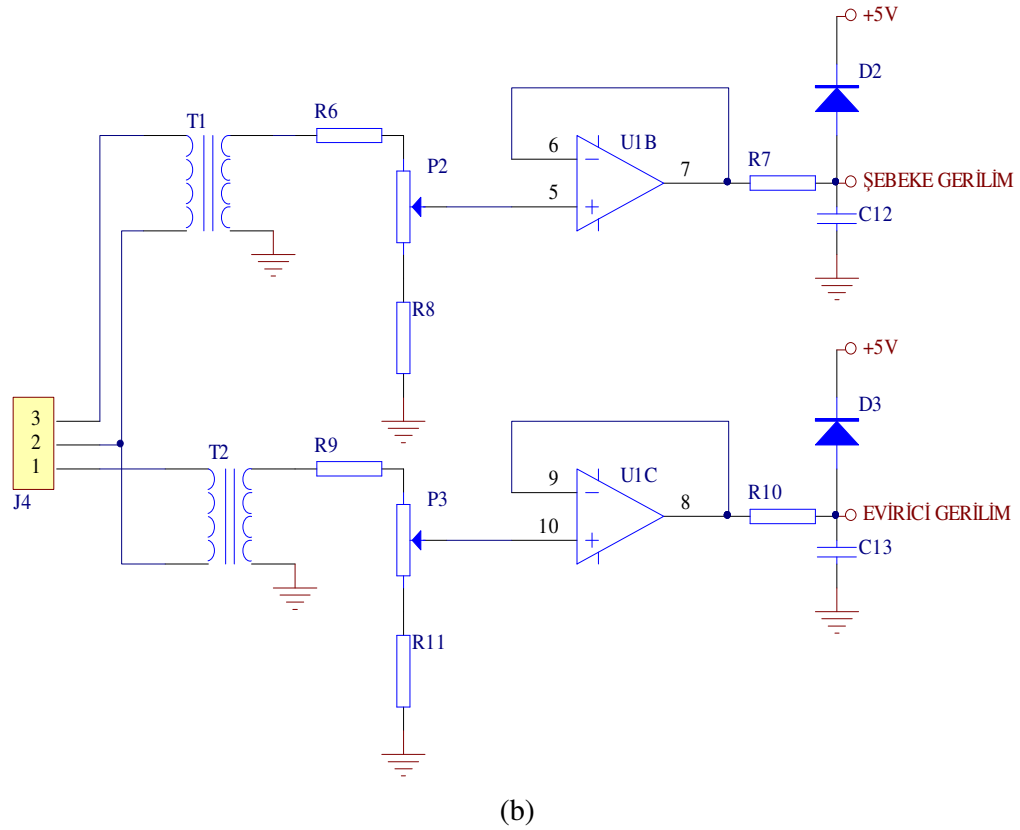
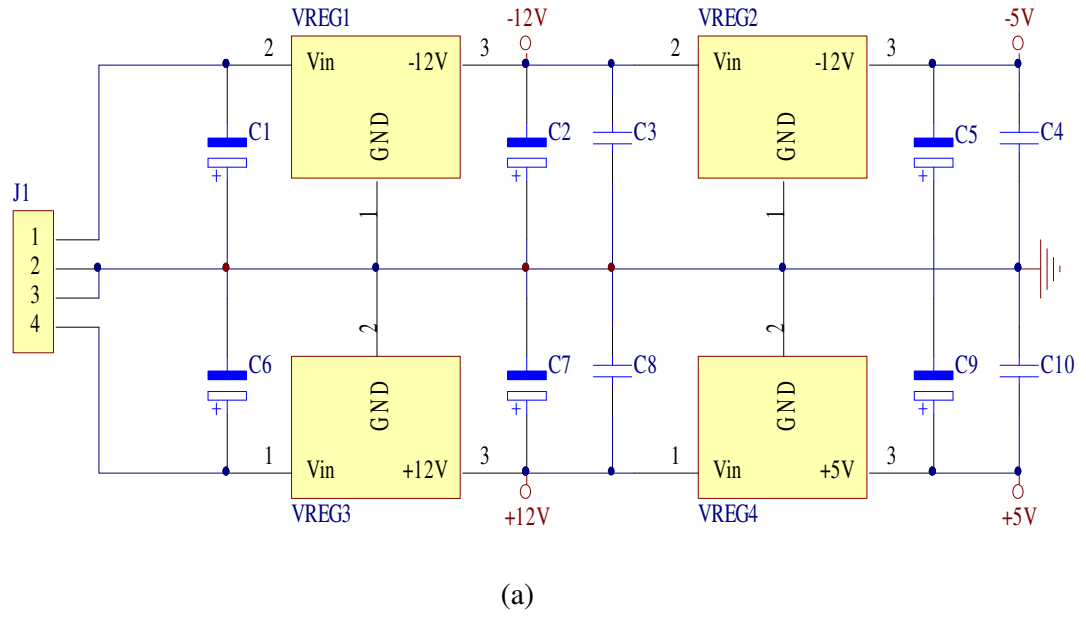
Tasarlanan filtrenin bode diyagramı Şekil 3’de görülmektedir.

5.1.5. Akım ve gerilim okuma devreleri

Eviricinin kontrolünde gerekli olan evirici akımı, şebeke ve evirici gerilimleri, gibi analog bilgilerin okunarak denetleyici (dSPACE) ADC blokları için uygun seviyeye dönüştürülmesi amacıyla bir kart hazırlanmıştır. Evirici ve şebeke gerilimi ölçü transformatörleri üzerinden izoleli olarak okunmakta ve op-amp içeren şartlandırma devreleri yardımıyla dSPACE’in analog giriş kanalları için uygun seviyeye şartlandırılmaktadır. Gerilim okumak ve analog okuma kartında ihtiyaç duyulan farklı seviyelerdeki besleme gerilimlerini üretmek için kullanılan devre şeması Şekil 5.7’de görülmektedir.



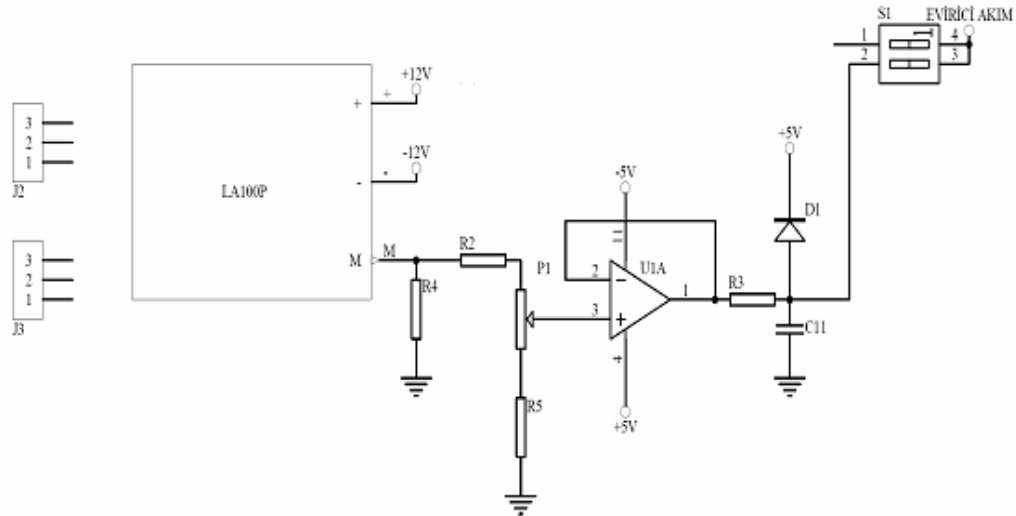
Şekil 5.6. Tasarlanan filtrenin bode diyagramı



Şekil 5.7. a) Kart beslemelerinin üretilmesi, b) Şebeke ile evirici gerilimlerinin okunması için kullanılan devre

Eviricinin çıkış akımı (şebekeye enjekte edilen akım) hall etkili bir akım sensörü yardımıyla yine izoleli olarak okunabilmektedir. Bu sensör, şebeke frekansında çalışan akım transformatörlerine göre doyma etkisinin olmaması ve yüksek frekans bileşenlerini de algılayabilmesi gibi avantajları sebebiyle tercih edilmiştir. Akım sensörü olarak ABB EL100 P2 akım sensörü kullanılmıştır. Yine analog sinyal seviyesi belirli sınırlar içerisinde kalması için şartlandırılmıştır. Akım okuma devresi Şekil 5.8’de gösterilmektedir.

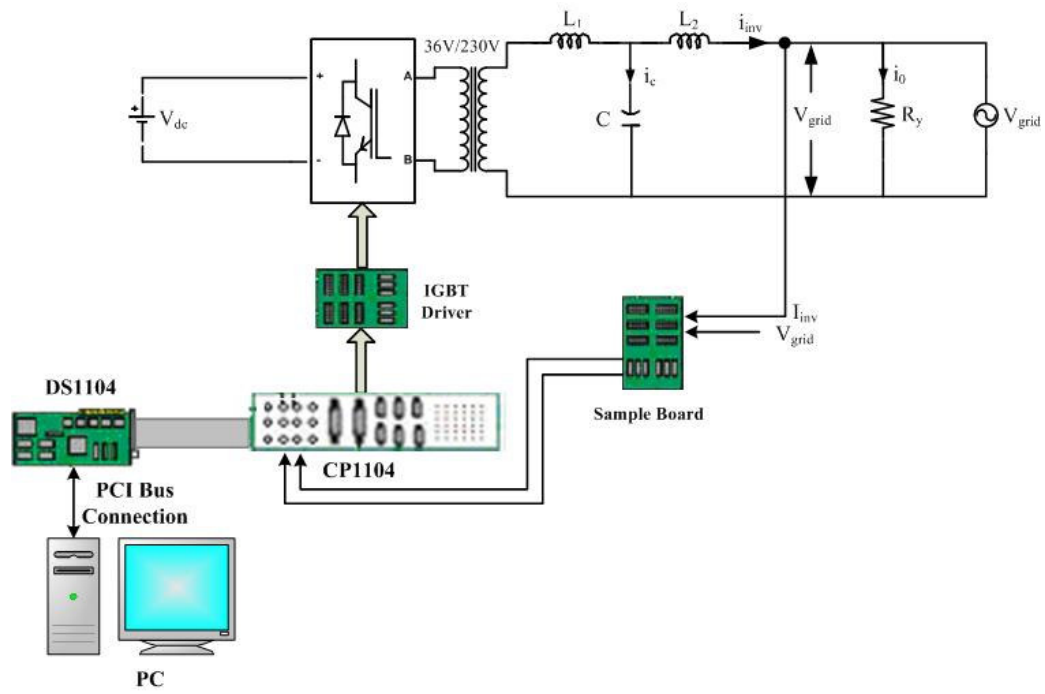
Şebeke etkileşimli evirici uygulamasında kullanılan sistemin modeli Şekil 5.9’da görülmektedir.



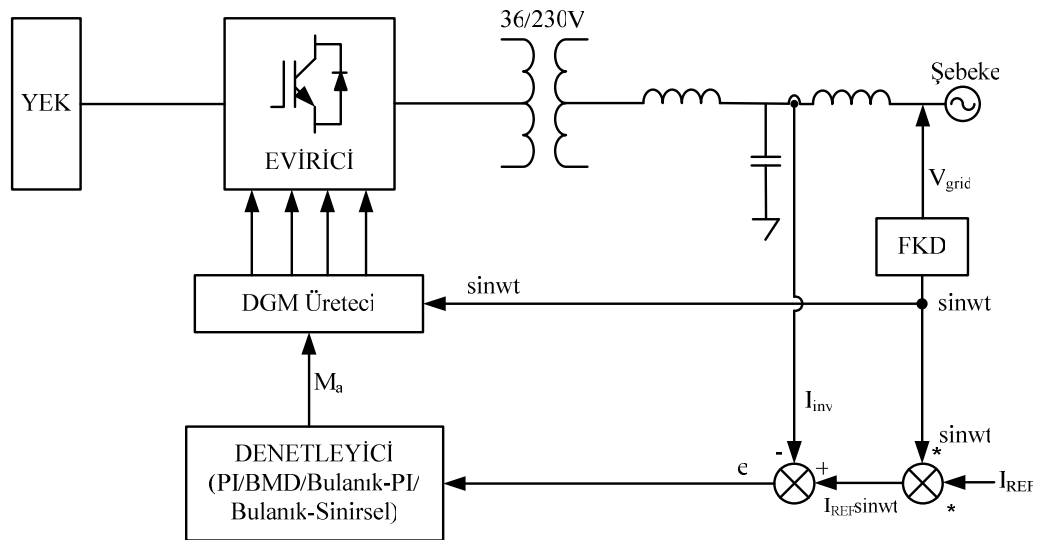
Şekil 5.8. Akım okuma devreleri

5.2. Kontrol Yazılımı

Bir fazlı şebeke etkileşimli eviricide kullanılan kontrol yazılımı faz kilitleme döngüsü yazılımı ve kontrol yazılımı olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Tasarlanan bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin blok diyagramı Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Tüm sistem modeli

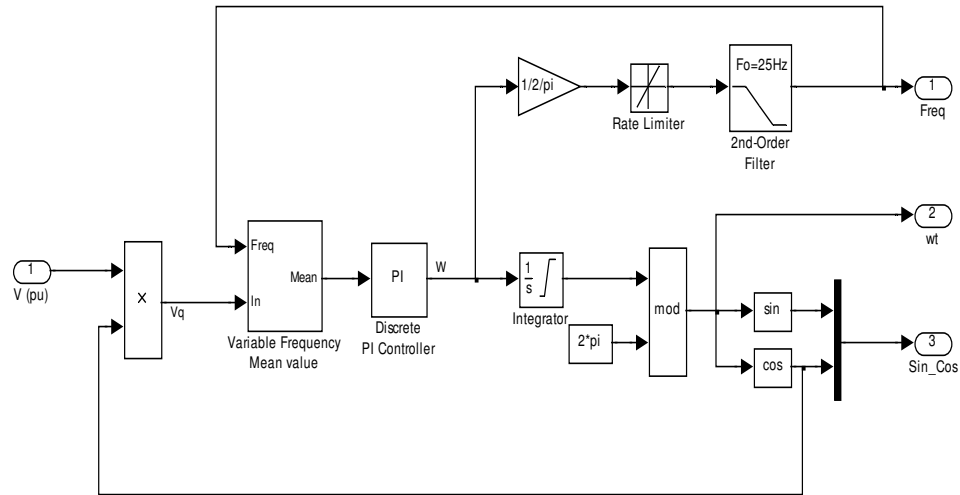


Şekil 5.10. Bir fazlı evirici blok diyagramı

5.2.1. Faz kilitleme döngüsü

Şebeke etkileşimli evirici çıkış akımı şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanslı olmalıdır. Bunun sağlanması için şebekenin faz ve frekans bilgisini sürekli olarak takip edilmektedir. Faz kilitleme döngüsü (FKD) tarafında elde edilen faz ve frekans bilgisi eviricinin akım referansının üretilmesinde kullanılmaktadır. Bu nedenle FKD, şebeke etkileşimli eviricilerin en önemli kısımlarından birisidir.

Benzetim çalışmalarında MATLAB/Simulink'in Şekil 5.11'de gösterilen "1 phase PLL" bloğu kullanılmıştır. Uygulama safhasına başlamadan önce bu bloğun başarımı test edilmiştir. Tatmin edici sonuçlar alındığı için çalışmalara bu FKD ile devam edilmiştir.



Şekil 5.11. Bir fazlı FKD

5.2.2. PI denetimli şebeke etkileşimli evirici

Şebeke etkileşimli eviriciler gerilim kontrollü olarak da tasarlanabilmektedirler. Gerilim kontrollü çalışmada küçük senkronizasyon hatalarının eviricinin aşırı

yüklenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle çalışmada senkronizasyon hatalarına karşı daha az duyarlı olan akım kontrollü çalışma tercih edilmiştir.

Bu çalışmada evirici akımının denetlenmesi için PI akım denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan PI denetleyici Eş. 5.16 ile ifade edilebilir.

$$m_a(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (5.16)$$

Burada K_p oransal kazancı, K_i integral kazancı, $e(t)$ akım hatası ve $m_a(t)$ ise denetleyicinin çıkış sinyalini göstermektedir. Katsayıları uygun belirlenmiş bir PI denetleyici, kalıcı durum hatasına neden olmaması, hızlı tepki vermesi ve kolay uygulanabilir bir yapıya sahip olması gibi üstünlükleri bulunmaktadır [Demirbaş, 2007]. PI denetleyicinin K_p ve K_i kazançlarının tespiti için sistemin matematiksel modeli ve Ziegler-Nichols tarafından önerilen değerler kullanılmaktadır [Ziegler, Nichols, 1942].

Bu çalışmada PI denetleyici için Eş. 5.17 ve 5.18’de verilen kazanç değerleri kullanılmıştır.

$$K_p = 1,7 \quad (5.17)$$

$$K_i = 2000 \quad (5.18)$$

5.2.3. Bulanık mantık denetimli şebeke etkileşimli evirici

Klasik PI veya PID denetleyiciler diğer güç elektroniği dönüştürücülerin denetiminde olduğu gibi şebeke etkileşimli eviricilerin denetiminde kullanılabilir. Belirlenen çalışma noktası civarında çalışan sistemler sabit kazançlı PI denetleyici ile sistem kontrol edildiğinde kabul edilebilir bir performans elde edilmektedir. Ancak sistem parametrelerinin değişimi nedeniyle farklı çalışma noktaları arasında geçişler

söz konusu olduğunda elde edilen geçici durum performansı için aynı şeyleri söylemek mümkün değildir. Şebeke etkileşimli eviricilerin çalışma noktaları güneş ışıınım miktarı, rüzgâr hızı gibi doğal nedenlere bağlı olarak değişmektedir. Buna ek olarak şebeke parametreleri de eviricinin çalışması sırasında değişebilmektedir.

Başlıca özelliği sayısal değişkenler yerine dilsel değişkenler kullanılması olan bulanık mantık denetim, Zadeh tarafından 1965’de tanıtılan bulanık grupların en başarılı uygulamalarından birisidir [Zadeh, 1965]. Bulanık mantık denetim teorisi belirsizlik ve değişkenlik üzerine kurulmuş matematiksel bir disiplindir. Kesin kurallara bağlı olmayan ve tam tanımlanmamış kavramların kullanılmasına izin vermektedir. Bulanık mantık denetim, doğrusal olmayan ve uyarlanabilir yapısı sayesinde yük bozukluklarının ve parametre değişimlerinin bulunduğu uygulamalarda güçlü performans göstermektedir. Mamdani basit bir dinamik sistemin denetiminde kullanmasından günümüze kadar pek çok denetim yaklaşımı ve bulanık mantık denetim uygulaması gerçekleştirilmiştir [Mamdani, 1974]. Tarihsel gelişimi, bugünü durumu ve bulanık mantık denetim tarafından kapsanan kavramlar literatürde geniş bir şekilde bulunmaktadır [Lee, 1990; Berenguel ve ark., 1997]. Bulanık mantık denetimin klasik denetleyicilerden en büyük üstünlüğü genel olarak bilindiği gibi sistemin matematik modeline olan bağlılığının çok sınırlı olmasıdır [Premrudeepreechacharn ve Poapornsawan, 2000].

Bu çalışmada şebeke etkileşimli eviricinin denetimi için bir Mamdani tipi bir bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Bulanık mantık denetleyici şebeke empedansı ve evirici çıkış seviyesinde oluşabilecek değişimler altında evirici çıkış akımını şekillendirmektedir. Evirici çıkışında şebeke frekanslı bir transformatör kullanılmıştır. Şebeke frekanslı transformatör hem şebekeye DA akım enjeksiyonunu engellemekte hem de evirici ile şebeke arasında elektriki izolasyon sağlanmaktadır.

Bulanık mantık denetleyici tasarımının en önemli adımlarından birisi giriş ve çıkış değişkenlerinin belirlenmesidir. Şebeke etkileşimli eviricinin denetimi için tasarlanılacak olan bulanık mantık denetleyici için çıkış akım hatası ve hatanın türevi (değişim miktarı) giriş, görev oranındaki değişimde çıkış değişkeni olarak

belirlenmiştir. Hem giriş, hem de çıkış bulanık değişkenler için $[-1, +1]$ birime indirgenmiş Değer Değişim Aralığı kullanılmıştır. Bu nedenle giriş ve çıkış değişkenleri uygun ölçeklendirme katsayıları ile çarpılmıştır. Bu durum kontrol değişkenleri üzerinde yapılacak ayarlamaları, her bir değişken için sadece tek bir kazanç parametresine indirgemektedir. i_e akım hata değişkeni Eş. 5.19 ile verilmiştir.

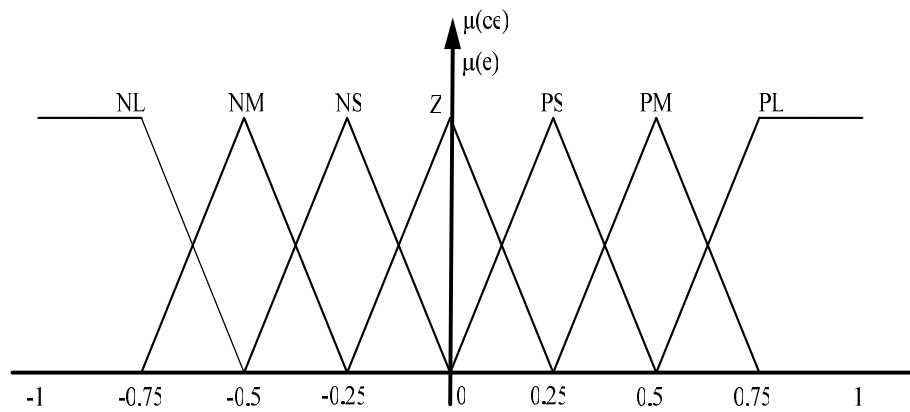
$$i_e = i_{ref} - i \quad (5.19)$$

i_{ce} akım hatasının değişimi ise Eş. 5.20 ile bulunabilir.

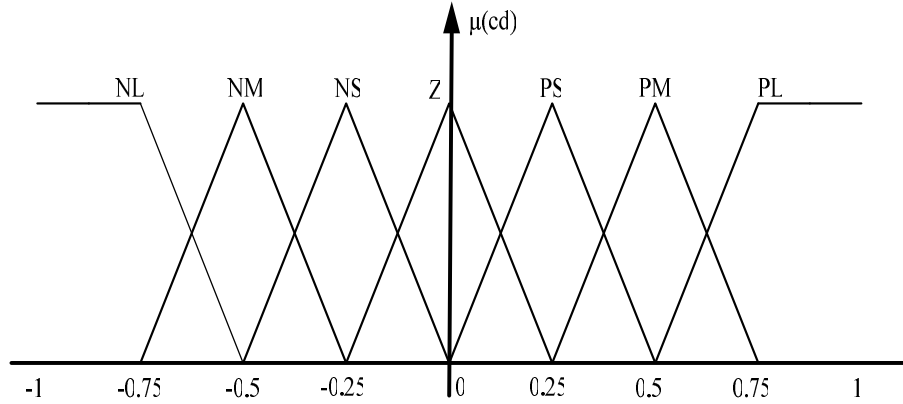
$$i_{ce} = i_e - i_{eo} \quad (5.20)$$

Giriş ve çıkış değişkenlerinin her biri binişimleri eşit yedi üçgen üyelik fonksiyonu ile gösterilmiştir. Sırasıyla giriş ve çıkış değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 5.12 ve 5.13’de görülmektedir. Bulanık çıkarım yöntemi olarak min-max, durulama yöntemi olarak ise en yaygın kullanılan durulama yöntemlerinden olan ve Eş. 5.21 ile ifade edilen ağırlık merkezi (center of gravity) yöntemi kullanılmıştır.

$$z^* = \frac{\sum \mu(z).z}{\sum \mu(z)} \quad (5.21)$$



Şekil 5.12. BMD girişleri olan hata ve hatanın türevi için belirlenen üyelik fonksiyonları



Şekil 5.13. BMD çıkışı görev oranındaki değişim için belirlenen üyelik fonksiyonları

Burada $\mu(z)$ çıkarım motorundan elde edilen üyelik değeri, z ise her kuralın çıkış değerini temsil ederken z^* 'de durulaştırılmış çıkışı göstermektedir [Atacak, Bay, 2004].

Her üç bulanık değişken “Pozitif Büyük (PB)”, “Pozitif Orta (PO)”, “Pozitif Küçük (PK)”, “Sıfır (S)”, “Negatif Küçük (NK)”, “Negatif Orta (NO)”, “Negatif Büyük (NB)” gibi dilsel ifadeler ile temsil edilmektedir. Belirlenen üyelik fonksiyonlarına göre sistemin davranışı incelenerek giriş ve çıkışlar arasında bulanık kural tabanı oluşturulmuştur. Kural tabanı, bulanık mantık denetleyicinin girişlerine göre evirici anahtarlarını kontrol eden DGM’nin görev oranını ayarlamaktadır. Şebek etkileşimli eviricinin denetimi için Çizelge 5.1’de gösterilen ve 49 kuraldan oluşan bir kural tabanı hazırlanmıştır.

5.2.4. Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici

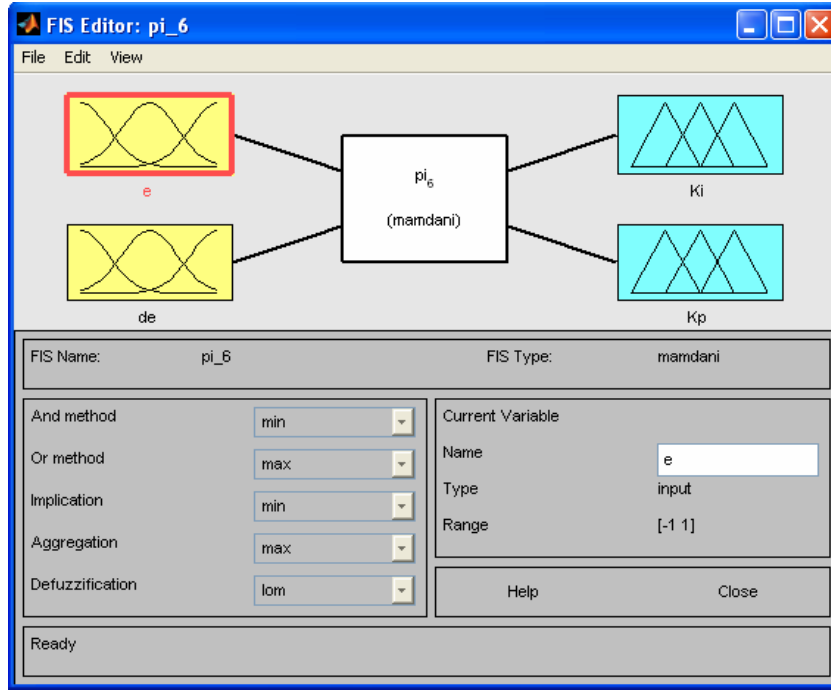
Bölüm 5.2.3.’de açıklandığı gibi güç elektroniği dönüştürücülerin denetiminde sıklıkla kullanılan klasik PI veya PID denetleyiciler, şebeke etkileşimli eviricilerin denetiminde kullanılabilmektedir. Bu denetleyicilerin kazançları tespit edilirken sistemin matematiksel modeli ve Ziegler-Nichols tarafından önerilen değerler kullanılmaktadır [Ziegler, Nichols, 1942]. Ayrıca bu klasik denetleyicilerin performansları sistem parametrelerindeki değişimlere ve gürültü gibi dış etkenlere

karşı çok duyarlıdırlar. Şebeke etkileşimli eviricinin parametreleri doğal koşullar (güneş ışıınım miktarı, rüzgâr hızı vb.) veya şebekedeki değişimler nedeniyle değişmektedir. Sistem parametrelerindeki değişimler eviricinin çalışma noktasının da değişmesini gerektirecektir. Sabit kazançlı bir PI veya PID denetleyici kullanıldığında, çalışma noktası değişen eviricinin geçici tepkisi yeterince hızlı olamamakta ve evirici akım kalitesi bekleneni sağlayamamaktadır. Bu nedenle kullanılan denetleyicinin sabit parametrelili değil değişen şartlara göre uyarlanabilir olması gereklidir.

Çizelge 5.1. Bulanık mantık denetleyici kural tabanı

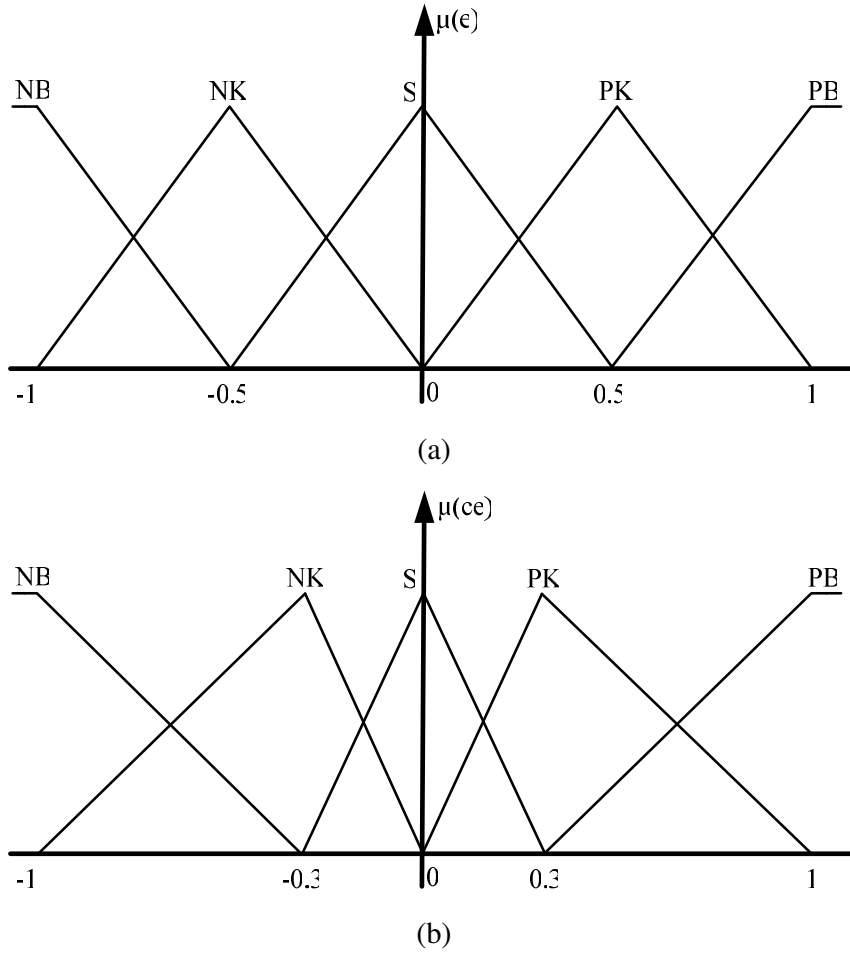
		Hata (e)						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
Hatanın Değişimi (ce)	NB	NB	NB	NB	NB	NO	NK	S
	NO	NB	NB	NB	NO	NK	S	PK
	NK	NB	NB	NO	NK	S	PK	PO
	S	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
	PK	NO	NK	S	PK	PO	PB	PB
	PO	NK	S	PK	PO	PB	PB	PB
	PB	S	PK	PO	PB	PB	PB	PB

Bulanık mantığın ayarlanabilir, sistem parametrelerinden bağımsız olma ve PI denetimin hızlı tepki özelliklerini birleştirerek Bulanık-PI denetim elde edilebilir. Bu yaklaşım ile PI denetleyicinin oransal (K_p) ve integral (K_I) kazançları sabit olmayıp çalışma süresince sistemin çalışma noktasına göre belirlenen girişler için bulanık mantık tarafından tespit edilmektedir. Şebeke etkileşimli eviricinin Bulanık-PI denetimi için değişen şartlara göre eş zamanlı olarak sistemin K_p ve K_I kazançlarını tespit etmek için Şekil 5.14’de gösterilen iki giriş-iki çıkışlı bir denetleyici tasarlanmıştır.



Şekil 5.14. İki giriş-iki çıkışlı BMD

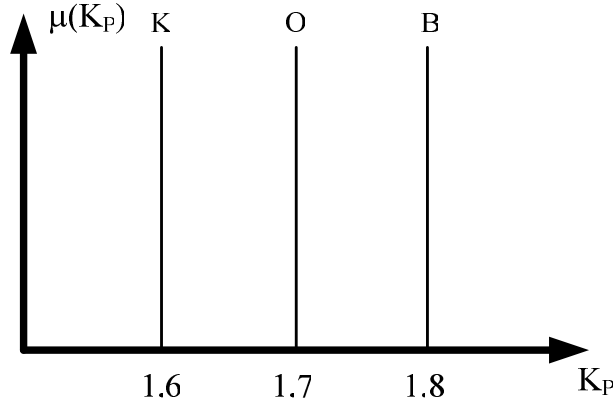
Şebeke etkileşimli evirici akım kontrollü olarak tasarlandığından bulanık mantık denetleyicinin girişleri olarak seçilmiştir. Her iki giriş değişkeni için binişimleri eşit üçgen şeklinde beş üyelik fonksiyonu belirlenmiştir. Şekil 5.15’de girişler e ve ce için belirlenen üyelik fonksiyonları görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi giriş bilgileri “Negatif Büyük (NB)”, “Negatif Küçük (NK)”, “Sıfır (S)”, “Pozitif Küçük (PK)”, “Pozitif Büyük (PB)” gibi dilsel etiketler ile temsil edilmektedir. Giriş değişkenleri için $[-1, +1]$ birime indirgenmiş Değer Değişim Aralığı kullanılmıştır. Bu nedenle giriş ve çıkış değişkenleri uygun ölçeklendirme katsayıları ile çarpılmıştır. i_e akım hata değişkeninin hesaplanmasında Eş. 5.19, i_{ce} akım hatasının değişiminin hesaplanmasında ise Eş. 5.20 kullanılmıştır. Bulanık çıkarım yöntemi olarak min-max, durulama yöntemi olarak ise yine Eş. 5.21 ile ifade edilen ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır.



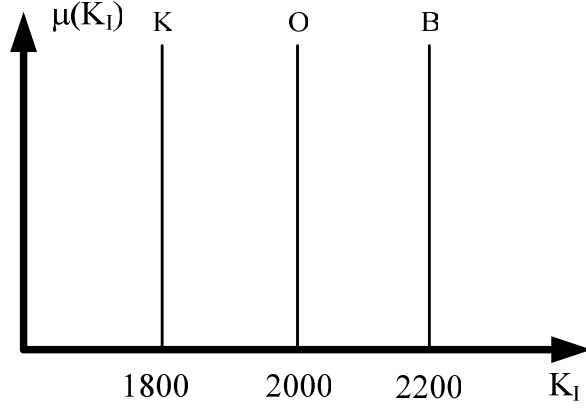
Şekil 5.15. (a)Hata ve (b)Hatanın değişimi girişleri için üyelik fonksiyonları

Bulanık mantık denetleyicinin çıkışları ise K_p ve K_I kazançlarıdır. Çıkışlar için Şekil 5.16’da gösterilen “Küçük (K)”, “Orta (O)”, “Büyük (B)” şeklinde dilsel etiketler ile temsil edilen 3 adet bulanık teklik (singleton) tipi üyelik fonksiyonu seçilmiştir.

Tasarlanan bulanık mantık denetleyicinin K_p ve K_I kazançlarının tespiti için kullanılacak iki ayrı kural tabanı bulunmaktadır. K_p ve K_I kazançları için kullanılan kural tabanları sırasıyla Çizelge 5.2 ve 5.3’de gösterilmiştir. Bu kural tabanı ile oluşan bulanık yüzey de Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.16. (a) K_P ve (b) K_I çıkışları için belirlenen üyelik fonksiyonlarıÇizelge 5.2. K_P kazancı için kullanılan kural tablosu

Hata (e)

	NB	NK	S	PK	PB
NB	B	B	O	O	K
NK	B	B	O	K	K
S	O	O	O	O	O
PK	K	O	O	O	B
PB	K	K	O	B	B

Hatanın değişimi (de)

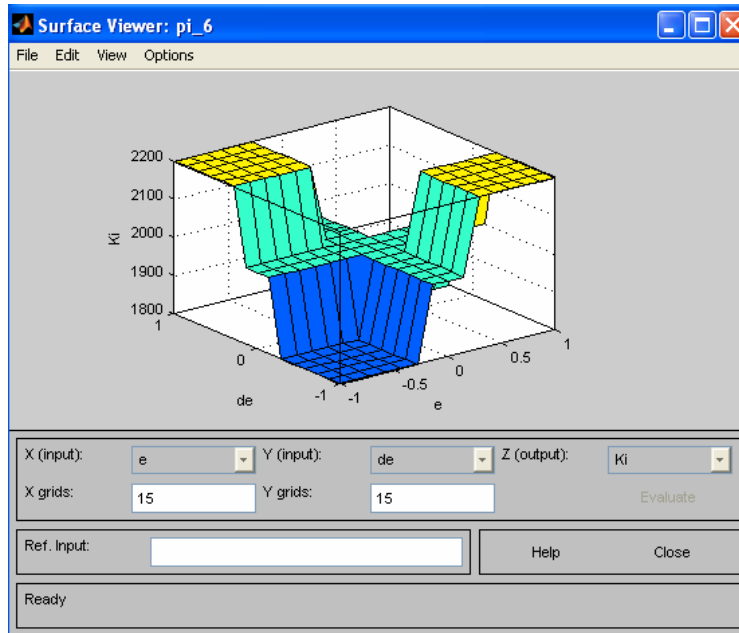
Çizelge 5.3. K_I kazancı için kullanılan kural tablosu

Hata (e)

	NB	NK	S	PK	PB
NB	K	K	O	B	B
NK	K	K	O	B	B
S	O	O	O	O	O
PK	B	B	O	K	K
PB	B	B	O	K	K

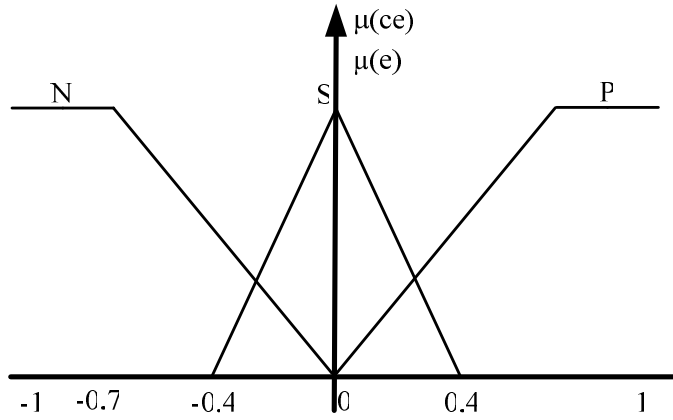
Hatanın değişimi (de)

Benzetim çalışmalarının tamamlanması ile tasarlanan Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde iki girişli-iki çıkışlı BMD yerine iki girişli- bir çıkışlı iki adet BMD kullanmanın daha yüksek örnekleme frekansına erişilmesini sağladığı görülmüştür. Ancak erişilen örnekleme frekansı yetersiz olduğu için iki girişli-bir çıkışlı ve tek kural tabanına sahip bir BMD ile çalışmalar devam ettirilmiştir. BMD çıkışları farklı kazançlar ile çarpılarak K_P ve K_I katsayıları elde edilmiştir.

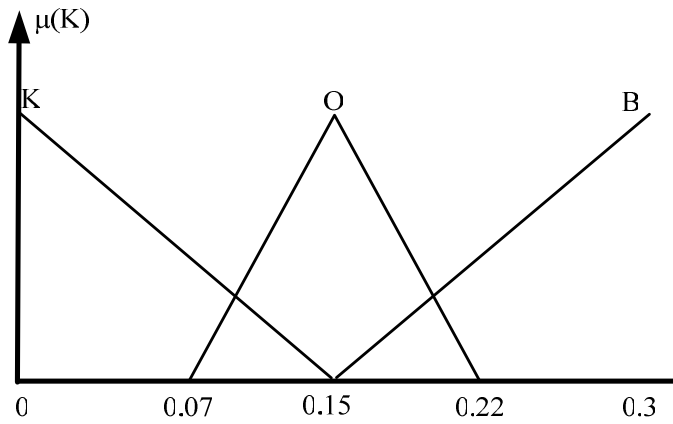


Şekil 5.17. Bulanık mantık denetleyici yüzeyi

Bulanık mantık denetleyicinin girişleri olan akım hatası ve akım hatasının değişimi için Şekil 5.18’de gösterildiği gibi “Negatif (N)”, “Sıfır (S)”, “Pozitif (P)” olarak dilsel etiketler ile temsil edilen 3 üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Bulanık mantık denetleyicinin çıkışı ise Şekil 5.19’da görüldüğü gibi “Büyük (B)”, “Orta (O)”, “Küçük (K)”, şeklinde dilsel etiketler ile ifade edilen 3 üyelik fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Kullanılan kural tabanı Çizelge 5.4’de görülmektedir.



Şekil 5.18. Girişler için tanımlanan üyelik fonksiyonları



Şekil 5.19. Çıkış için tanımlanan üyelik fonksiyonları

Çizelge 5.4. Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici uygulamasında kullanılan kural tabanı

		Hata (e)		
		N	S	P
Hatanın değişimi (de)	N	K	O	B
	S	O	O	O
	P	B	O	K

Elde edilen benzetim ve uygulama sonuçları sırasıyla Bölüm 6.3.1 ve 6.3.2’de gösterilmiştir.

5.2.5. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici

Bulanık mantık denetleyiciler, sistemlerin matematiksel modellerine ihtiyaç duymamaları, parametre ve çalışma noktasının değişimine duyarsız olması nedeniyle özellikle mikroişlemci teknolojilerindeki gelişmeler ile birlikte güç elektroniği dönüştürücülerinin denetiminde sıklıkla kullanılır hale gelmiştir. Ancak bulanık mantık denetleyicinin performansı kural tabanına, üyelik fonksiyonlarının sayılarına ve şekillerine bağlıdır. Bu değişkenler genellikle deneme yanılma yöntemi ile elde edilmektedir. Bu işlem bazen uzun bir süre alabilmektedir. Bazı durumlarda ise en iyi sonuç hiçbir zaman elde edilememektedir [Nrad ve Deeb, 1999]

Yapay sinir ağları, çok sayıda doğrusal olmayan hücrenin katmanlar halinde düzenlenmesi ve farklı ağırlık değerlerinde bağlantılarla birbirine bağlanması sonucu elde edilen ve paralel çalışma yeteneğine sahip matematiksel bir modeldir. Doğrusal olmayan ve uyarlanabilir yapıları, öğrenme ve genelleme yetenekleri sistem parametrelerinden bağımsız olarak tasarlanabilmeleri gibi üstünlükleri yapay sinir ağlarının güç elektroniği dönüştürücülerinin denetiminde kullanılmalarını sağlamıştır. Bunun yanında gizli katman sayısının ve bu katmanlardaki hücre sayısının belirlenmesinde kesin kuralların bulunmaması, ağırlık eğitim sorunu ve kalıcı

durum hatalarını giderilememesi gibi sınırlılıkları bulunmaktadır [Elmas, 2003; Uddin ve ark., 2004].

Her iki denetim yönteminin üstün özelliklerini birleştirerek bulanık mantık prensiplerini kullanan bulanık sinirsel ağ yapıları geliştirilmiştir. Bu yöntem ile yapay sinir ağlarının öğrenebilme, paralel bilgi işleyebilme yetenekleri ile bulanık mantığın insan beyni gibi çıkarım yapabilme yeteneği birleştirilmiştir. Bulanık sinirsel sistemler, bulanık mantığın ve yapay sinir ağlarının kullanıldığı bütün uygulamalarda özellikle doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde kullanılabilir [Dash ve ark., 1997; Elmas, 2003; Zhang ve Morris, 1995; Leu ve ark., 1997; Vas ve Stronach, 1996].

Bulanık sinirsel denetimde kullanılan ağ yapılarından biriside ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)'dir. Uyarlamalı ağ, her hücrenin giriş sinyali üzerinde özel bir işlevi yerine getirdiği çok katmanlı ileri beslemeli bir ağıdır. Her hücre için geçerli olan işlevler farklı olabilir ve bu işlevler uyarlamalı ağın gerçekleştirmek için tasarlandığı giriş-çıkış işlevine bağlı olarak belirlenmektedir. İstenilen giriş-çıkış eşleştirmesini gerçekleştirebilmek için hücrelerdeki parametreler verilen eğitim verisine ve öğrenme prosedürüne göre güncellenmektedir [Dash ve ark., 1997].

Sinirsel uyarlamalı bu öğrenme yönteminin ana fikri oldukça basittir. Bu yöntem bulanık modelleme prosedürü için, veri setinden öğrendiği bilgiler ile bulanık çıkarım sisteminin verilen giriş-çıkış eşleşmesini gerçekleştirebilmesini sağlayacak en uygun üyelik fonksiyonu parametrelerinin hesaplamasını sağlayan bir metot sağlar. ANFIS, giriş-çıkış verisi ile yalnız başına geri yayılım algoritması veya en düşük kareler metodu ile birlikte kullanarak üyelik fonksiyonlarının parametreleri ayarlanmış bulanık çıkarım sistemi tasarlar. Böylece bulanık mantık sisteme öğrenme yeteneğini kazandırmaktadır [Mathworks, 2005].

ANFIS kullanılarak modelleme yaklaşımı pek çok sistem kimliklendirme tekniği ile benzeşmektedir. İlk önce model yapısı için giriş-çıkış sayısı, üyelik fonksiyonu sayısı

gibi parametreleri belirlenir. Ardından ANFIS tarafından eğitim için kullanılabilecek giriş-çıkış verisi toplanır. ANFIS, bu veri setini kullanarak seçilen hata kriterine göre üyelik fonksiyonlarını düzenleyerek bulanık çıkarım sistemini eğitir. Daha sonra eğitimde kullanılan başka bir veri seti ile eğitilmiş bulanık çıkarım sistemi test edilir. Çizelge 5.5’de eğitim için kullanılan, Çizelge 5.6’da ise test işleminde kullanılan veri setlerinin bir bölümü görülmektedir. Her iki işlem içinde bulanık mantık denetimli olarak gerçekleştirilen benzetimlerden elde edilen 1200 veri kullanılmıştır.

ANFIS grafik kullanıcı arayüzü Şekil 5.20’de görülmektedir. Bu arayüz kullanılarak eğitim ve test verileri yüklenmekte, giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarının sayıları ve şekilleri belirlenebilmektedir. Bu çalışmada giriş ve çıkış için maksimum üyelik fonksiyonu sayısı 3 olarak belirlenmiştir.

Giriş sinyalleri için çan eğrisi şeklinde üyelik fonksiyonları seçilmiştir. Eğitim işlemi sonucunda hata (e) ve hatanın değişimi (ce) için elde edilen giriş üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de görülmektedir. Görüldüğü gibi her iki giriş için “Küçük” (K) ve “Büyük” (B) olarak etiketlenmiş iki adet üyelik fonksiyonu belirlenmiştir.

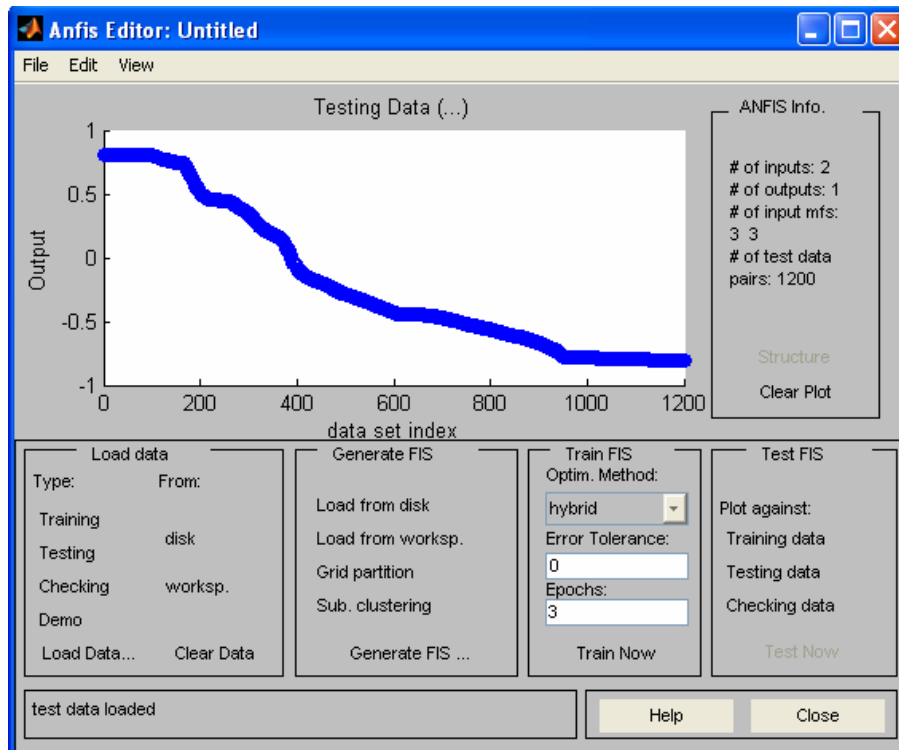
ANFIS sadece Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemleri için kullanılabilmektedir. Sugeno veya Takagi-Sugeno-Kang metodu olarak adlandırılan bu bulanık çıkarım yöntemi 1985’de tanıtılmıştır. Pek çok yönden en yaygın kullanılan bulanık çıkarım yöntemi olan Mamdani (Min-max) yöntemi ile benzerdir. Bulanık çıkarım işleminin ilk iki aşaması olan giriş sinyallerinin bulanıklaştırılması ve bulanık işlemin uygulanması her iki yöntemde de aynıdır. İki yöntem arasındaki en önemli fark Sugeno yönteminde çıkış üyelik fonksiyonunun doğrusal veya sabit olmasıdır. Birinci dereceden Sugeno tipi bir sistemde kurallar Eş. 5.22’de gösterildiği gibi tanımlanır.

Çizelge 5.5. ANFIS'in eğitiminde kullanılan veri seti

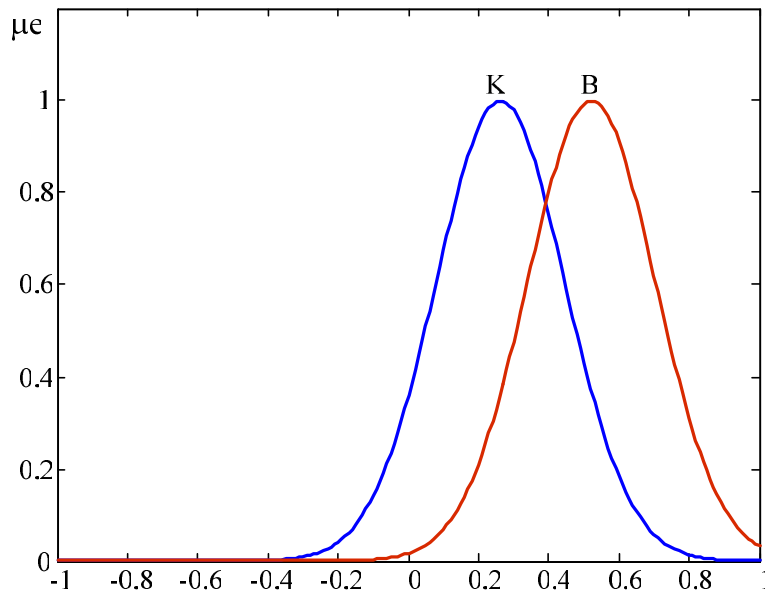
e	ce	cd
1	0,004551	0,809949
1	0,005452	0,809776
0,928409	0,009067	0,809073
1	0,031126	0,804788
0,741226	0,017787	0,797025
0,875348	0,085083	0,793684
1	-0,01496	0,791201
1	-0,01753	0,788018
:	:	:
:	:	:
:	:	:
-0,85927	-0,0326	-0,80451
-0,87496	-0,03257	-0,80451
-0,8912	-0,03245	-0,80454
-1	-0,02705	-0,8056
-1	-0,02129	-0,80675
-0,75324	-0,01763	-0,80746
-1	-0,01448	-0,80806
-1	-0,00275	-0,81029

Çizelge 5.6. ANFIS'in testinde kullanılan veri seti

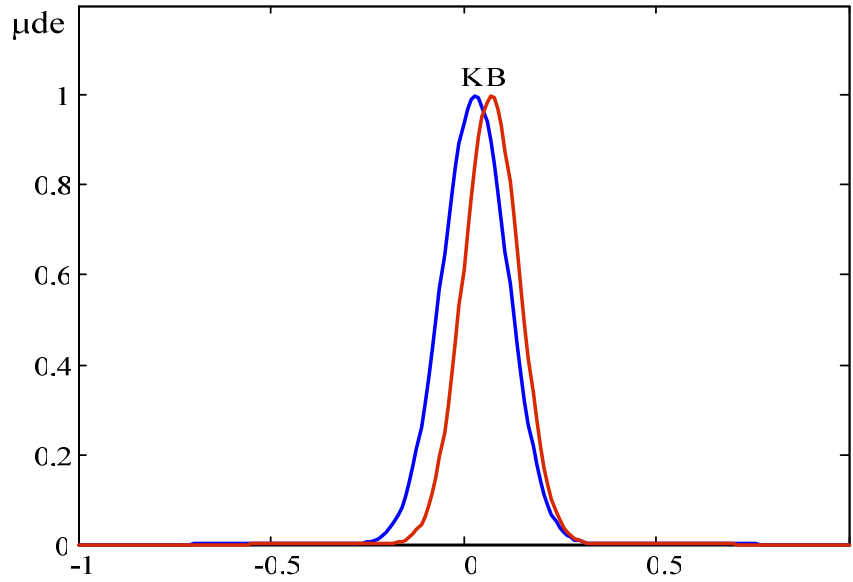
e	ce	cd
1.000000	0.005179	0.809829
1.000000	0.007144	0.809449
0.769360	0.012001	0.808521
1.000000	0.042729	0.802505
0.761859	-0.010354	0.796863
0.922742	-0.013116	0.793467
1.000000	-0.016563	0.789218
1.000000	0.114140	0.787348
:	:	:
:	:	:
:	:	:
-0.870924	-0.032573	-0.804513
-0.879559	-0.032471	-0.804533
-0.895232	-0.032441	-0.804538
-0.896149	-0.022001	-0.806613
-0.749289	0.006330	-0.807163
-0.792604	-0.234226	-0.807815
-1.000000	0.006350	-0.808355
-0.894816	0.002133	-0.810410



Şekil 5.20. ANFIS kullanıcı arayüzü



Şekil 5.21. ANFIS'in hata (e) için belirlediği üyelik fonksiyonları



Şekil 5.22. ANFIS'in hatanın değişimi (de) için belirlediği üyelik fonksiyonları

$$\text{EĞER } x=A \text{ ve } y=B \text{ ise O HALDE } z=p*x+q*y+r \quad (5.22)$$

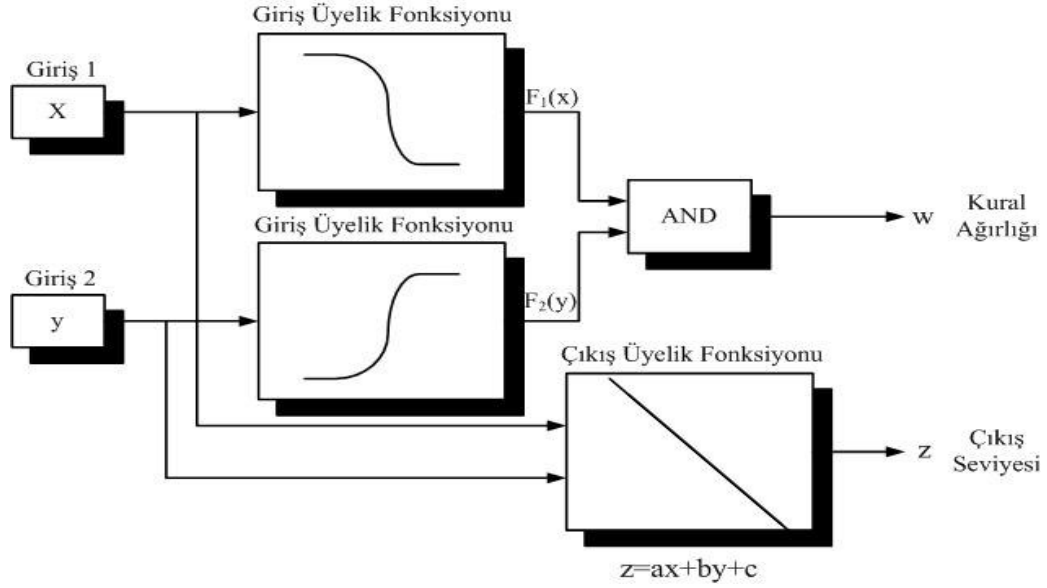
Burada x , y öncül değerler iken p, q ve r birer sabit sayıdır. Sıfırıncı dereceden bir Sugeno modeli için çıkış seviyesi sabittir ($a=b=0$) ve çıkış üyelik fonksiyonları bulanık teklik (singleton) olarak tanımlanır. Her kuralın çıkış seviyesi z_i etki derecesi w_i ile ağırlıklandırılır. Örneğin Giriş 1= x ve Giriş 2= y ve AND kuralı için etki derecesi Eş. 5.23 ile bulunabilir.

$$w_i = \text{AndMethod} (F1(x), F2(y)) \quad (5.23)$$

Burada $F1()$ ve $F2()$, girişler 1 ve 2 için üyelik fonksiyonlarıdır. Sonuç olarak sistemin çıkışı her kural sonucunun ağırlıklı ortalamasıdır ve Eş. 5.24 ile hesaplanır [Mathworks, 2005].

$$\text{Çıkış} = \frac{\sum_i^N w_i z_i}{\sum_i^N w_i} \quad (5.24)$$

Sugeno tipi çıkarım işlemi Şekil 5.23’de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Sugeno tipi çıkarım metodunun işletimi

Bu çalışmada verilen eğitim ve test verileri için ANFIS iki çıkış üyelik fonksiyonu ve iki kural belirlemiştir. AND metodu olarak Product seçilmiştir. Belirlenen bu kurallar aşağıda verilmiştir.

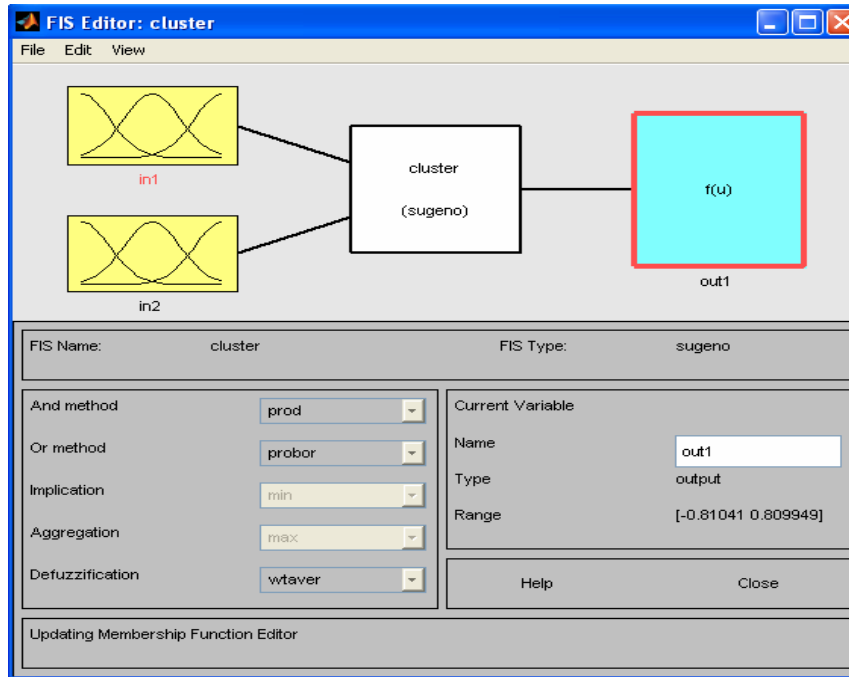
1. Kural: Eğer $x=K$ ve $y=K$ ise $z= p_1*x+q_1*y+r_1$
2. Kural: Eğer $x=B$ ve $y=B$ ise $z= p_2*x+q_2*y+r_2$

Bu kurallarda belirtilen sabitler Eş. 5.25 ve Eş. 5.26’da verilmiştir.

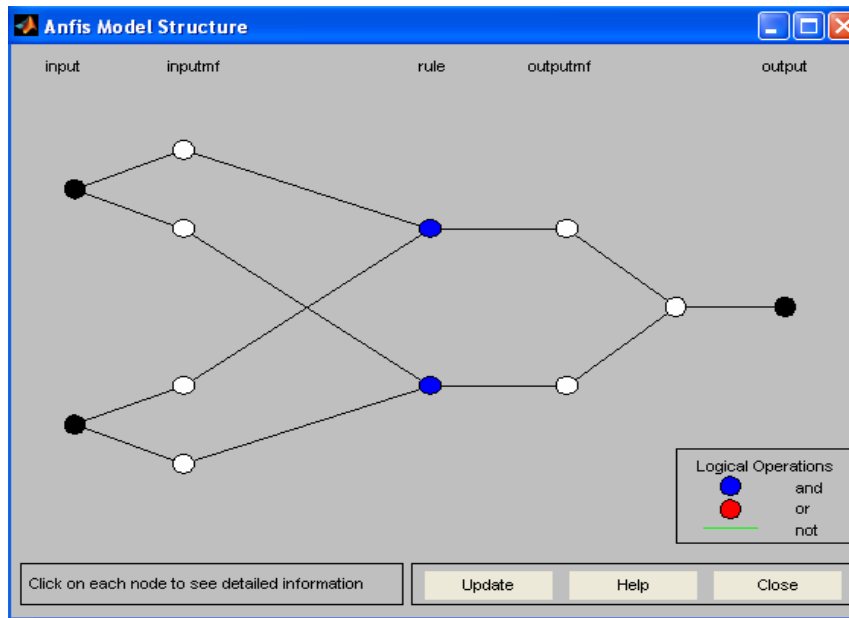
$$p_1=0,8217 \quad q_1=0,823 \quad r_1 =-0.004214 \quad (5.25)$$

$$p_2=0,3783 \quad q_2=0,526 \quad r_2 = 0.4078 \quad (5.26)$$

ANFIS kullanılarak elde edilen 2 girişli bir çıkışlı BMD ve bunun yapısı sırasıyla Şekil 5.24 ve 5.25’de görülmektedir.



Şekil 5.24. ANFIS tarafından elde edilen 2 girişli 1 çıkışlı BMD



Şekil 5.25. ANFIS tarafından elde edilen 2 girişli 1 çıkışlı BMD yapısı

Elde edilen benzetim ve uygulama sonuçları sırasıyla Bölüm 6.4.1 ve 6.4.2’de gösterilmiştir.

6. BENZETİM VE UYGULAMA SONUÇLARI

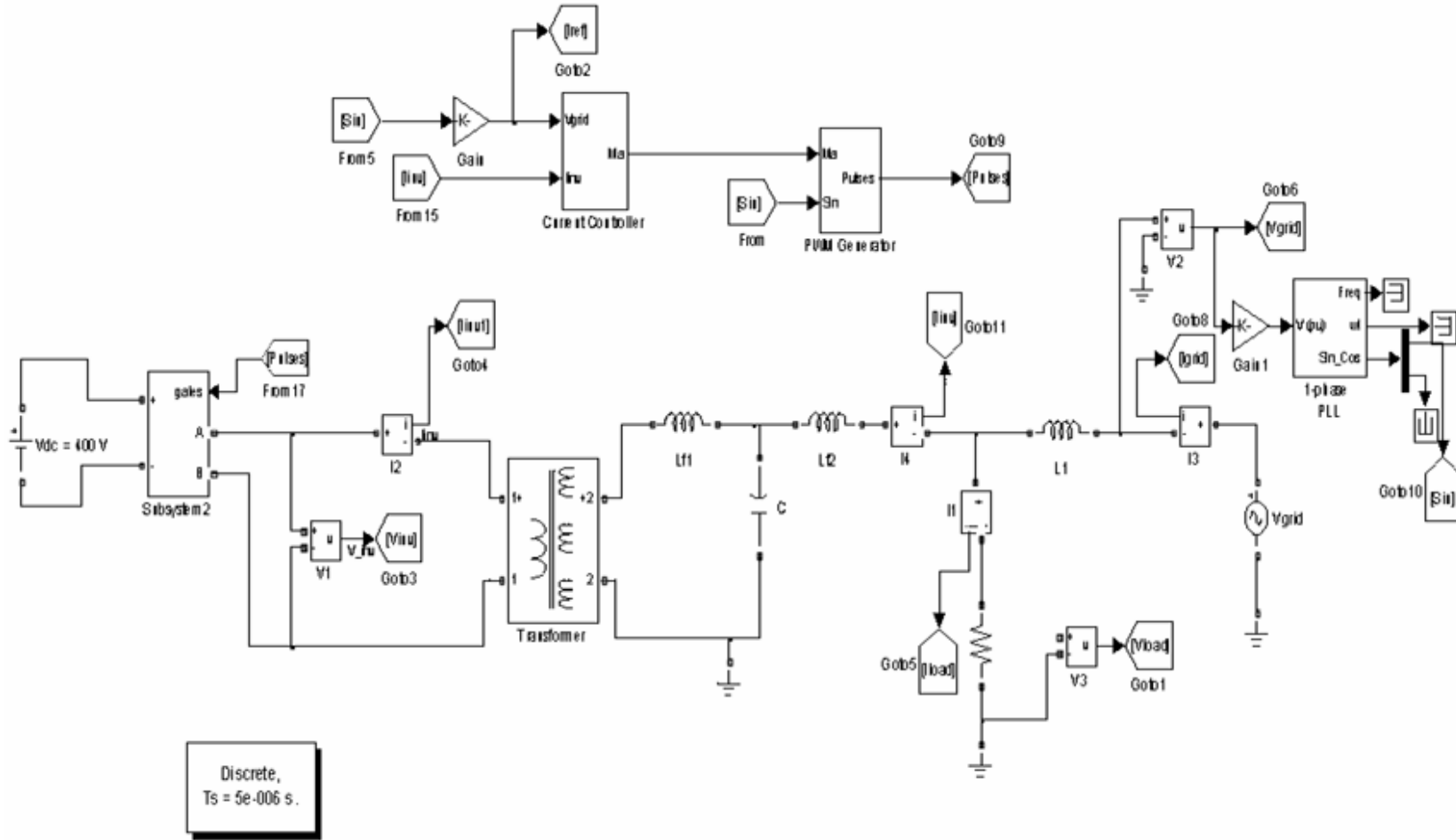
Bu bölümde tez çalışması süresince yapılan benzetim ve uygulama çalışmalarının sonuçları sunulacaktır. Bütün benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonuçlarının alınmasında Fluke 43B güç kalitesi analizörü ve Tektronix TDS3014 dijital osiloskop kullanılmıştır. Şebeke etkileşimli eviricide şebeke ile senkronizasyonu sağlamak için PLL devresi, evirici yapısı olarak gerilim kaynaklı evirici kullanılmıştır. Gerilim kaynaklı evirici ile AA'ya dönüştürülen gerilim hat frekanslı bir transformatör ile şebeke gerilimi seviyesine yükseltilmiştir. Hat frekanslı transformatör kullanılarak şebekeye DA akım enjeksiyonu engellenmiş, DA enerji kaynağının topraklanmasına imkân sağlanmış ve şebeke ile elektriki izolasyonu sağlanmıştır. Transformatör çıkışına gerilim kaynaklı eviricideki yüksek frekanslı anahtarlama nedeniyle oluşan yüksek frekanslı harmonik bileşenleri yok etmek için LCL filtre bağlanmıştır.

6.1. PI Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici

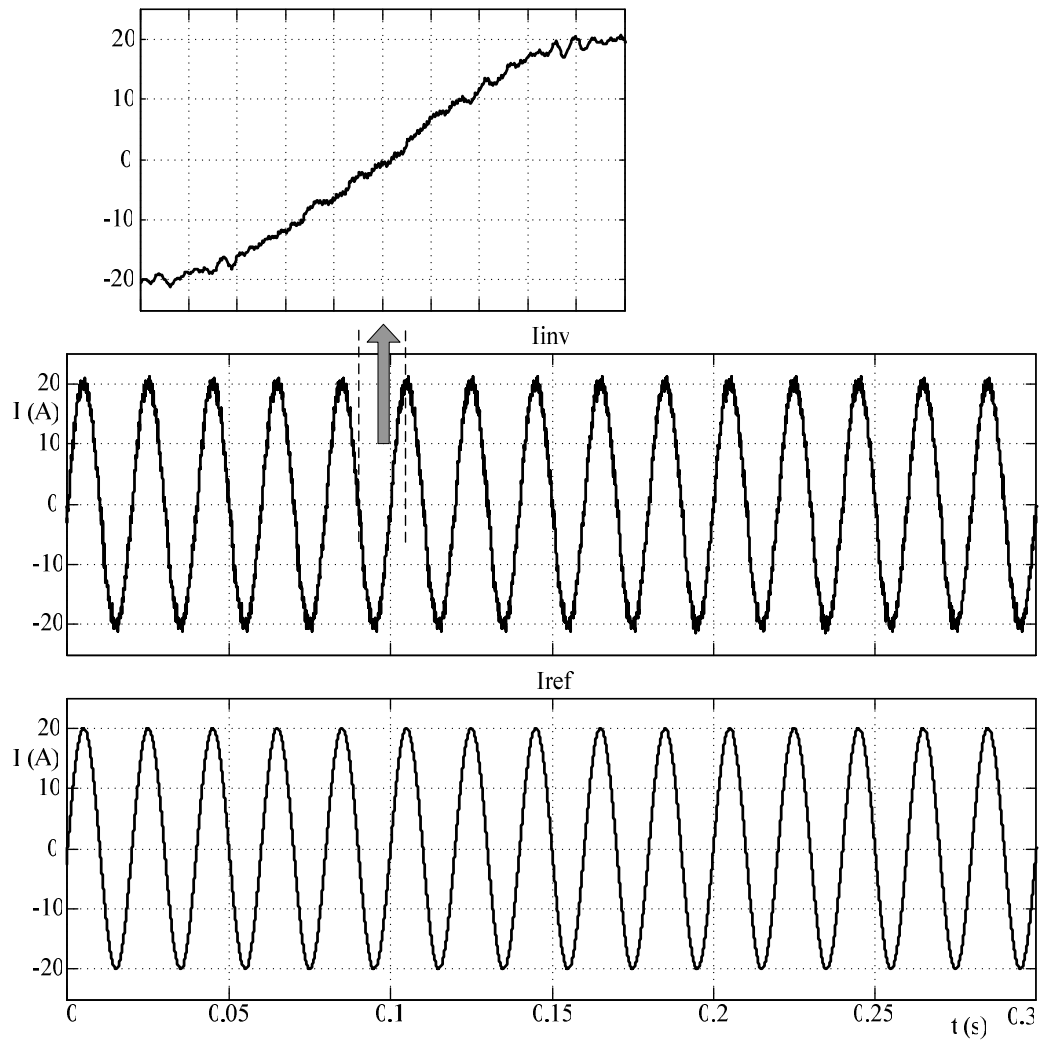
6.1.1. Benzetim sonuçları

PI denetimli şebeke etkileşimli evirici benzetimi çalışmaları için kullanılan MATLAB/Simulink modeli Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekil 6.2'de evirici çıkış akımı ile akım referansı, Şekil 6.3'de şebeke gerilimi ve evirici çıkış akımı görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi evirici çıkış akımı, referans akımını takip etmektedir. Evirici akımı birim güç faktöründe çalışmayı sağlayacak şekilde şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanstadır. Ayrıca evirici akımı sinüs şeklinde ve akım harmonikleri de Şekil 6.4'de görüldüğü gibi uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dâhilindedir. Eş. 6.1 kullanılarak 10000 değer için hesaplanan ortalama bağıl hata (OBH) değeri 0,02878'dir ve referans sinyalin büyük bir başarı ile takip edildiğini göstermektedir.

$$OBH = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{I_{refi} - I_{invi}}{I_{invi}}}{n} \quad (5.1)$$



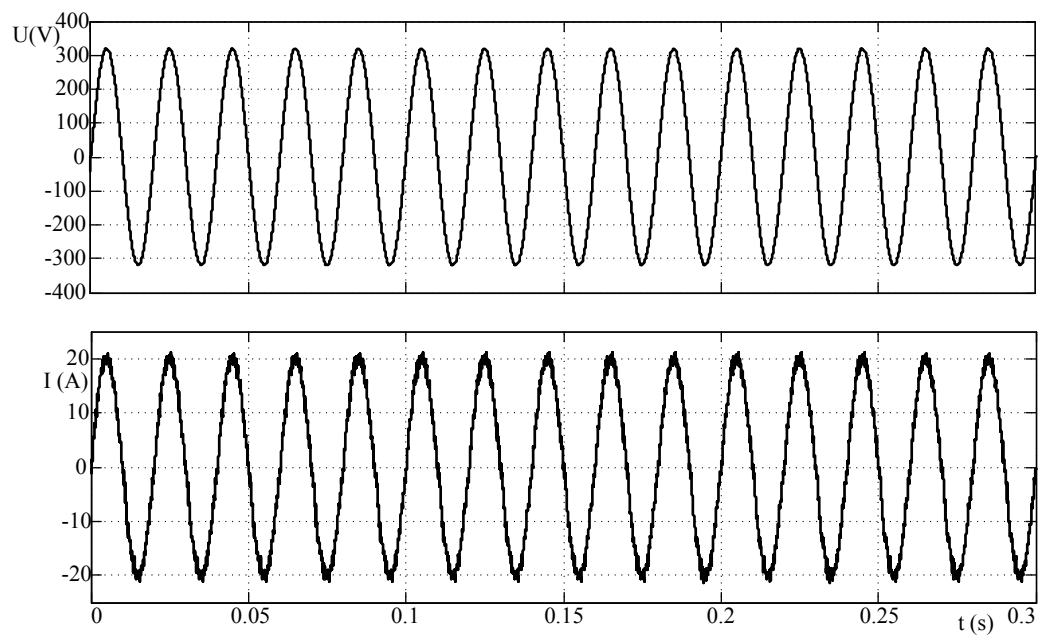
Şekil 6.1. Benzetimi yapılan PI denetimli şebeke etkileşimli evirici modeli



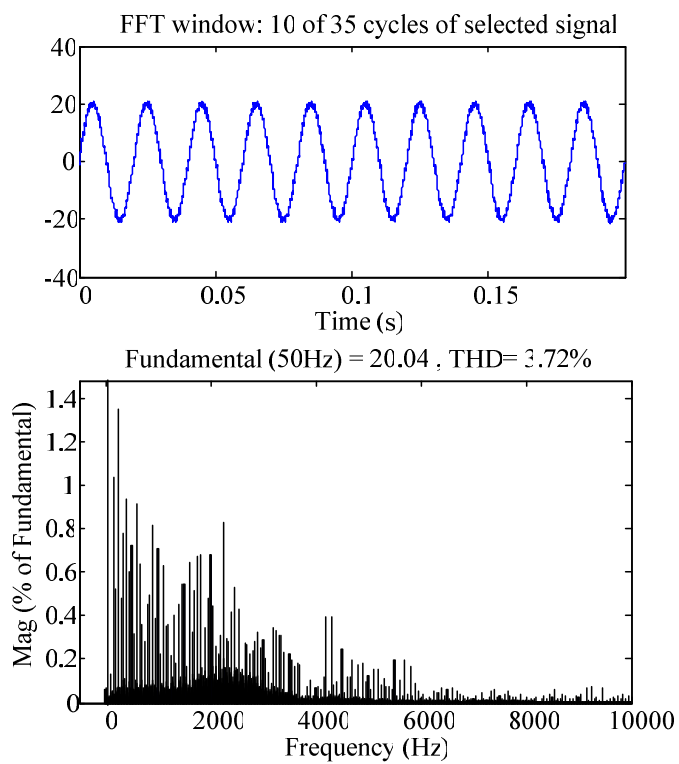
Şekil 6.2. Evirici akım referansı ve evirici akımı

6.1.2. Uygulama sonuçları

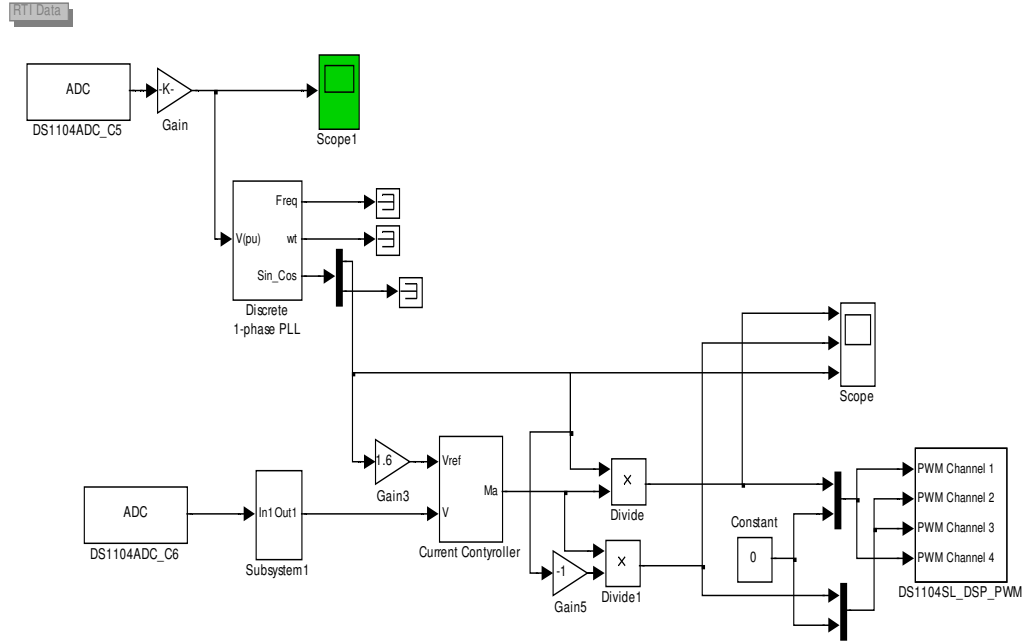
Benzetim çalışmaları tamamlandıktan sonra MATLAB/Simulink'de hazırlanan kontrol bloklarına analog sinyalleri okumak ve anahtarlama sinyallerini üretmek için gerekli olan dSPACE blokları eklenerek sistemin dSPACE modeli hazırlanmıştır. Hazırlanan dSPACE modeli Şekil 6.5'de görülmektedir.



Şekil 6.3. Şebeke gerilimi ve evirici akımı



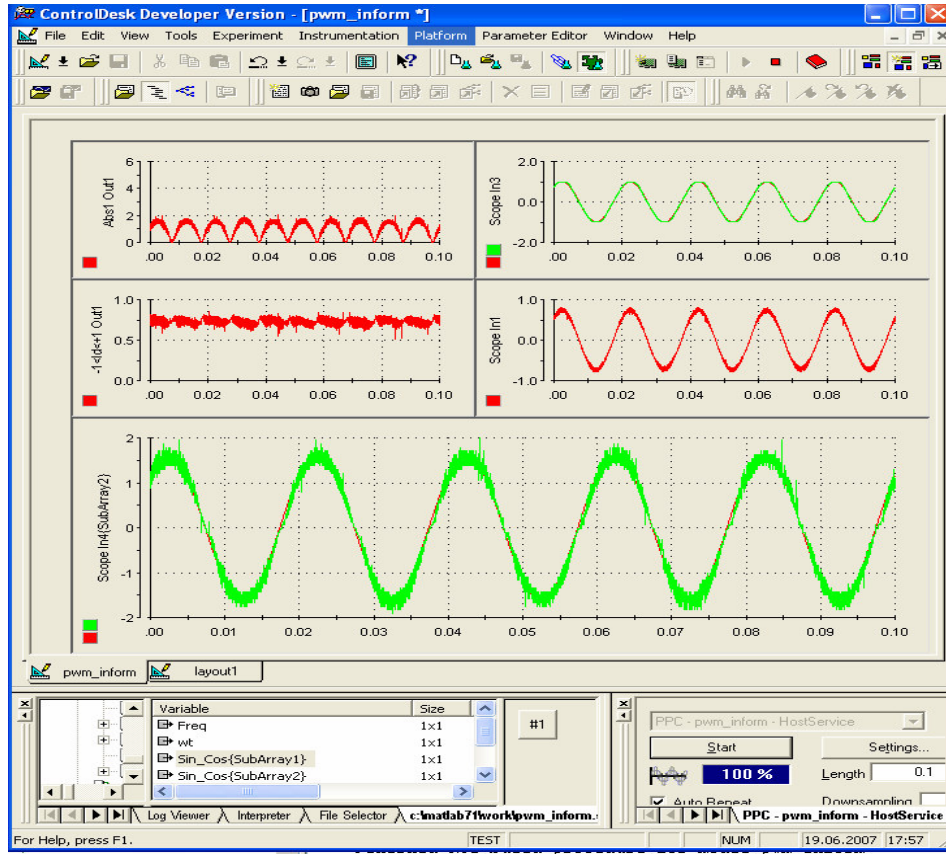
Şekil 6.4. Evirici akım harmonikleri



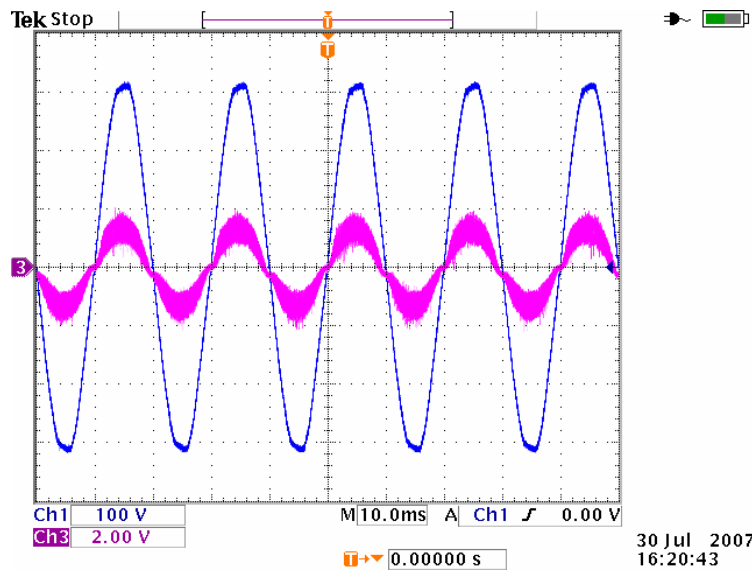
Şekil 6.5. Şebeke etkileşimli evirici uygulamasında kullanılan model

ControlDesk yazılımı ile hem dSPACE kartı kontrol (çalıştırma, durdurma, program yükleme) edilebilirken hem de değişkenleri gerçek zamanlı olarak izlenebileceği grafik arayüzler tasarlamak mümkündür. Şebeke etkileşimli evirici için tasarlanan grafik kullanıcı arayüzü Şekil 6.6’da görülmektedir. Böylece ek ölçü aletlerinin kullanım ihtiyacı azaltılmış ayrıca her değişkenin ve işlem sonucunun takibine imkân sağlanmıştır.

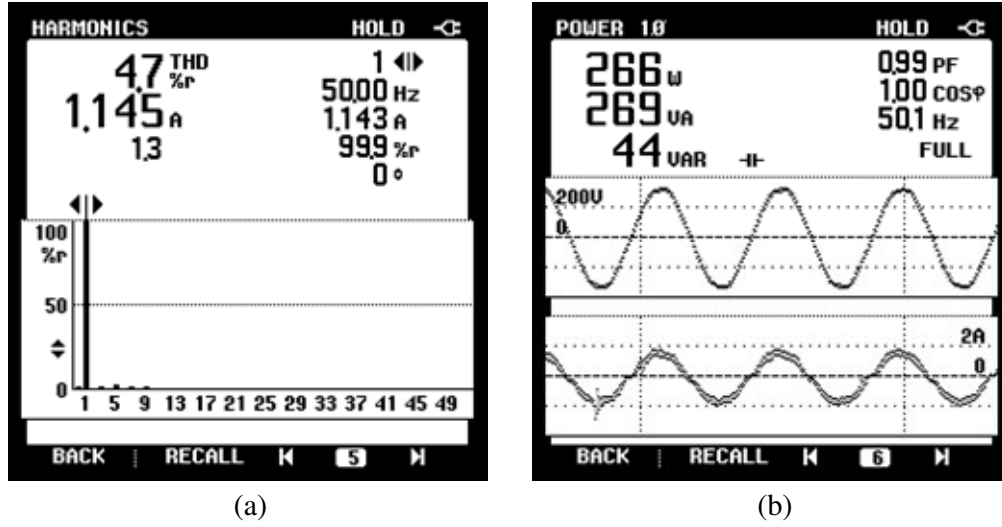
Şekil 6.7’de eviricinin çıkış akımı ve şebeke gerilimi, Şekil 6.8’de ise şebeke etkileşimli evirici çıkış akım harmonikleri, güç ve güç katsayısı değerleri görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi şebeke etkileşimli evirici çıkış akımı sinüs şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı fazdadır. Evirici akımı THD’si %4,7 ve güç faktörü 0,99 olup uluslararası standartlarda belirtilen sınırlamalara uygundur.



Şekil 6.6. Şebeke etkileşimli evirici uygulaması için ControlDesk programında tasarlanan arayüz



Şekil 6.7. Şebeke etkileşimli evirici çıkış akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 1)

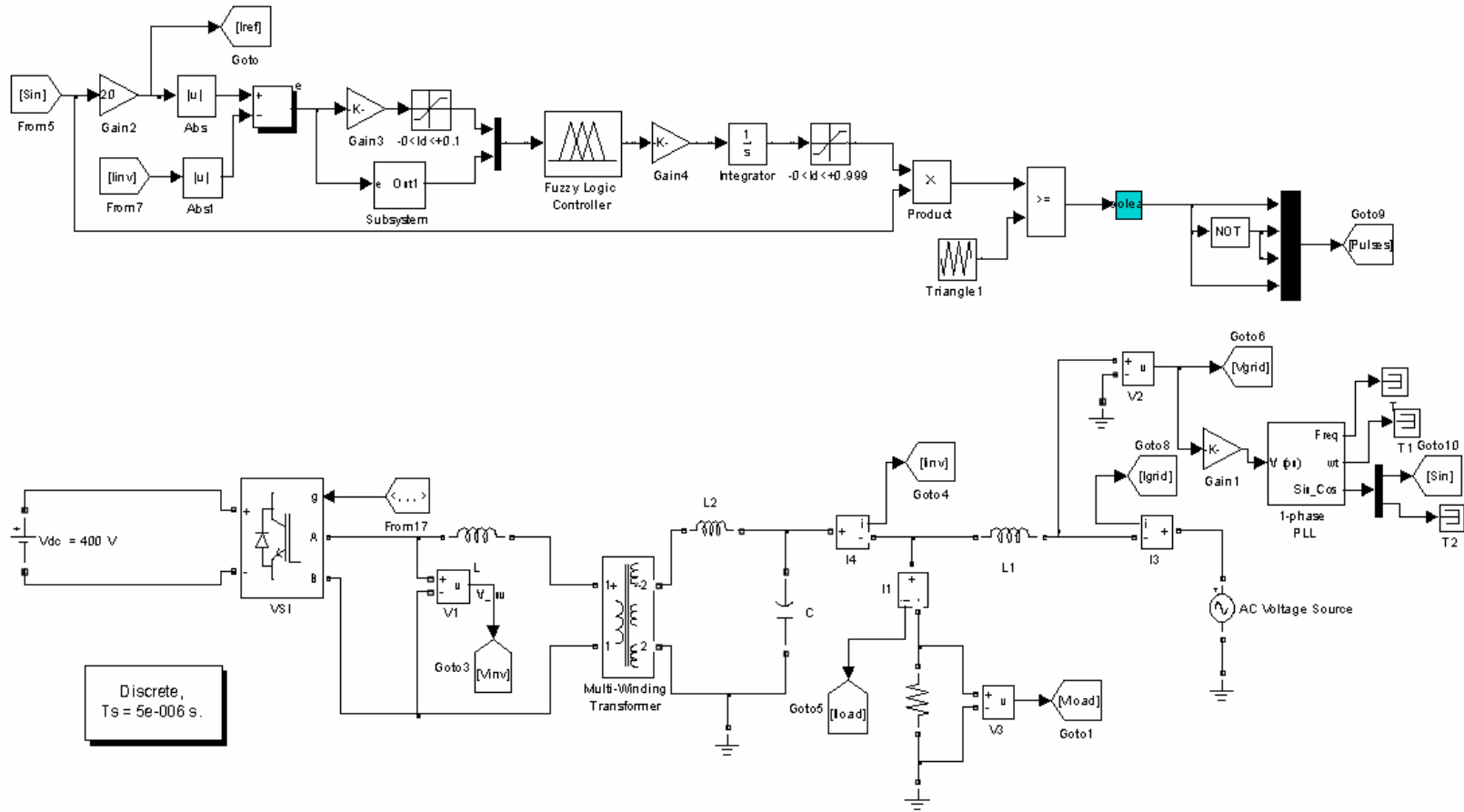


Şekil 6.8. (a)Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri (b) Evirici akım gerilim dalga şekli, güç ve güç katsayısı değerleri

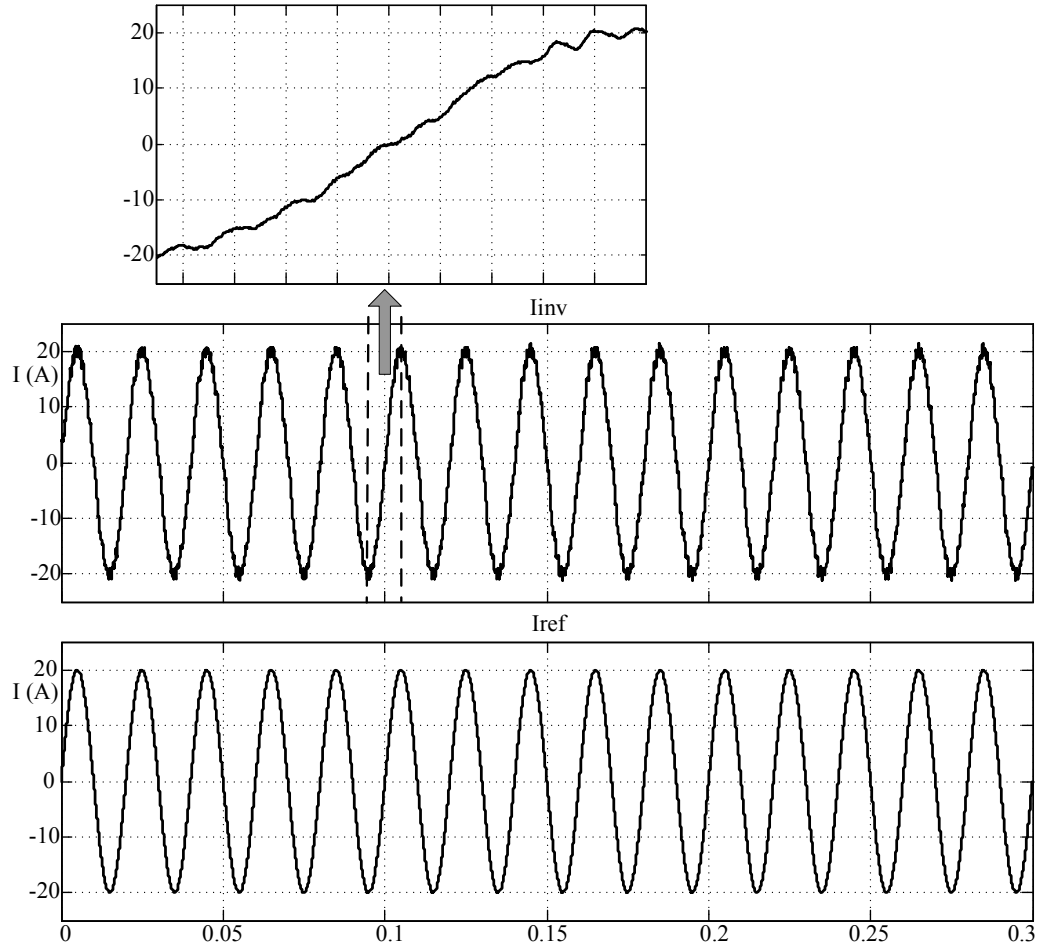
6.2. Bulanık Mantık Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici

6.2.1. Benzetim sonuçları

Bulanık mantık denetimli şebeke etkileşimli evirici benzetimi çalışmaları için kullanılan MATLAB/Simulink modeli Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Şekil 6.10’da evirici çıkış akımı ile akım referansı, Şekil 6.11’de şebeke gerilimi ve evirici çıkış akımı görülmektedir. Evirici çıkış akımı harmonikleri ise Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Bu şekillerden, evirici çıkış akımının referans akımını büyük bir başarı ile takip ettiği, sinüs şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olduğu, akım harmoniklerinin de uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dahilinde ($3,35\% < 5\%$) olduğu görülmektedir. Eş. 6.1 kullanılarak 10000 değer için hesaplanan OBH değeri 0,02618’dir ve referans sinyalin PI denetimden daha başarılı takip edildiğini göstermektedir.

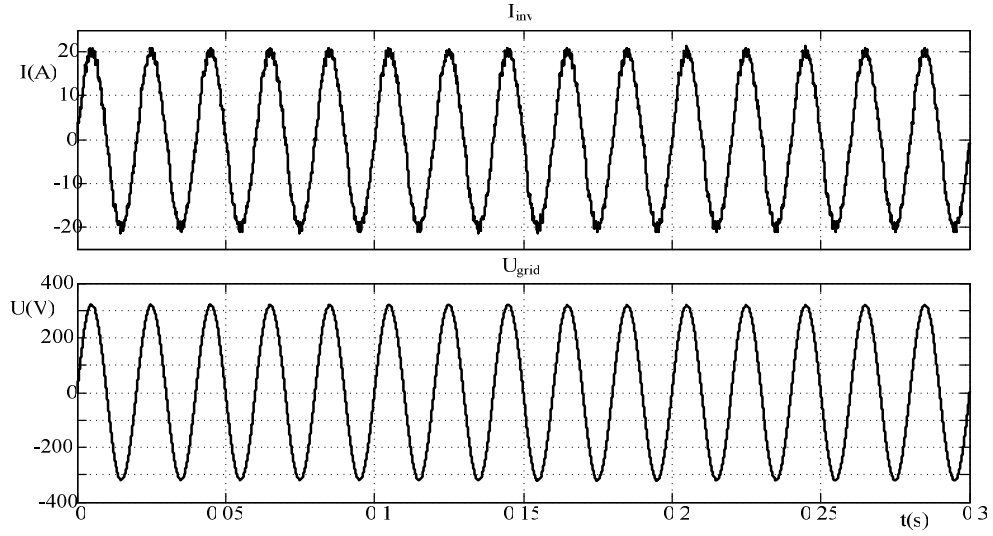


Şekil 6.9. Bulanık mantık denetimli şebeke etkileşimli evirici Simulink modeli

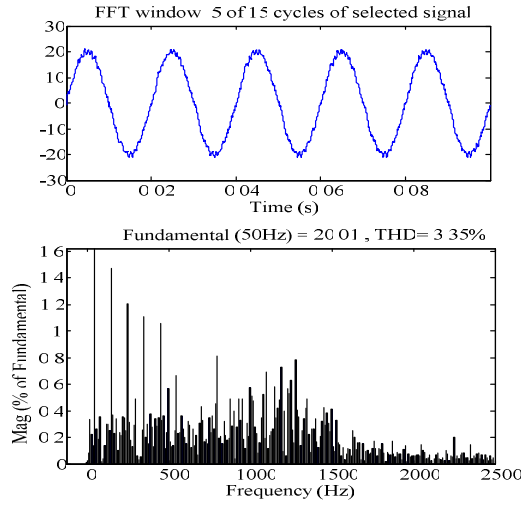


Şekil 6.10. Evirici akım referansı ve akımı

Tasarlanan bulanık mantık denetleyici DS1104 dSPACE kartı kullanılarak gerçekleştirildiğinde, kod optimizasyonu ile ilgili seçenekler uygulandığında dahi elde edilen en yüksek örnekleme frekansı <2 kHz olup örnekleme zamanı >0.5 ms'dir. Frekansı 50 Hz olan bir şebekede bir alternansın 10 ms olduğu dikkate alınır, bir alternans süresince kontrol sinyalinin ancak 20 defa güncellenebileceği görülecektir. Bu hızla, evirici akımının istenilen şartları sağlayacak nitelikte kalması sağlanamamakta, ayrıca tasarlanan denetleyicinin de performansı gerçek anlamda ölçülememektedir.



Şekil 6.11. Evirici akımı ve şebeke gerilimi

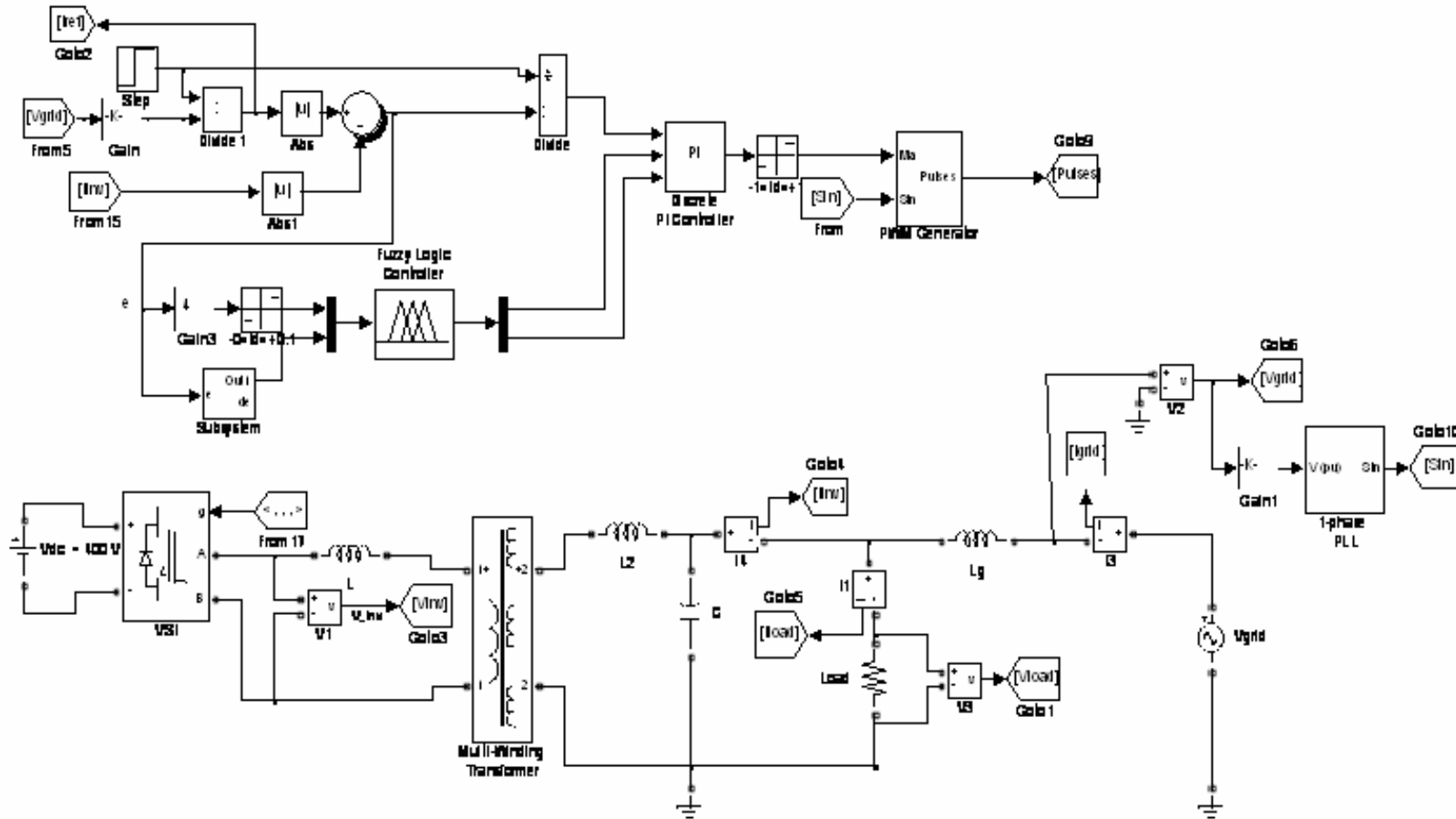


Şekil 6.12. Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri

6.3. Bulanık PI Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici

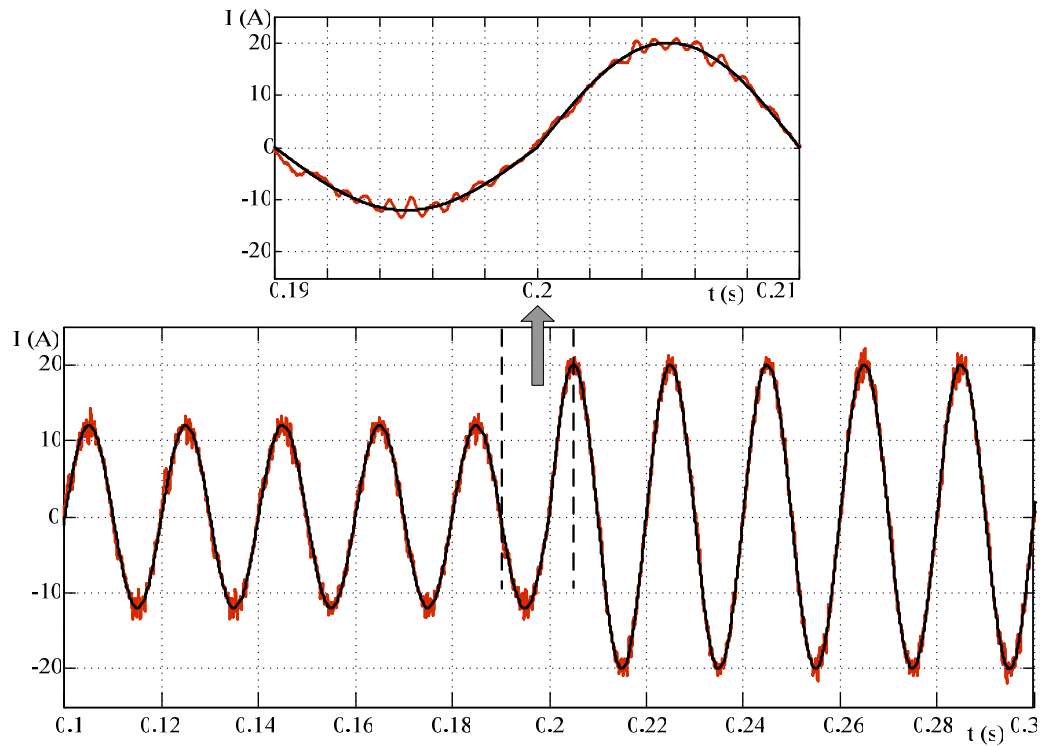
6.3.1. Benzetim sonuçları

Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici benzetimi çalışmaları için kullanılan MATLAB/Simulink modeli Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Şekil 6.14 ve 6.15’de evirici çıkış akımı ile akım referansı görülmektedir.



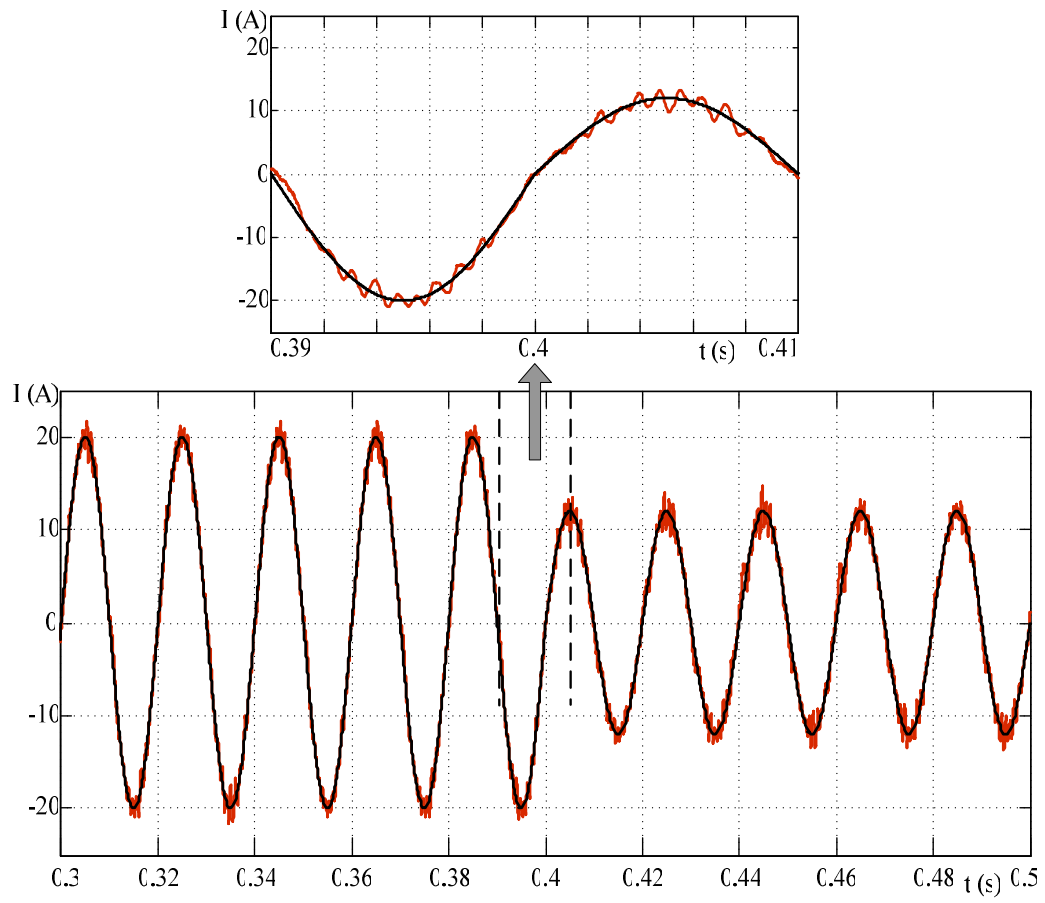
Şekil 6.13. Bulanık-PI denetimli şebeke etkileşimli evirici Simulink modeli

Şekillerden görüldüğü akım denetleyicisinin performansının sorgulanabilmesi gibi $t=0,2$ anında akım referansı %60 oranında arttırılmış, $t=0,4$ anında ise %60 oranında azaltılmıştır. Şekil 6.16'da ise evirici çıkış akımı ile akım referansı büyütülerek verilmiştir. Şekil 6.17'de ise akım referansı akımın tepe değerinde iken %60 oranında arttırıldığında akım referansı ve evirici akımının değişimi gösterilmiştir. Benzetim sonuçlarından alınan 10000 değer için Eş. 6.1 kullanılarak hesaplanan OBH değeri 0,02969'dır ve referans sinyalin başarılı biçimde takip edildiğini göstermektedir.

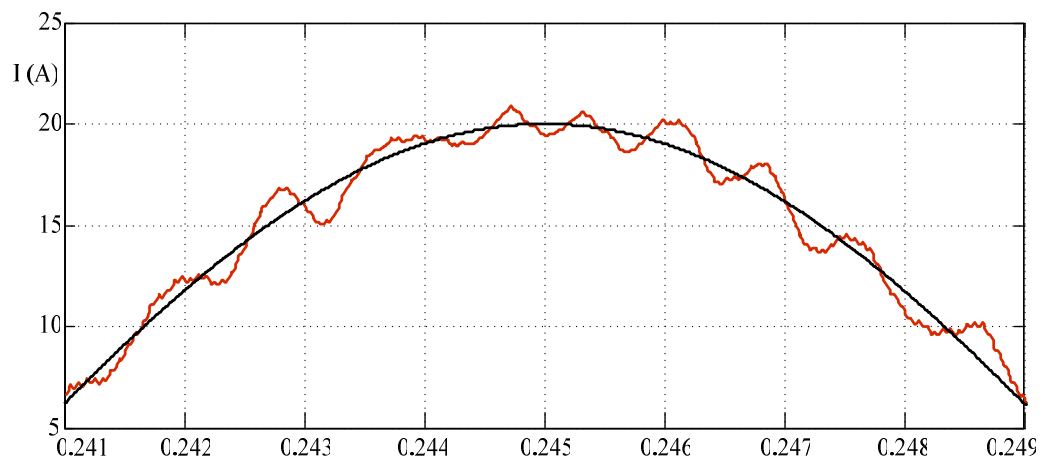


Şekil 6.14. Evirici çıkış akımı ve akım referansı

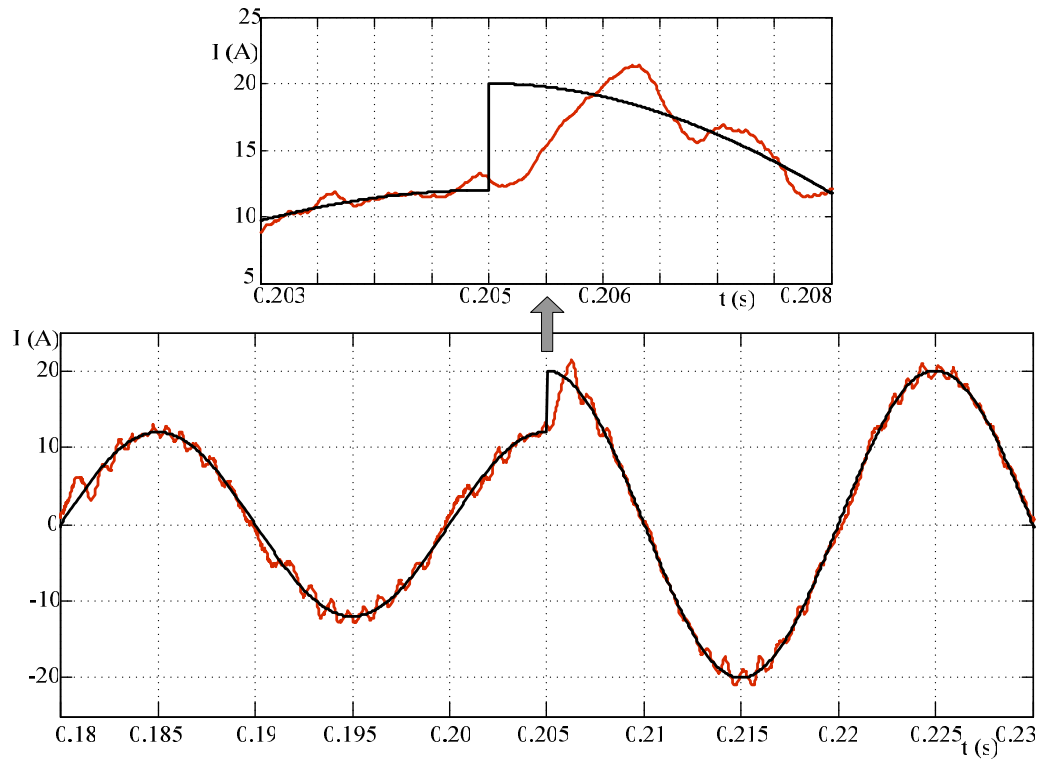
Şekil 6.18'de evirici çıkış akımı harmonikleri, Şekil 6.19'da ise şebeke gerilimi ve evirici çıkış akımı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi bulanık-PI denetimli evirici akımı akım referansını büyük bir başarı ile takip etmektedir. Evirici çıkış akımı sinüs şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta olduğu ve evirici çıkış akımı harmonikleri seviyesinin uluslar arası standartlarda belirtilen şartlara uygun olduğu ($\%3,85 < \%5$) görülmektedir.



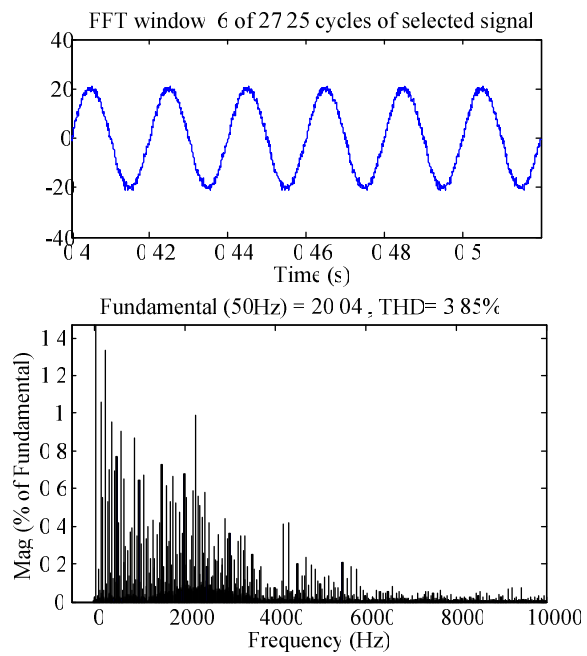
Şekil 6.15. Evirici çıkış akımı ve akım referansı



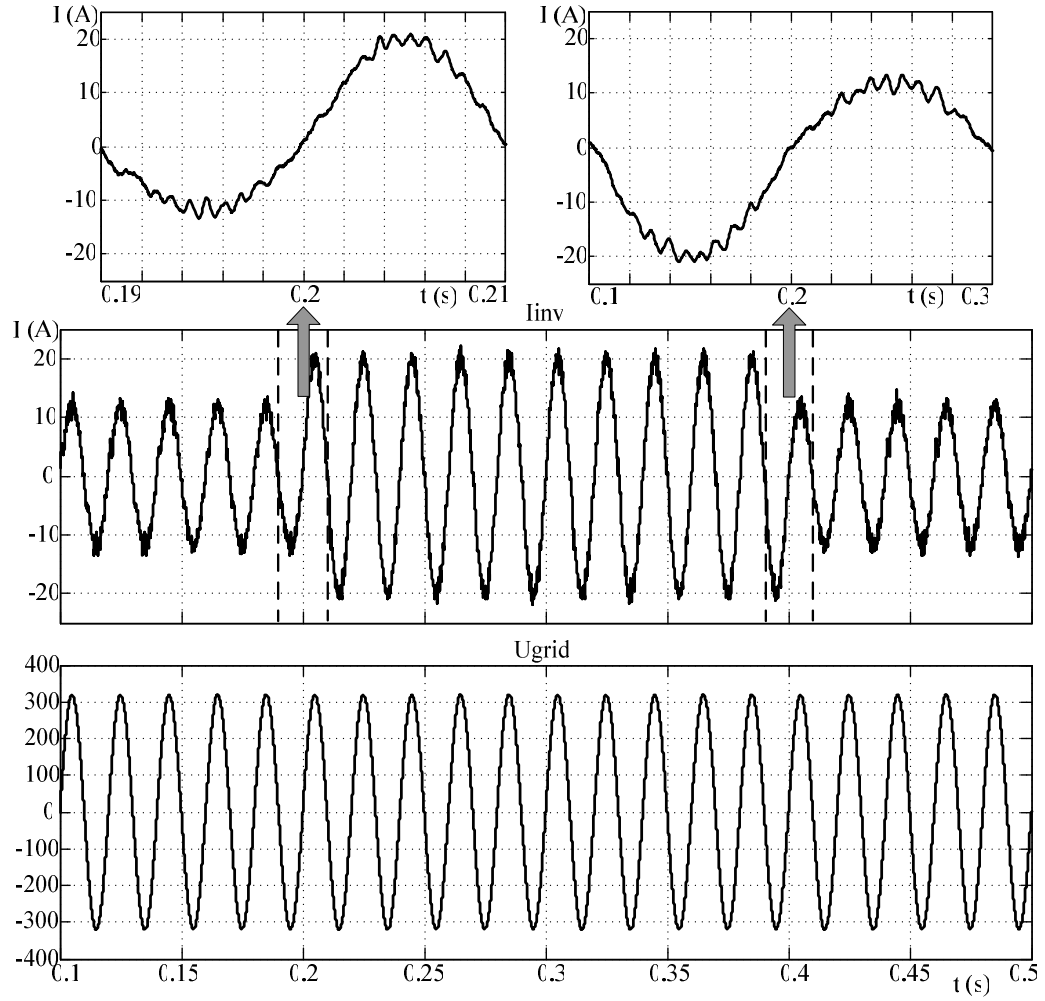
Şekil 6.16. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.



Şekil 6.17. Evirici çıkış akımı ve akım referansı.



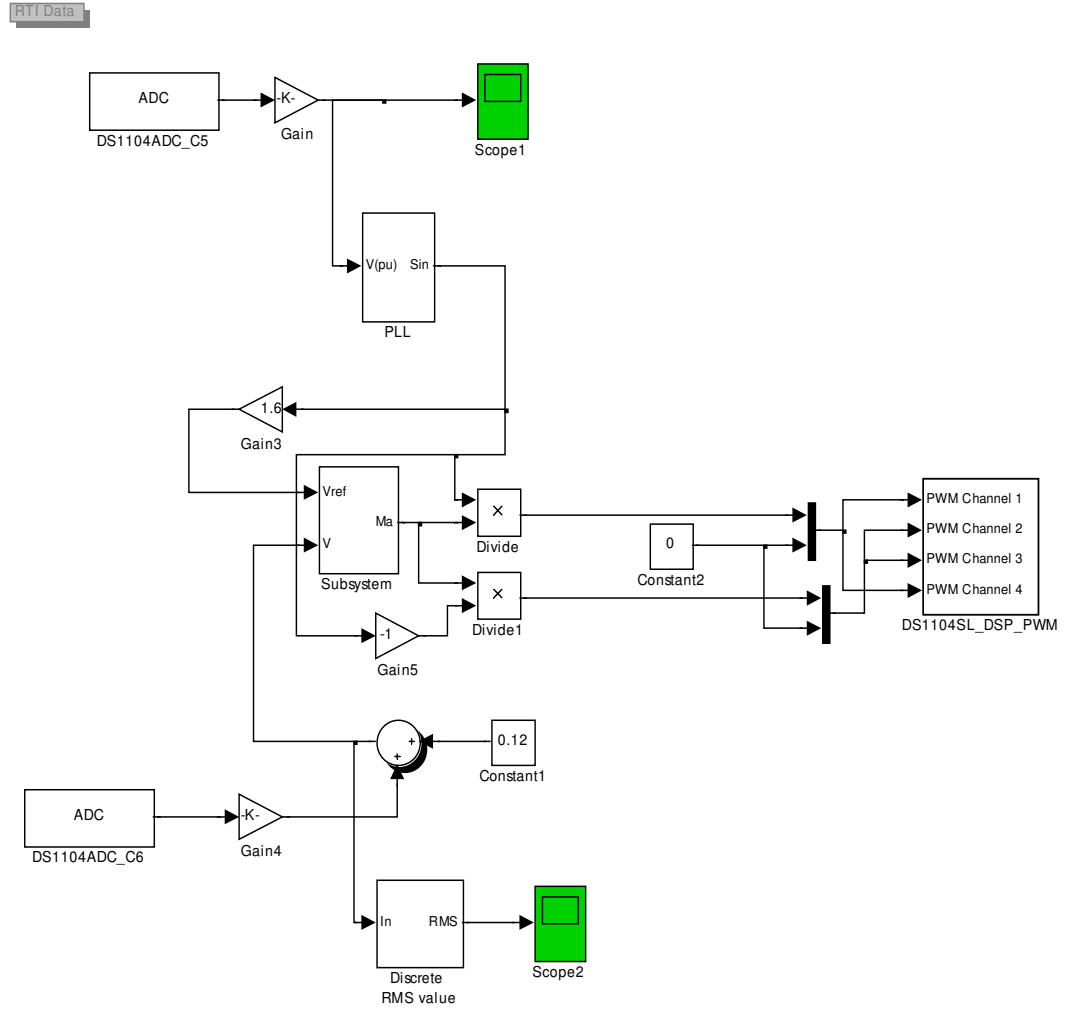
Şekil 6.18. Evirici çıkış akımı harmonikleri



Şekil 6.19. Evirici çıkış akımı ve şebeke gerilimi

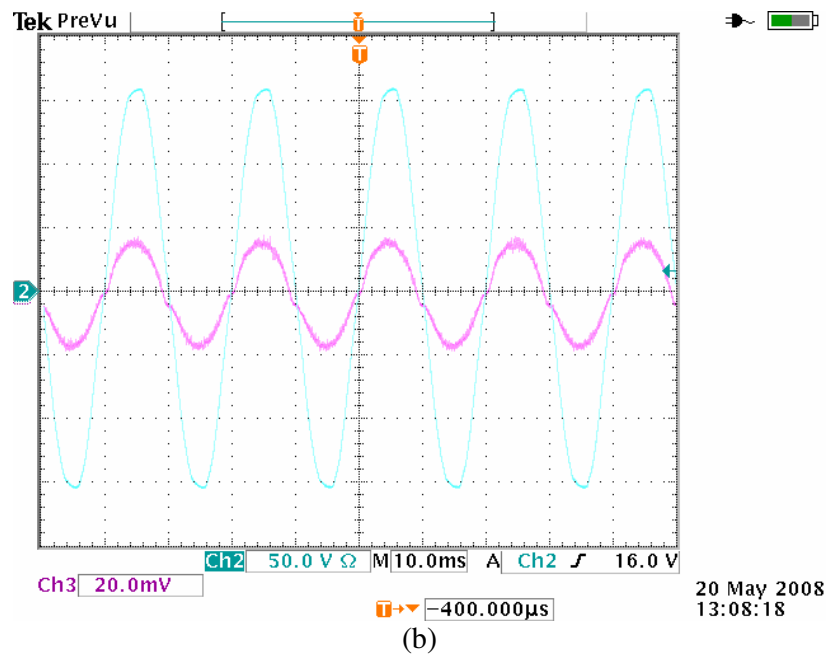
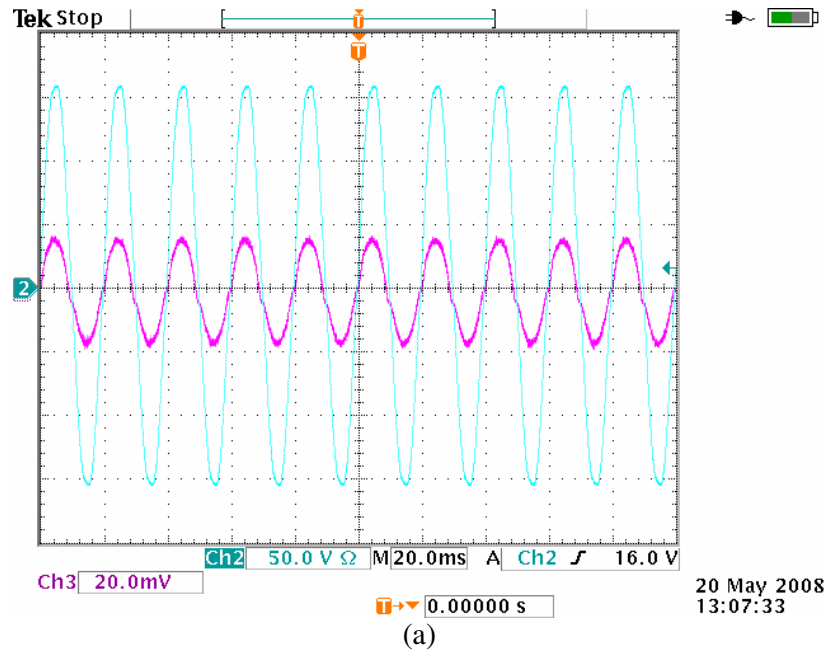
6.3.2. Uygulama sonuçları

Benzetim çalışmalarının tamamlanması ile tasarlanan bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlara göre bulanık mantık denetleyici ile ilgili Bölüm 5.2.4’de açıklanan değişiklikler yapılmıştır. Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici uygulamasında kullanılan dSPACE modeli Şekil 6.20’de gösterilmiştir. Evirici çıkış akımının denetlenmesinde oransal (K_p) ve integral (K_i) kazançları BMD tarafından ayarlanabilen PI denetleyici kullanılmıştır.

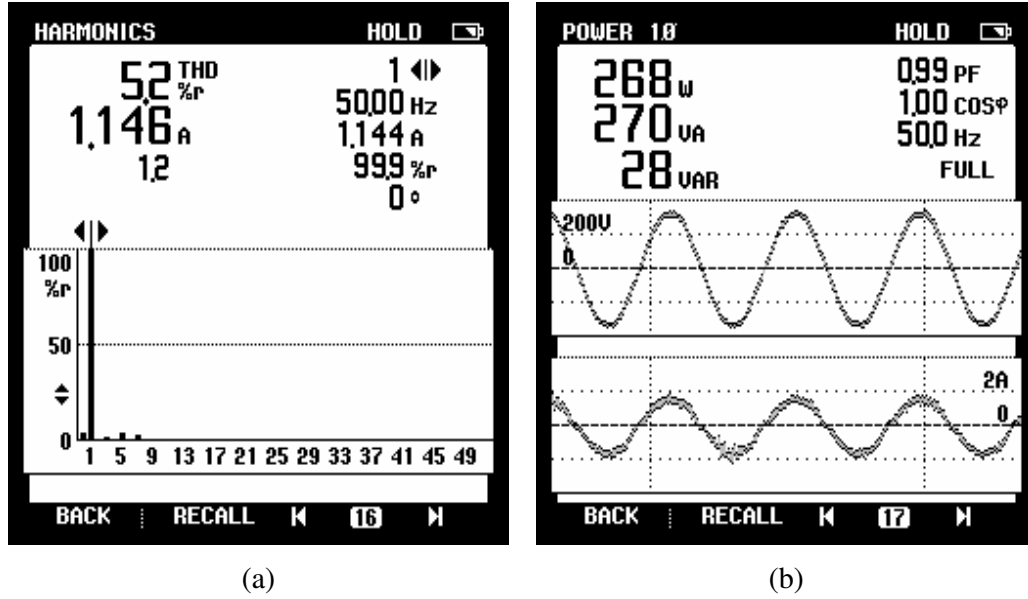


Şekil 6.20. Bulanık PI denetimli şebeke etkileşimli evirici dSPACE modeli

Şekil 6.21’de eviricinin çıkış akımı ve gerilimi ile Şekil 6.22’de sırasıyla şebeke etkileşimli evirici çıkış akım harmonikleri, güç ve güç katsayısı değerleri görülmektedir. Evirici akımı sinüs şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı fazdadır. Evirici akımı THD’si %5,2 ve güç faktörü 0,99 olarak ölçülmektedir.



Şekil 6.21. Şebeke etkileşimli evirici çıkış akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)

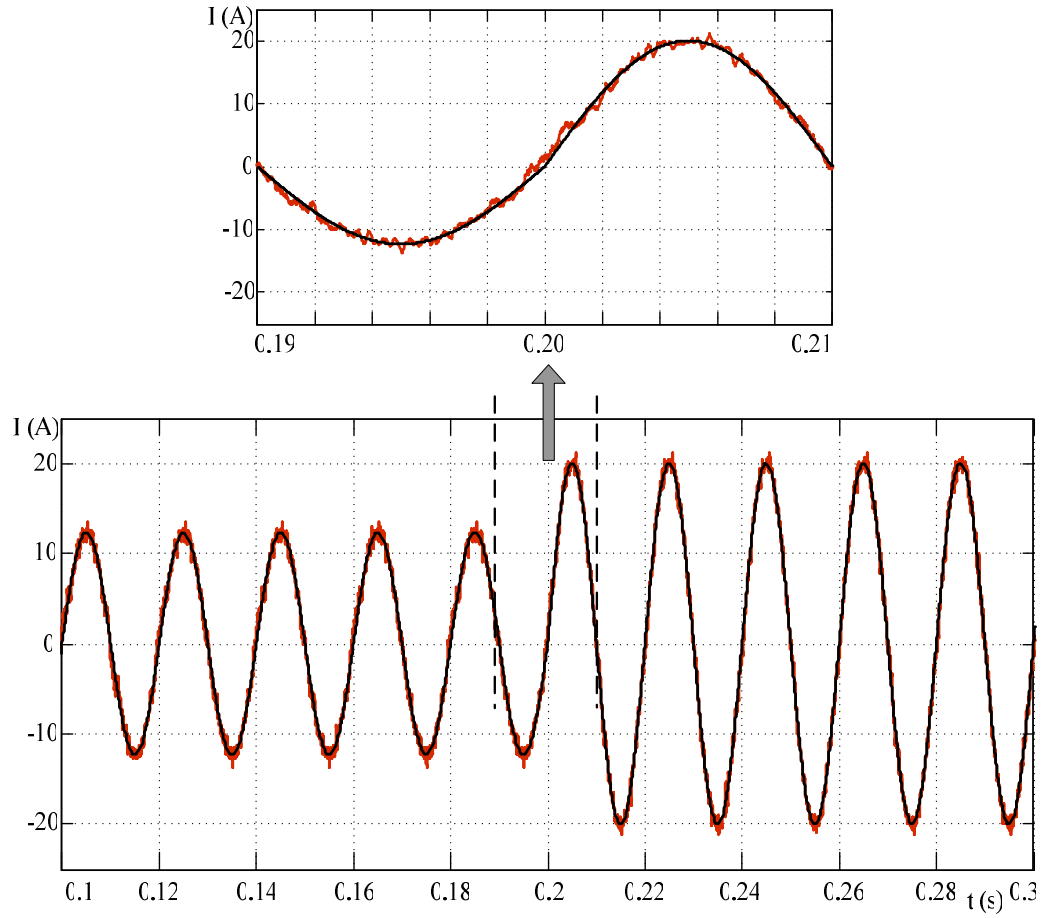


Şekil 6.22. (a)Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri (b) Evirici akım gerilim dalga şekli, güç ve güç katsayısı değerleri

6.4. Bulanık Sinirsel Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici

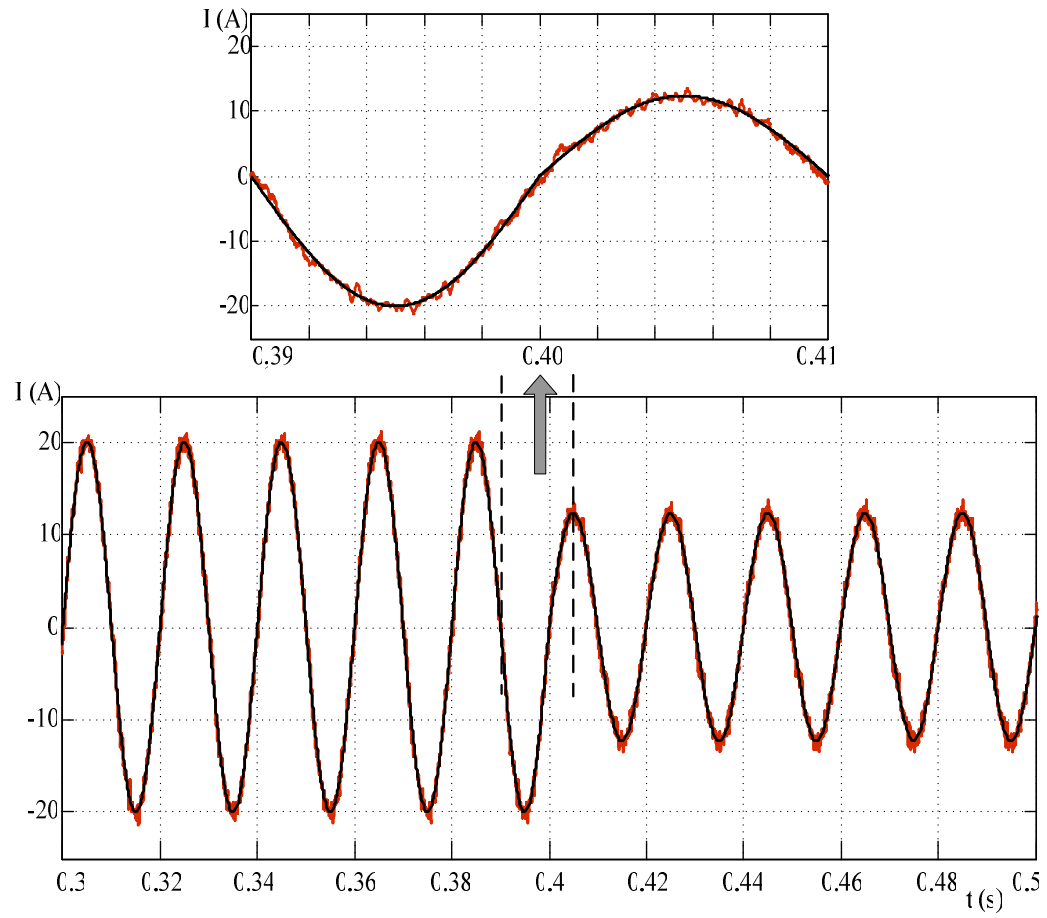
6.4.1. Benzetim sonuçları

Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici benzetimi çalışmaları için kullanılan MATLAB/Simulink modeli Şekil 6.23’de gösterilmiştir. Akım denetleyicisinin performansının sorgulanabilmesi için akım referansı Şekil 6.24 ve Şekil 6.25’de görüldüğü gibi $t=0,2$ anında %60 oranında arttırılmış, $t=0,4$ anında ise %60 oranında azaltılmıştır. Şekil 6.26’da ise evirici çıkış akımı ile akım referansı büyütülerek verilmiştir. Şekil 6.27’de akım referansı akımın tepe değerinde iken %60 oranında arttırıldığında akım referansı ve evirici akımının değişimi gösterilmiştir. Bulanık sinirsel denetimli evirici benzetimlerinden elde edilen 10000 değer için Eş. 6.1 kullanılarak hesaplanan OBH değeri 0,02434’dür. Bu değer referans akım sinyali diğer yöntemlerden daha başarılı biçimde takip edildiğini göstermektedir.

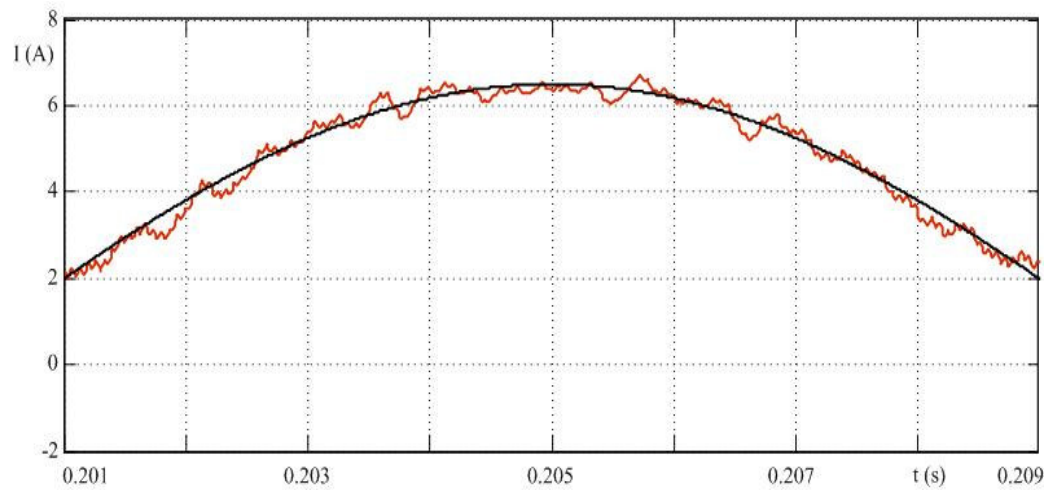


Şekil 6.24. Evirici akım referansı ve evirici akımı

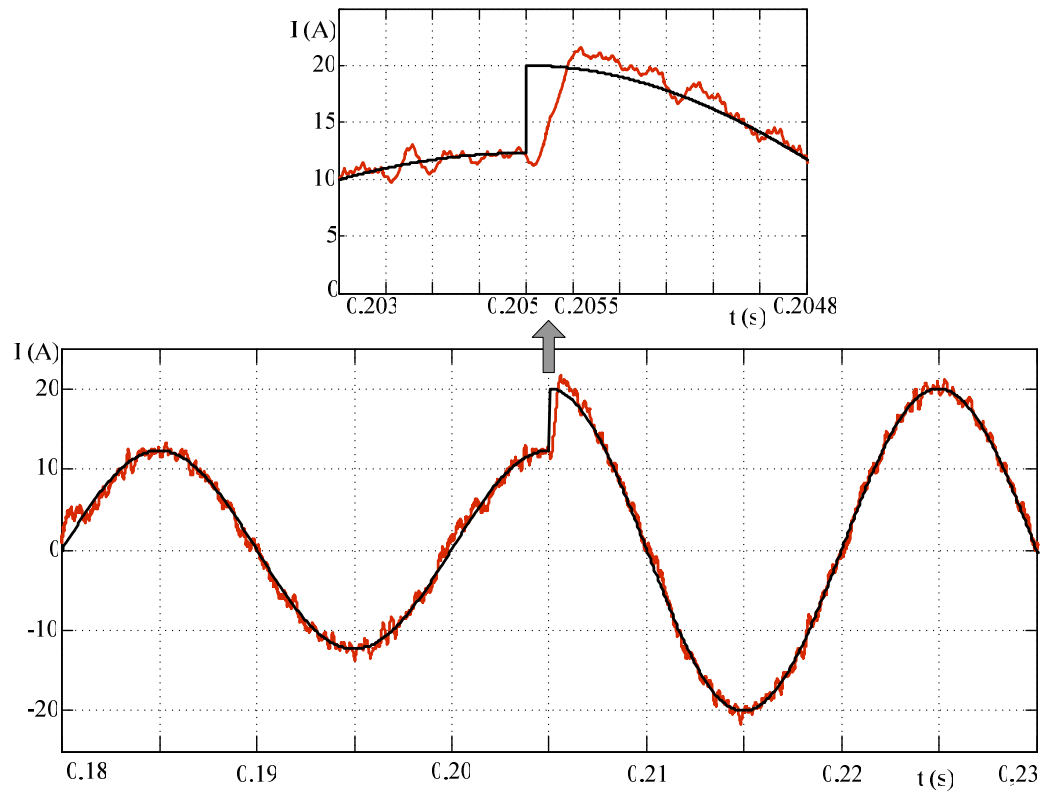
Şekil 6.28’de evirici çıkış akımı harmonikleri ve Şekil 6.29’da şebeke gerilimi ile evirici çıkış akımı görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi evirici çıkış akımı, referans akımını büyük bir başarı ile takip etmektedir. Evirici akımı birim güç faktöründe çalışmayı sağlayacak şekilde şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanstadır. Ayrıca evirici akımı sinüs şeklinde ve akım harmonikleri de uluslararası standartlarda belirtilen şartları karşılamaktadır ($\%3,02 < \%5$).



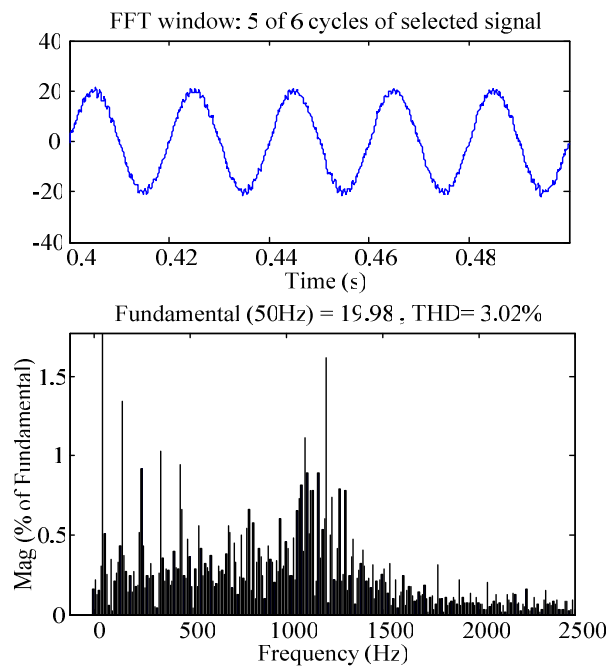
Şekil 6.25. Evirici akım referansı ve evirici akımı



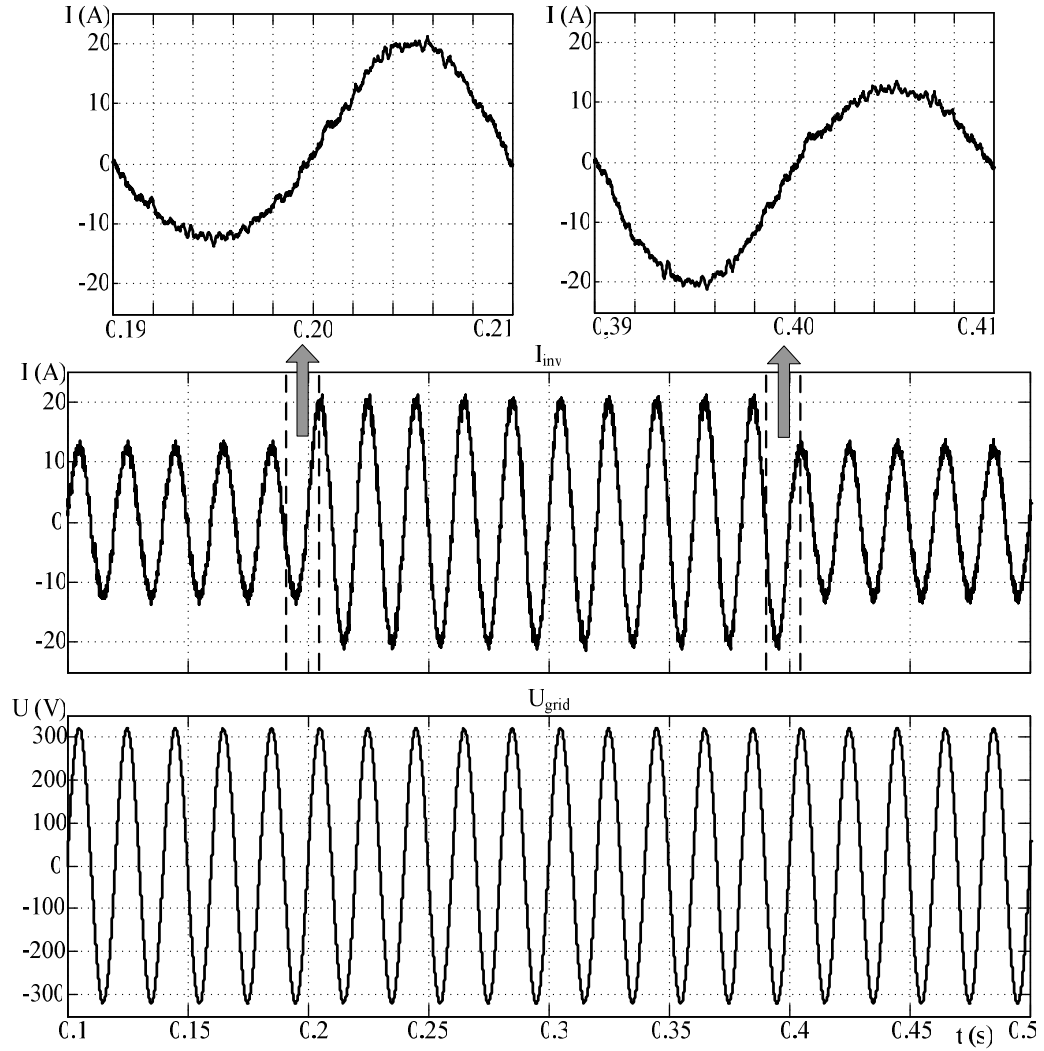
Şekil 6.26. Evirici akım referansı ve evirici akımı



Şekil 6.27. Evirici akım referansı ve evirici akımı



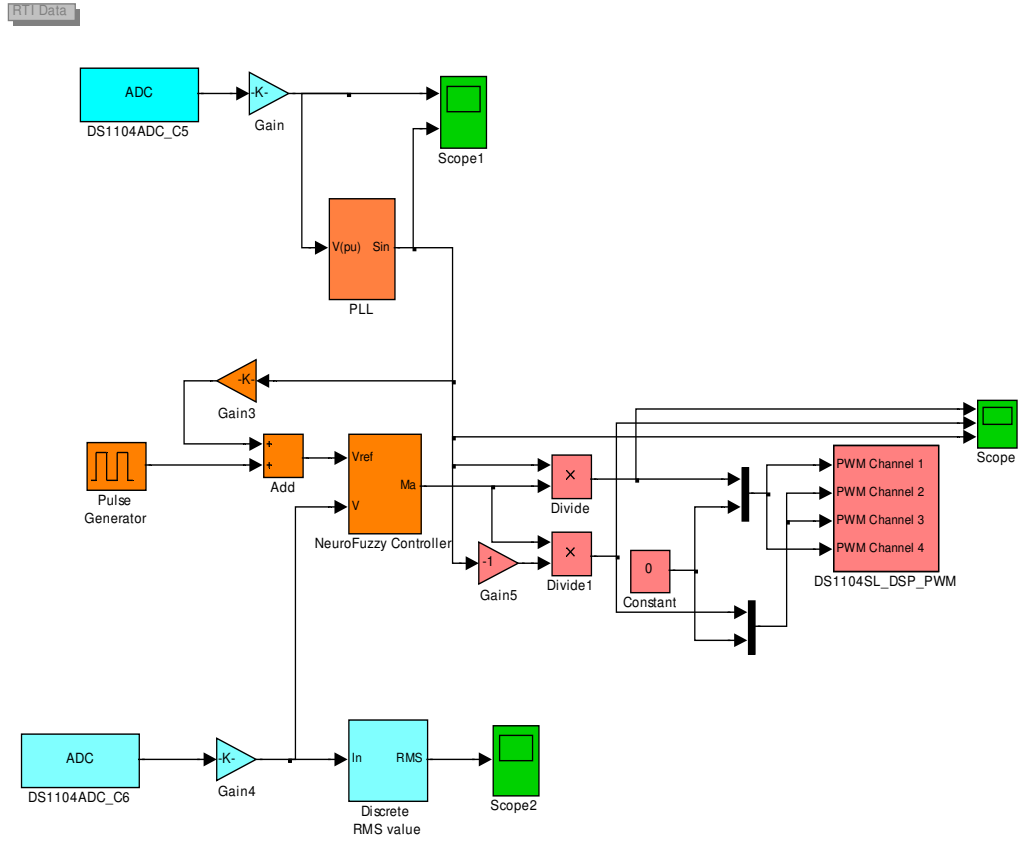
Şekil 6.28. Şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri



Şekil 6.29. Şebeke gerilimi ve evirici çıkış akımı

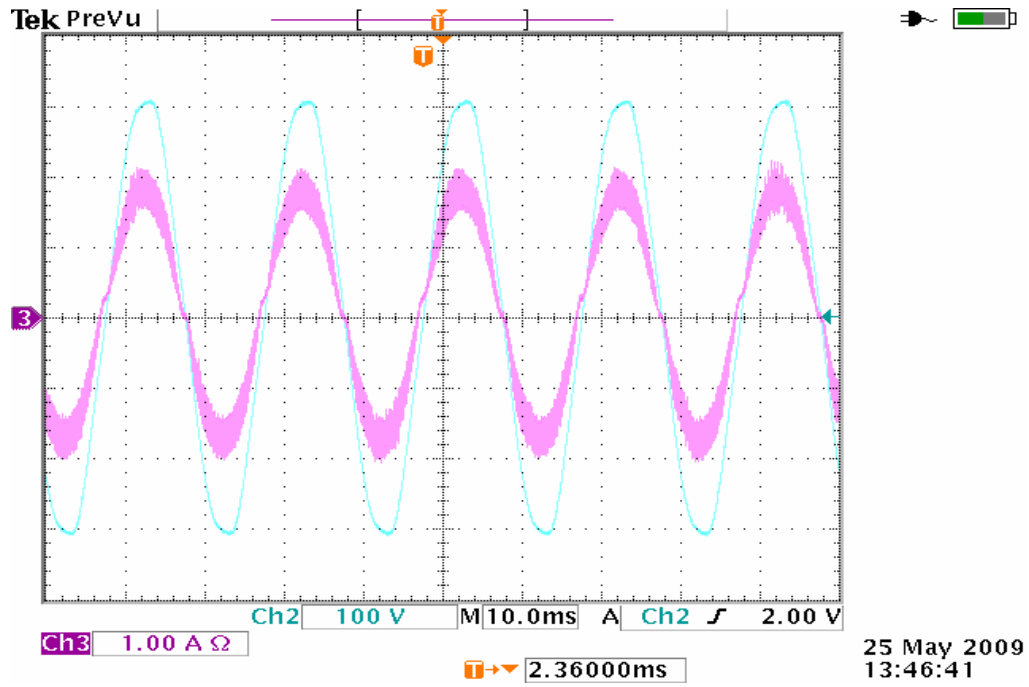
6.4.2. Uygulama sonuçları

Benzetim çalışmalarının tamamlanması ile tasarlanan bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici dSPACE tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici uygulamasında kullanılan dSPACE modeli Şekil 6.30’da gösterilmiştir.

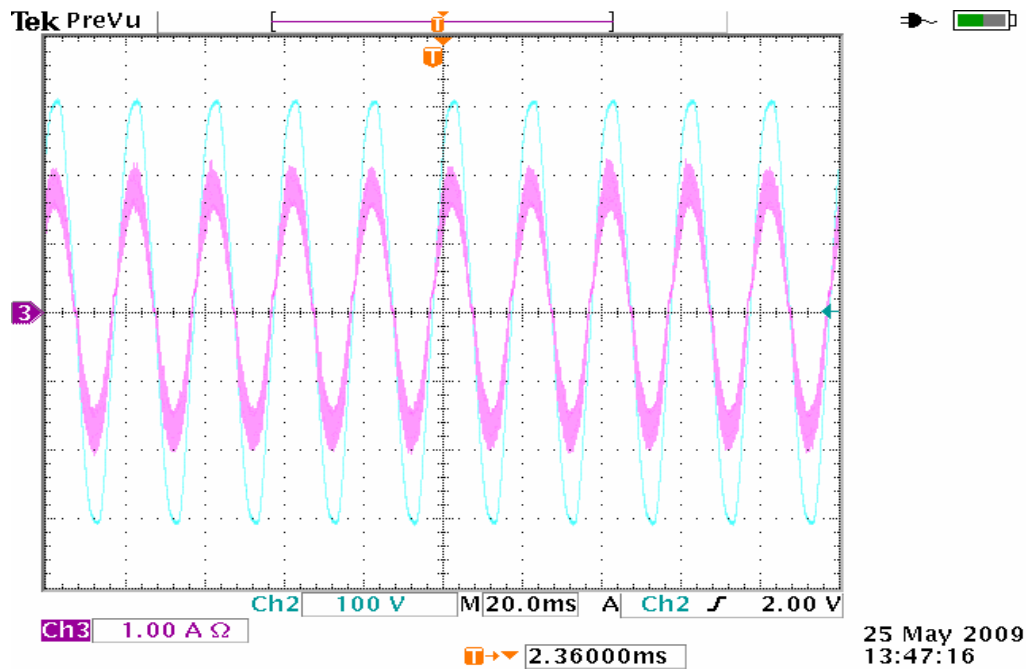


Şekil 6.30. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici dSPACE modeli

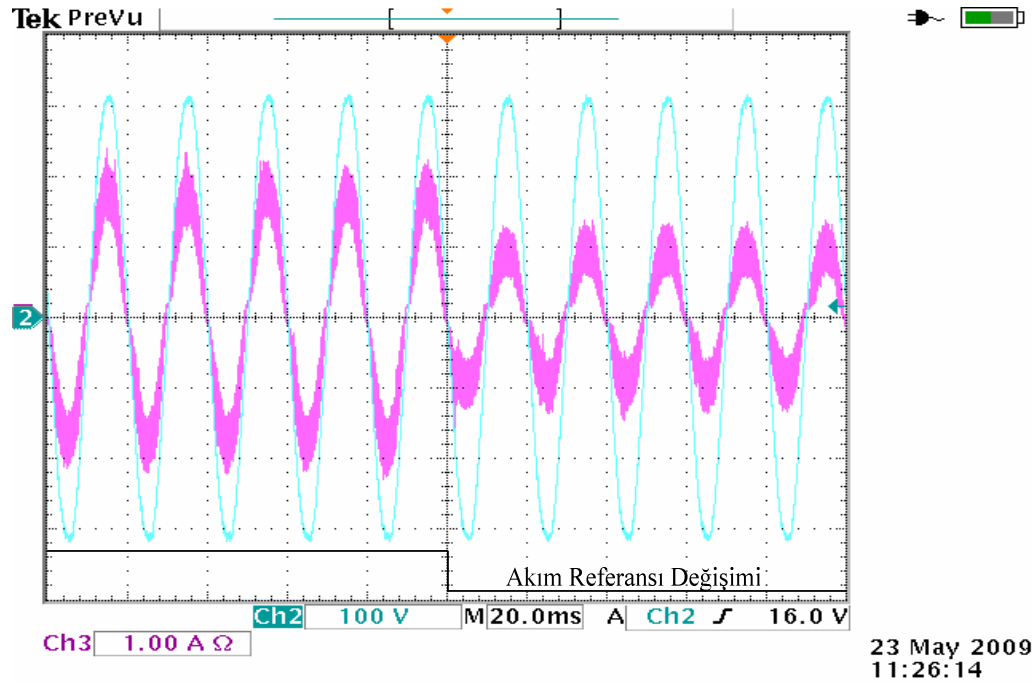
Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’de eviricinin çıkış akımı ve gerilimi görülmektedir. Şekil 6.33 - Şekil 6.35’de ise sırasıyla evirici akım referansının %60 oranında azaltıldığında ve tekrar anma değerine yükseltildiğinde evirici çıkış akımının değişimi ve şebeke gerilimi görülmektedir.



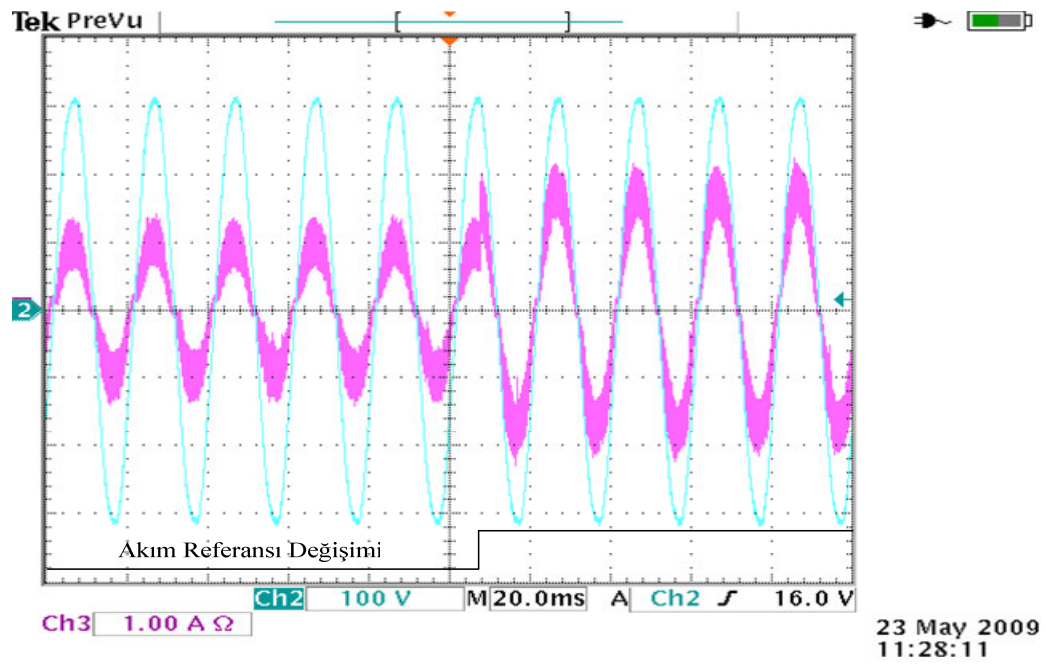
Şekil 6.31. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)



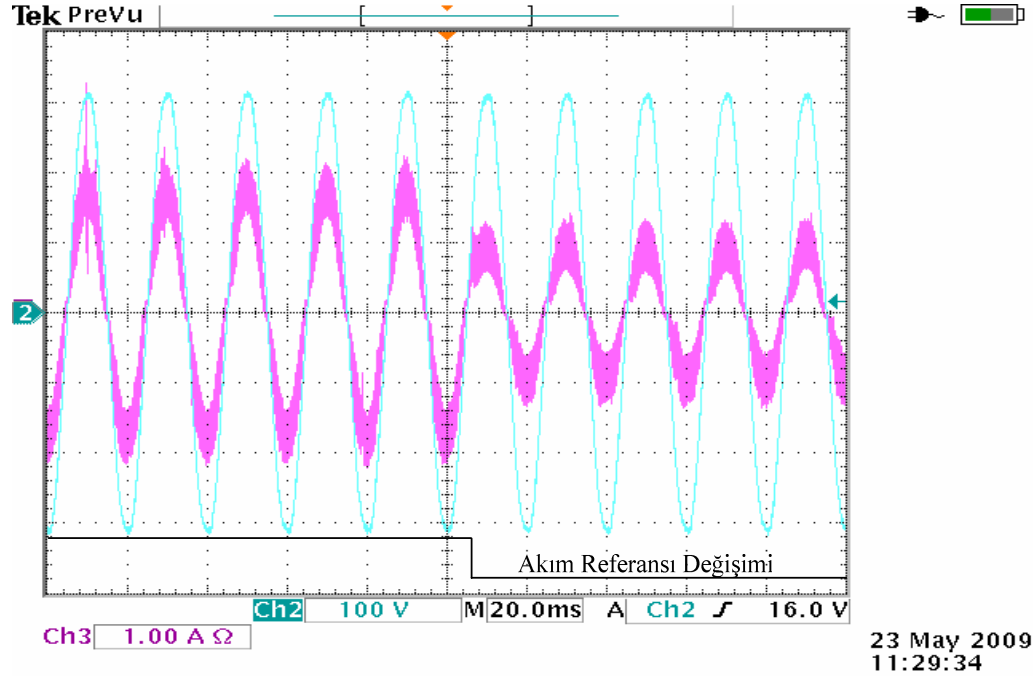
Şekil 6.32. Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımı (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)



Şekil 6.33. Akım referansı azaltıldığında bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımının değişimi (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)



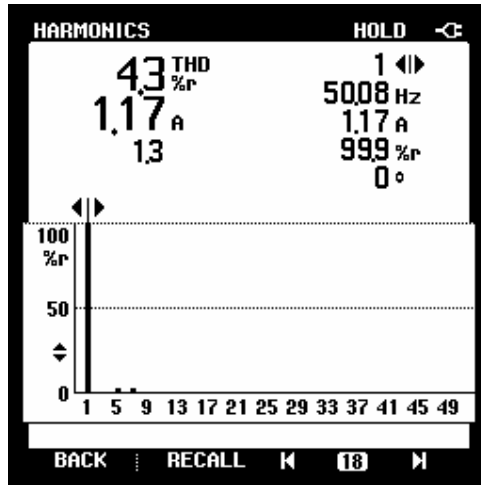
Şekil 6.34. Akım referansı artırıldığında bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımının değişimi (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)



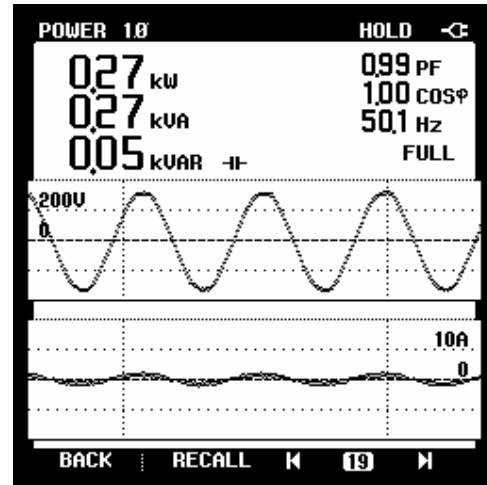
Şekil 6.35. Akım referansı azaltıldığında bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akımının değişimi (Ch. 3) ve şebeke gerilimi (Ch. 2)

Görüldüğü gibi evirici akımı sinüs şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanstadır. Akım referansının değiştirilmesi durumunda evirici akımı referansı büyük bir başarı ile takip etmekte ve referans sinyali izlemektedir.

Şekil 6.36’de sırasıyla bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici çıkış akım harmonikleri, güç ve güç katsayısı değerleri görülmektedir. Evirici çıkış akımı sinüs şeklinde ve şebeke gerilimi ile aynı fazdadır. Evirici çıkış akımı THD’si %4,3 ve güç faktörü 0,99 olarak ölçülmektedir. Bu değerler uluslararası standartlarda belirtilen şartları sağlayacak özelliktedir.



(a)



(b)

Şekil 6.36. a) Bulanık sinirsel denetimli şebeke etkileşimli evirici akım harmonikleri
b) Güç ve güç faktörü değerleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin şebekeye aktarılması amacıyla kullanılan ve şebekeyle paralel çalışabilen bir fazlı şebeke etkileşimli bir evirici tasarlanmıştır. Tasarlanan evirici, gerilim kaynaklı evirici yapısı, hat frekanslı transformatör ve LCL çıkış filtresinden oluşmaktadır. Hat frekanslı transformatör kullanılarak şebeke ile DA güç kaynağı arasında izolasyon sağlanmış ve şebekeye DA akım enjeksiyonu engellenmiştir. LCL filtre kullanarak filtre rezonans frekansının şebeke empedansı ile değişimi engellenmiştir. Tasarlanan eviricide anahtarlama frekansı 10 kHz olarak belirlenmiştir.

Şebeke etkileşimli eviricinin şebekeye, şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekansta ve sinüs şeklinde akımlar enjekte etmesi gerektiğinden akım denetimli olarak tasarlanmıştır. Akım denetleyicisi olarak sırasıyla PI denetleyici, bulanık mantık denetleyici, bulanık-PI denetleyici ve bulanık sinirsel denetleyici kullanılmış, daha sonra denetleyicilerin performansları benzer şartlar altında test edilmiştir.

Tasarlanan denetleyiciler ile denetlenen bir fazlı şebeke etkileşimli evirici sistem performansının test edilebilmesi amacıyla sırasıyla benzetim ve uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında MATLAB/Simulink ve Fuzzy Logic Toolbox kullanılmıştır. Uygulama çalışmaları ise dSPACE firmasının TMS320F240 sayısal işaret işlemcisi içeren DS1104 kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulama esnasındaki değişkenlerin gözlenmesi ve sonuçlarının kaydedilebilmesi için yine dSPACE firmasının Control Desk yazılımı kullanılarak grafik kullanıcı arayüzleri hazırlanmıştır.

Bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin denetiminde önce PI denetleyici kullanılmıştır. Ancak eviricinin doğrusal olmayan yapısı ve şebekenin zamanla değişen parametreleri nedeniyle doğrusal denetim tekniği yerine şebeke etkileşimli eviricinin denetimi için 2 giriş 1 çıkışlı bir bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Giriş ve çıkışlar için 7 adet binişimleri eşit üçgen üyelik fonksiyonu ve 49 kural belirlenmiştir. Ancak bulanık mantık denetimli şebeke etkileşimli eviricinin

uygulama çalışmaları gerçekleştirilememiştir. Evirici bulanık mantık ile denetlendiğinde optimizasyon seçenekleri kullanıldığında dahi örnekleme frekansı en yüksek 1,169 kHz değerine ulaşılabilmiştir. Bu örnekleme frekansı ile 50 Hz frekanstaki şebeke geriliminin takip edilmesi mümkün olmamıştır.

Evirici denetiminin adaptif bir yapıya sahip olması ve gerekli kabul edilebilir dinamik hıza ulaşabilmesi için bulanık-PI ve bulanık sinirsel denetleyiciler kullanılmıştır. PI denetleyicinin parametrelerin değişen şartlara göre bulanık mantık denetleyici tarafından belirlendiği bulanık-PI denetleyicide de örnekleme frekansı istenilen değerlere yükseltilememesine rağmen uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiş ve kabul edilebilir değerler elde edilmiştir.

Bulanık mantık denetleyicinin üyelik fonksiyonlarının değerlerinin ve kuralların belirlenmesi konusunda belirli bir yöntem bulunmaması nedeniyle bunların belirlenmesinde deneme yanılma yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile en uygun üyelik fonksiyonu değerlerinin ve kuralların belirlenmesi uzun zaman alabilmekte ve bazen en iyi değerler bulunamamaktadır. Bu çalışmada bulanık mantık denetleyicinin üyelik fonksiyonları ve kuralları yapay sinir ağları kullanarak tespit edilmiştir. Kuralların ve üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi için ANFIS ağ modeli kullanılmıştır. ANFIS, üyelik fonksiyonlarının ve kuralların sayısını azalttığından örnekleme frekansı 20 kHz değerine ulaşabilmiştir.

Çizelge 7.1’de bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin denetiminde kullanılan denetim tipleri ve bu denetim yöntemleri için elde edilen benzetim ve uygulama sonuçları görülmektedir. Burada verilen ortalama bağıl hata (OBH) değeri her denetim yöntemi için benzetim sonuçlarından aynı zaman aralığında alınan 10000 değer ve Eş. 5.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi bulanık sinirsel denetim ile akım THD’si %4,3 olarak elde edilmiştir. Bu değer uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dâhilindedir ($\%4,3 < \%5$). Yine bulanık sinirsel denetim ile şebekeye aktarılan akım şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanstadır. Başka bir ifade ile birim güç faktöründe çalışma sağlanmıştır. Ayrıca OBH değeri referans sinyalin büyük bir başarı ile takip edildiğini göstermektedir. Üyelik fonksiyonlarının ve kuralların

ANFIS kullanılarak belirlenmesi ile üyelik fonksiyonlarının ve kuralların sayısı azaltılmış böylece mevcut DSPACE 1104 ile 7 üyelik fonksiyonu ve 49 kural kullanılan bulanık mantık denetleyici ile çalışmaya göre daha yüksek çevrim hızında işletilebilen bir denetim algoritması elde edilmiştir.

Çizelge 7.1. Benzetim ve uygulama sonuçları

Denetim Yöntemi	Benzetim Sonuçları			Uygulama Sonuçları		
	Akım Harmoniği (%THD)	Güç Faktörü	Ortalama Bağlı Hata	Akım Harmoniği (%THD)	Güç Faktörü	Örnekleme Frekansı (kHz)
PI Denetim	%3,72	0,999	0,02878	%4,7	0,99	20
Bulanık Mantık Denetim	%3,35	0,999	0,02618	–	–	1,169
Bulanık-PI Denetim	%3,85	0,999	0,02969	%5,2	0,99	6,666
Bulanık sinirsel Denetim	%3,02	0,999	0,02434	%4,3	0,99	20

Bu çalışmada PI, bulanık mantık denetimli, bulanık-PI denetimli ve bulanık sinirsel denetimli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici tasarlanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının her geçen gün artan miktarda ilgi görüyor olması bu alanda daha fazla çalışma yapılması gerekliliğini göstermektedir. Tasarlanan evirici rüzgâr, yakıt hücreleri veya FV'ler için özelleştirilerek kaynağın en yüksek güç noktasında çalışmasını sağlayacak şekilde akım referansını belirleyebilir özellikte tasarlanması faydalı olacaktır. Ayrıca bu çalışmada bulanık mantık denetleyici yapay sinir ağıları kullanılarak tasarlanmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda bu işlem için genetik algoritma kullanılarak optimizasyon yapılması veya sinirsel bulanık PI denetleyici tasarlanması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Abraham, A., Nath, B., “A neuro-fuzzy approach for modeling electricity demand in victoria”, *Applied Soft Computing*, 1: 127–138 (2001).

Atacak, İ., Bay, Ö. F., “Bulanık mantık denetimli seri aktif güç filtresi kullanarak harmonik gerilimlerin bastırılması”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 19 (2): 205-215 (2004).

Acharyya, D., Plusquellic, J., “Impedance profile of a commercial power grid and test system”, *International Test Conference Proceedings, ITC 2003*, Charlotte, NC, USA, 1: 709 – 718, 2003.

Ackerman, T., “Wind power in power systems”, *John Wiley & Sons*, Stockholm, Sweden, 1-23, 53-56 (2005).

Ahmed, T., Nakaoka, M., Nagai, S., “Utility grid interfaced PV power conditioner using boost-chopper-four switch three phase inverter with novel quasi resonant DC link snubber”, *Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06*, Dallas, Texas, 1081-1087 (2006).

Akcayol, M., “ Bir anahtarlama relüktans motorun sinirsel-bulanık denetimi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-4 (2001).

Alepuz, S., Gilabert, A., Arguelles, E., Bordonau, J., Peracaula, J., “A new approach for the connection of a three-level inverter to the power grid for applications in solar energy conversion”, *IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02*, Sevilla, Spain, 4: 3285–3290 (2002).

Al-Nasseri, H., Redfern, M. A., “Solid-state converter topologies for interfacing dc sources with utility power systems”, *Universities Power Engineering Conference, UPEC 2004, 39th International*, Bristol, UK, 1: 629-633 (2004).

Ardam, H., “Bulanık mantık denetimli bir ac/dc konvertör”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 49-55 (2002).

Arruda, L.N., Filho, B.J.C., Silva, S.M., Silva, S.R., Diniz, A.S.A.C., “Wide bandwidth single and three-phase pll structures for grid-tied pv systems”, *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, Alaska, USA, 1660–1663 (2000).

Arruda, L.N., Silva, S.M., Filho, B.J.C., “PLL structures for utility connected systems”, *Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the Industry Applications Conference, IEEE*, Illinois, USA, 4: 2655–2660 (2001).

- Ashari, M., Nayar, C. V., Islam, S., “Steady-state performance of a grid interactive voltage source inverter”, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver, 1:650-655 (2001).
- Asiminoaei, L., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Borup, U., “Implementation and test of an online embedded grid impedance estimation technique for pv inverters”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 52 (4): 1136–1144 (2005).
- Baker, D.M., Agelidis V.G., Chen, J. Y., “A five-level zero average current error controlled single-phase grid-interactive inverter”, *International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, Perth, Australia, 1: 50-55 (1998).
- Baker, D.M., Agelidis V.G., Nayer C.V., “A comparison of tri-level and bi-level current controlled grid-connected single-phase full-bridge inverters”, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE '97*, Guimariies, Portugal, 2: 463–468 (1997).
- Barbosa, P.G., Rolim, L.G.B., Watanabe, E.H., Hanitsch, R., “Control strategy for grid-connected dc-ac converters with load power factor correction”, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 145 (5): 487-491 (1998).
- Beck, M. K., “A comprehensive solar electric system for remote areas” *The International Journal on The Science and Technology Of Desalting and Water Purification (Desalination)*, 209 (1-3): 312–318 (2007).
- Berenguel, M., Camacho, E.F., Rubio, F.R., Luk, P.C.K., “Incremental fuzzy PI control of a solar power plant”, *Control Theory and Applications, IEE Proceedings*, 144 (6): 596-604 (1997).
- Berenji, H. R., Khedkar, P., “Learning and tuning fuzzy logic controllers through reinforcements”, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 3 (5): 724–740 (1992).
- Blomen, , L. J. M. J., Mugerwa, M. N., “Fuel cell systems 2nd ed.”, *Springer*, New York, 19-22 (1993).
- Borbely, A. M., Kreidel, J. F., “Distributed generation: the power paradigm for the new millenium, *CRC Press*, Florida, USA, 1-53 (2001).
- Bose, B. K., “Expert sysems, fuzzy logic and neural network application in power electronics and motion control”, *Proceedings of IEEE*, 8 (8): 1303-1323 (1994).
- Calais, M., Agelidis, V. G., Dymond, M. S., “A cascaded inverter for transformerless single-phase grid-connected photovoltaic systems”, *Renewable Energy*, 22: 255-262 (2001).

Calais, M., Agelidis, V. G., Meinhardt, M., “Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems: an overview” *Solar Energy*, 66 (5): 325–335 (1999).

Calais, M., Hinz, H., “A ripple-based maximum power point tracking algorithm for a single-phase, grid-connected photovoltaic system”, *Solar Energy*, 63 (5): 277–282 (1998).

Calais, M., Myrzik, J., Spooner, T., Agelidis, V. G., “Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems—an overview” *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC’02, IEEE*, Queensland, Australia, 2: 1995–2000 (2002).

Carlson, O., Hylander, J., Thorborg, K., “Survey of variable speed operation of wind turbines”, *Proc. of European Union Wind Energy Conference*, Göteborg, Sweden, 406-409 (1996).

Catarina, S. N., David, A. F., Teresa, F. M., Pedro, A., Luís, M. A., “Neuro-fuzzy techniques to model pharmacodynamic interactions between anesthetic drugs on the bispectral index: A preliminary study”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 16 (1): 15–22 (2005).

Chang, S., L., Zadeh, L. A., “On fuzzy mapping and control”, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC- 2 (1): 30-34 (1972).

Chompoo-inwai, C., Yingvivatanapong, C., Methaprayoon, K., Lee, W., “Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (3): 666-672 (2005)

Chung S. K., “Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems”, *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 147 (3): 213–219 (2000).

Dandıl, B., Gökbulut, M., “Asenkron motorların sinirsel-bulanık denetleyici ile uyarlamalı denetimi” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2): 145-153 (2005).

Dash, P. K., Panda, S. K., Lee, T. H., Xu, J. X., Routray, A., “Fuzzy and neural controllers for dynamic systems: an overview”, *Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Singapore, 2: 810-816 (1997).

Demirbaş, Ş., “İnternet tabanlı pı kontrollü bir doğru akım motoru deney seti”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22 (2): 401-410 (2007).

Dimroth, F., Baur, C., Bett, A.W., Mausel, M., Strobal, G., “3-6 Junction photovoltaic cells for space and terrestrial concentrator applications”, **31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference**, Florida, USA, 525-529 (2005).

dSPACE, DS1104 R&D Controller Board Features, Release 5.0 (2005)

dSPACE, Control Desk Experiment Guide for Control Desk, Version 1.1 (1999).

Elmas, Ç., “Bulanık mantık denetleyiciler (kuram, uygulama, sinirsel bulanık mantık)” **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, 24-40, 88-103, 165-196 (2003).

Elmas, Ç., Yapay sinir ağları (kuram, mimari, eğitim, uygulama), **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, 22-36, 43-45 (2003).

Engel, B., Meinhardt, M., “State of the art and future trends of pv-system-technology”, **ECPE Seminar: Renewable Energies**, Kassel, Germany, 1-42 (2006).

Enslin, J. H. R., “Maximum power point tracking: a cost saving necessity in solar energy systems”, **16th IEEE Annual Industrial Electronics Society Conference**, Pacific Grove, CA, 1073-1077 (1990).

Enslin, J. H.R., Heskes, P. J. M., “Harmonic between a large number of distributed power inverters and the distribution network”, **IEEE Transaction on Power Electronics**, 19 (6): 1586-1593 (2004).

Enslin, J., H. R., Wolf, M. S., Synman, D. B., Swiegers, W., “Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 44 (6): 769-773 (1997).

Faiman, D., Bermana D., Heldc, E. Oldenkamp, H. “Study of ac-module inverters under extreme desert conditions” **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 75: 629–635 (2003).

Fuzzy Logic Toolbox 2 User’s Guide, **The Mathworks, Inc.** 2.1-2.115 (2005).

Gipe, 2002,- P. Gipe, “Soaring to new heights: the world wind energy market,” **Renewable Energy World**, 5 (4): 33–47 (2002).

Godoy, R.B., Maia, H.Z., Filho, F.J. T., Galotto, L., Pinto, J.O. P, Tatibana, G.S., “Design and implementation of a utility interactive converter for small distributed generation” **Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the, IEEE**, Tampa, Fl., USA, 2: 1032 – 1038 (2006).

Gu, H., Yang, Z., Wang, D., Wu, W., “Research on control method of double-mode inverter with grid-connection and stand-alone” **CES/IEEE 5th International Power**

Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2006, Beijing, China, 1: 1-5 (2006).

Haeblerlin, H., “Evolution of inverters for grid connected pv systems from 1989 to 2000”, ***Proc. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference***, Hamburg, Germany, 782-788 (2001).

Hart D. W. “Introduction to power electronics”, ***Prentice-Hall***, New Jersey, USA, 291-330 (1997).

Haykin, S., “Neural networks: a comprehensive foundation”, ***Macmillan College Publishing Company***, New York, 138-165 (1994).

Hirachi, K., Tomokuni Y., “Improved control strategy to eliminate the harmonic current components for single phase pwm current source inverter”, ***19th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC 97***, Melbourne, Australia, 189–194 (1997).

Hohm, D. P., Ropp, M.E., “Comparative study of maximum power point tracking algorithms”, ***Progress in Photovoltaics: Research and Applications***, 11 (1): 47 – 62 (2002).

Hojo, M., Ohnishi, T., “Adjustable harmonic mitigation for grid-connection photovoltaic system utilizing surplus capacity of utility interactive inverter”, ***37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '06***, Jeju, Korea, 1 - 6 (2006).

Hudson, R.M., Thorne, T., Mekanik, F., Behnke, M.R., Gonzalez, S., Ginn, J., “Implementation and testing of anti-islanding algorithms for ieee 929-2000 compliance of single phase photovoltaic inverters”, ***Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference***, New Orleans, Louisiana 1414 – 1419 (2002).

Hung, G. K., Chang, C. C., Chen, C. L., “Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters”, ***IEEE Transactions on Energy Conversion***, 18 (1) 169–173 (2003).

İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) “Türkiye’de Güneş Enerjisi” <http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/tgunes.html> (2007).

Jain, A. K., Jianchang, M., Mohiuddin, K.M., “Artificial neural networks: a tutorial”, ***Computer***, 29 (3): 31-44 (1996).

Jang, J., R., “ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system”, ***IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics***, 23 (3): 665-685 (1993).

Jang, J. S. R., "Fuzzy modelling using generalized neural networks and kalman filter algorithm, *9th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-91)*, Anaheim, California 762-767 (1991).

Jeong., J., B., Kim, H. J., Back, S. H., Ahn, K. S., "An improved method for anti-islanding by reactive power control" *Proceedings of The Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanjing, China, 2, 965–970 (2005).

Juang, C. F., Lin, C. T., „An online self constructing neural fuzzy inference network and its applications", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6 (1): 12–32 (1998).

Jujawa, M., "Large wind rising," *Renewable Energy World*, 6 (2): 39–51 (2003).

Jung, S., Bae, Y., Choi, S., Kim, H., "A low cost utility interactive inverter for residential power generation" *Power Electronics Specialists Conference, PESC '06, 37th IEEE*, Jeju, Korea, 1 – 6 (2006).

Kang, F., Park, S. J., Cho, S. E., Kim, J. M., "Photovoltaic power interface circuit incorporated with a buck-boost converter and a full-bridge inverter", *Applied Energy*, 82 266–283 (2005).

Kaura, V., Blasko, V., "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 33 (1): 58–63 (1997).

Khan, M. J., Iqbal, M. T., Quaicoe, J. E., "Utility interactive fuel cell inverter for distributed generation: design consideration and experimental results", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Saskatchewan, Canada, 583-586 (2005).

Kim, H., Yu, T., Choi, S., "Indirect current control algorithm for utility interactive inverters in distributed generation systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23 (3): 1342-1347 (2008).

Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., Blaabjerg, F., "Power inverter topologies for photovoltaic modules – a review", *Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, Pennsylvania, USA 2: 782-788 (2002).

Kjaer, S. B., Pederson, J. K., Blaabjerg, F., "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (5) 1292-1306 (2005).

Komiyama, T., Aoki, K., Shimada, E., Yokoyama, T., "Current control method using voltage deadbeat control for single phase utility interactive inverter with fpga based hardware controller", *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2004*, Busan, South Korea, 2: 1594-1599 (2004).

Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53 (2): 486-494 (2006).

Krampitz, I., Kreutzman, A., “From masterpiece to team work, inverter market survey: sma’s new circuit concept promises higher yields”, *Photon*, 3: 56-67 (2002).

Lee, C.C., “Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller- part I”, *IEEE Trans. Syst. Man. and Cybern.*, 20 (2): 404-418 (1990).

Lee, C.C., “Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller - part II”, *IEEE Trans. Syst. Man. and Cybern.*, 20 (2): 419-435 (1990).

Leu, Y. G., Lee, T. T., Wang, W. Y., “On-line tuning of fuzzy-neural network for adaptive control of nonlinear dynamical systems”, *IEEE Transaction on Man. and Cybernetics*, 27: 1034-1043 (1997).

Li H. L., Hu A. P., Gao J., Dai X., “Development of a direct ac-ac converter based on a dspace platform”, *International Conference on Power System Technology*, Chongqing, China, 1–6 (2006).

Li, H., Wang, K., Zhang, D., Ren, W., “Improved performance and control of hybrid cascaded h-bridge inverter for utility interactive renewable energy applications”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC 2007*, Orlando, Florida, 2465-2471 (2007).

Li, Q., Wolfs, P., “Recent Developments in the topologies for photovoltaic module integrated converters”, *IEEE 37th Power Electronics Specialists Conference, PESC '06*, Jeju, Korea, 1 – 8, (2006).

Lin, B. R., Hoft, R. G., “Power electronics converter control based on neural network and fuzzy logic methods”, *IEEE 24th Annual Power Electronics Specialists Conference Record, PESC '93*, Seattle, WA, USA, 900 – 906 (1993).

Liserre, M., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., “Stability of grid-connected pv inverters with large grid impedance variation”, *Power Electronics Specialists Conference, PESC 04, IEEE 35th Annual*, Aachen, Germany, 4: 4773–4779 (2004).

Liserre, M., Blaabjerg, F., Teodorescu, R., “Grid impedance detection via excitation of lcl-filter resonance” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 43 (5): 1401–1407 (2007).

Liut, D. A., “Neural-network and fuzzy-logic learning and control of linear and nonlinear dynamic systems”, Doctor of Philosophy, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Virginia, 84-94 (1999).

- Mamdani, E. H., "Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant", *Proc. IEEE*, 121: 1585-1888 (1974).
- Maranda, W., Mey, G., Vos, A., "Optimization of the master-slave inverter system for grid connected photovoltaic plants" *Energy Conversion and Management*, 39 (3): 1239-1246 (1998).
- Martins, D. C., Demonti, R., Rüther, R., "Analysis of utility interactive photovoltaic generation system using a single power static inverter", *IEEE Conference Record of the Twenty-Eighth Photovoltaic Specialists Conference*, Alaska, USA, 1719-1722 (2000).
- Masoud K., Ledwich G., "Aspects of grid interfacing: current and voltage controllers", *Australasian Universities Power Engineering Conference and IEAust Electric Energy Conference, AUPEC/EECON'99*, Darwin, Australia, 260-265 (1999).
- Matsui, K., Ishigure, N., Ueda, F., "On-line impedance meter to measure the impedance of a distribution line using inverter", *Industrial Electronics Society, IECON '01, The 27th Annual Conference of the IEEE*, Denver, Colorado, USA, 2: 1230-1236 (2001).
- McCullough, W., Pitts, W., "A logical calculus of ideas immanent in nervous activity", *Bul. Math. Biophys.*, 5: 115-133 (1943).
- Meinhardt, M., Cramer, G., "Cost reduction through new pv system technology", *Kasseler Symposium Energie Systemtechnik, ISET*, Kassel, Germany, 152-168 (2000).
- Meinhardt, M., Cramer, G., "Multi-string converter – the next step in evolution of the string converter technology, *9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2001*, Graz, Austria, 1-9 (2001).
- Mendel, J. M., "Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial", *Proceedings of the IEEE*, 83 (3):345-377 (1995).
- Minsky, M., Papert, S., "Perceptrons", *MIT Press*, Cambridge, MA, 1-265 (1969).
- Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W. L., "Power electronics: converters, applications, and design 2nd ed.", *Wiley&Sons*, New York, 200-248, (1995).
- Mrad, F., Deep, G., "Experiment comparative analysis of conventioanl, fuzzy logic and adaptive fuzzy logic controllers", *IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Fourth IAS Annual Meeting Conference Record*, Arizona, USA, 1: 664-673 (1999).

Mulligan, W. P., Rose, D. H., Cudzinovic, M. J., Ceuster, D. M. D., McIntosh, K. R., Smith, D. D., Swanson, R. M., "Manufacture of solar cells with 21% efficiency", **19th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Hamburg, Germany, 462-465 (2004).

Myrzik, J. M. A., Calais, M., "String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - a review" **IEEE Power Tech Conference**, Bologna, Italy, 2: 1-8 (2003).

Myrzik, J. M.A., "Novel inverter topologies for single-phase stand-alone or grid-connected photovoltaic system" **4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, IEEE PEDS**, Bali, Indonesia, 1: 103-108 (2001).

Nauck, D., Klawonn, F., Kruse, R., "Foundations of neuro-fuzzy systems", **Wiley**, Chichester, UK, 187-221 (1997).

Nauck, D., Kruse, R., "NEFCLASS – A neuro fuzzy approach for the classification of data", **In ACM Symposium on Applied Computing**, Tennessee, USA, 461–465 (1995).

Nonaka, S., Kesamaru, K., Yamasaki, K., Nishi, N., "Interconnection system with single phase igt pwm csi between photovoltaic arrays and the utility line", **Annual Meeting, Conference Record of the Industry Applications Society, IEEE**, Seattle, USA, 2: 1302 – 1307 (1990).

Oishi, H., Okada, H., Ishizaka, K., Itoh, R., "Single phase soft-switched current-source inverter for utility interactive photovoltaic power generation system", **Proceedings of the Power Conversion Conference**, Osaka, Japan, 2: 632-637 (2002).

Öztemel, E., "Yapay sinir ağları", **Papatya Yayıncılık**, İstanbul, 45-107, (2003).

Patcharaprakiti, N., Premrudeepreechacharn, S., "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system", **Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE**, New York, USA, 1: 372 – 377 (2002).

Patcharaprakiti, N., Premrudeepreechacharn, S., Sriuthaisiriwong, Y., "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system", **Renewable Energy**, 30: 1771–1788 (2005).

Premrudeepreechacharn, S., Poapornsawan, T., "Fuzzy logic control of predictive current control for grid-connected single phase inverter" **Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, Alaska, USA, 1715-1718 (2000).

Rahim, N. A., Selvaraj, J., Krismanidata, "Hysteresis current control and sensorless mppt for grid-connected photovoltaic systems" **IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2007**, Vigo, Spain, 572 - 577, (2007).

Rajashekara, K., "Hybrid fuel-cell strategies for clean power generation" *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (3): 682-689 (2005).

Rashid, M. H., "Power electronics handbook: devices, circuits and applications, 2nd ed.", *Academic Press-Elsevier*, New York, 661-672, 717-768 (2006).

Reddy, K. N., Agarwal, V., "Utility-interactive hybrid distributed generation scheme with compensation feature", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 22 (3): 666-673 (2007).

Riatsch, J., Stemmler, H., Schmidt, R., "Single cell module integrated converter system for photovoltaic energy generation", *7th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'97*, Trondheim, Norway, 1: 71-77 (1997).

Rodriguez, F.; Emadi, A., "A novel digital control technique for brushless dc motor drives". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54 (5) 2365-2373 (2007).

Rosenbalt, F., "The perceptron a probabilistic model information storage and organization in the brain", *Psychological Review*, 65: 386-408 (1958).

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J., "Learning internal representations by error propagation volume 1", *MIT Pres*, Cambridge, 318-362 (1986).

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J., "Learning representations by back-propagating errors", *Nature*, 323: 553-536 (1986).

Sağıroğlu, Ş., Beşdok, E., Erler M., "Mühendislikte yapay zeka uygulamaları-I", *Ufuk Yayıncılık*, Kayseri, 7-10, 23-43, (2003).

Saha, S., Matsui, N., Sundarsingh, V. P., "Design of a low power utility interactive photovoltaic inverter", *International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, Perth, Australia, 1: 481-487 (1998).

Saha, S., Sundarsingh, V.P., "Novel grid-connected photovoltaic inverter", *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 143, (2): 219-224 (1996).

Sefa, İ., Altın, N., "Simulation of fuzzy logic controlled grid interactive inverter", *Fourth International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering*, Pitesti, Romania, III: 90-95 (2008).

Sefa, I., Altın, N., "Simulation of current controlled grid interactive inverter" *Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, TPE-2006 3rd*, Ankara, 964-968 (2006).

Shireen, W., Arefeen, M. S., “An utility interactive power electronics interface for alternate/renewable energy systems”, *Energy Conversion, IEEE Transaction on*, 11 (3): 643 – 649 (1996).

Silva, S.M., Lopes, B.M., Filho, B.J.C., Campana, R.P., Bosventura, W.C., “Performance evaluation of pll algorithms for single-phase grid-connected systems”, *Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the IEEE*, Seattle, USA, 4: 2259–2263 (2004).

Sperling, D., Cannon, J.S., “The hydrogen energy transition 3rd ed.”, *Elsevier Academic Pres*, California, 9-11 (2004).

Srinivasan, S., “Fuel cells: from fundamentals to application”, *Springer*, Heidelberg 221-231, (2006)

Sugeno, M., “An introductory survey of fuzzy control”, *Inf. Sci.*, 36: 59-83 (1985).

Sulzberger, S. M., Tschicholig-Gurman, N. N., Vestli, S. J., “FUN: Optimization of rule based systems using neural networks”, *In Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks*, San Francisco, CA, USA, 312–316 (1993).

Svensson J., “Synchronization methods for grid-connected voltage source converters”, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 148 (3): 229–235 (2001).

Şahin A, Balbaşı, M., Ar, İ., “Borik asit ve boron fosfat destekli, sülfolanmış polistiren/polivinil alkol kompozit membran sentezi ve karakterizasyonu”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 24 (1): 137-144 (2009).

Takagi, T., Sugeno, M., “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control”, *IEEE Transaction on Syst. Man. and Cybern.*, 15: 116-132 (1985).

Tano, S., Oyama, T., Arnould, T., “Deep combination of fuzzy inference and neural network in fuzzy inference”, *Fuzzy Sets & Systems*, 82 (2): 151–160(1996).

Tao, H., Duarte, J. L., Hendrix, M. A. M., “Control of grid-interactive inverters as used in small distributed generators”, *IEEE 42nd IAS Annual Meeting Conference Record of the Industry Applications Conference*, Louisiana, USA, 1574–1581 (2007).

Terai, H., Sumiyoshi, S., Kitaizumi, T., Omori, H., Ogura, K., Iyomori, H., Chandhaket, S., Nakaoka, M., “Utility-interactive solar photovoltaic power conditioner with soft switching sinewave modulated inverter for residential applications”, *IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference*, Queensland, Australia, 3: 1501-1505 (2002).

The Mathworks Inc., MATLAB/SIMULINK Release Notes for Release 14 with Service Pack 3.

Tirumala, R., Mohan, N., Henze, C., “Seamless transfer of grid connected pwm inverters between utility-interactive and stand-alone modes” *Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002*, Texas, USA, 2: 1081-1086 (2002).

Tsukamoto, M., “An approach to fuzzy reasoning method in GUPTA, RGRADE and YAGER”, *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*, 137-149 (1979).

Tunlasakun, K., Kirtikara, K., Thepa, S., Monyakul, V., “A Microcontroller based islanding detection for grid connected inverter”, *The 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Hiroshima, Japan, 3: 267-275 (2004).

Uddin, M. N., Abido, M. A., Rahman, M. A., “Development and implementation of a hybrid intelligent controller for interior permanent-magnet synchronous motor drives”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40 (1): 68-76 (2004).

Uemura, N., Yokoyama, T., “Current control method using voltage deadbeat control for single phase utility interactive inverter”, *The 25th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC '03*, Yokohama, Japan, 40-45 (2003).

Vachtsevanos, G., Kang, H., “Simulation studies of islanded behavior of grid connected photovoltaic systems” *Energy Conversion, IEEE Transaction on*, 4,(2): 177-183 (1989).

Vas, P., Stronach, A. F., “Adaptive fuzzy-neural dsp control of high performance drives”, *Sixth International Conference on IEE Power Electronics and Variable Speed Drives*, Nottingham, UK, 424-429 (1996).

Verhoeven, S. A. M., “Utility aspects of grid connected photovoltaic systems”, *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, IEA PVPS T5-01, St. Ursen, Switzerland*, 1-105 (1998).

Walker, G., “Evaluating mppt converter topologies using a matlab pv model” *Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia*, 21 (1): 49-56 (2001).

Wang P., Liu, H., Guo, C., Tao C., “Mppt control algorithms for wind power generation based on voltage disturbance” *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, 7398-7402 (2008).

Wang, Q., Chang, L., “An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19 (5): 1242-1249 (2004).

Wang, X., Kazerani, M., “A novel maximum power point tracking method for photovoltaic grid-connected inverters”, *The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON '03*, Virginia, USA, 3: 2332 – 2337 (2003).

Widrow, B., “Adaptative sampled-data systems, a statistical theory of adaptation”, *IRE WESCON Convention Record*, Part:4: 74-85 (1959).

Wilk, H., Ruoss, D., Toggweiler, P., “Innovative electrical concepts”, *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems, IEA PVPS 7-07, St. Ursen, Switzerland*, 1-50 (2002).

Woyte, A., Belmans, R., Nijs J., “Testing the islanding protection function of photovoltaic inverters” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18 (1): 157 – 162 (2003).

Yao, Z., Wang, L. X., Yan, Y., “A novel control strategy for grid-interactive inverters in grid-connected and stand-alone modes” *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06, Twenty-First Annual IEEE*, Dallas, Texas, 779–783 (2006).

Yu, H., Pan, J., Xiang, A., “A multi-function grid-connected pv system with reactive power compensation for the grid”, *Solar Energy*, 79: 101–106 (2005).

Yu, T., Choi, S. Kim, H., “Indirect current control algorithm for utility interactive inverters for seamless transfer” *Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007, IEEE*, Orlando, Florida, 2465–2471 (2007).

Yu., Taesik, Choi, S., Kim, H., “Indirect current control algorithm for utility interactive inverters for seamless transfer” *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '06*, Jeju, Korea, 1–6, (2006).

Yuvarajan, S., Yu D., Xu, S., “A novel power converter for photovoltaic applications” *Journal of Power Sources*, 135: 327–331 (2004).

Zadeh, L. A., “Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility”, Electronics Research Laboratory Memorandum M77/12, Berkeley University, To Appear in *Fuzzy Sets and Systems*, (1977).

Zadeh, L. A., “Outline of a new approach of the analysis of complex system and decision processes”, *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, SMC-3 (1): 28–44 (1963).

Zhang, J., Morris, A. J., “Fuzzy neural networks for nonlinear systems modeling”, *IEE Proc. Control Theory Applications*, 142 (6): 551-556 (1995).

Ziegler, J.G., Nichols, N.B., “Optimum settings for automatic controllers”, *Transactions of ASME*, 64: 759-768 (1942).

Zue A.O., Chandra A., “Simulation and stability analysis of a 100 kw grid connected lcl photovoltaic inverter for industry”, *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, Quebec, Canada, 1-6 (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALTIN Necmi
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.12.1978 Yunusemre
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 514 93 89
 Faks : 0 (312)
 e-mail : necmialtin@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Elektrik Eğitimi	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Elektrik Eğitimi	2000
Lise	Demirtaşpaşa Anadolu meslek Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2004 -	Efes Endüstri Meslek Lisesi	Öğretmen
2000 - 2004	Ahmet Necati Yılmaz Ç.P.L.	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Sefa İ., Altın N., Özdemir Ş., “Yenilenebilir enerji kaynakları için üç fazlı şebeke etkileşimli evirici” *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, IATS’09*, Karabük, Türkiye, 13-15 (2009).
2. Sefa İ., Altın N., “Simulation of fuzzy logic controlled grid interactive inverter” *University of Pitesti – Electronics and Computer Science, Scientific Bulletin*, 2 (8): 30-35 (2008). (Bu yayın 4-6 Eylül 2008 tarihleri arasında Romanya Pitesti Üniversitesinde düzenlenen “4th International Conference on Technical and

Physical Problems of Power Engineering” konferansında yayınlanmış ve dergide basılmak üzere seçilmiştir).

3. Sefa İ., Altın N., Özdemir Ş., “dSAPCE based fuzzy logic controlled boost converter” *University of Pitesti – Electronics and Computer Science, Scientific Bulletin*, 2 (8): 36-41 (2008) (Bu yayın 4-6 Eylül 2008 tarihleri arasında Romanya Pitesti Üniversitesinde düzenlenen “4th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering” konferansında yayınlanmış ve dergide basılmak üzere seçilmiştir).
4. Sefa İ., Altın N., Ozdemir S., Demirtas M., “dSPACE based control of voltage source utility interactive inverter”, *IEEE 19th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, Ischia, Italy, 1-5 (2008).
5. Sefa İ., Altın N., Asa E., “MATLAB tabanlı bir enerji kalitesi simülatörü” *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 1-5 (2008).
6. Sefa İ., Altın N., “Dengesiz şebeke koşullarında çalışan 18 darbeli doğrultucularda harmoniklerinin azaltılması üzerine bir yaklaşım”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Politeknik Dergisi*, 10 (3): 229-234 (2007).
7. Sefa İ., Altın N., “Kesintisiz güç kaynakları için 18 darbeli bir doğrultucu”, *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Politeknik Dergisi*, 9 (3) 147-152 (2006).
8. Sefa İ., Altın N. “Simulation of current controlled grid interactive inverter” *TPE-2006 3rd Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering*, Ankara-Turkey, 964-968 (2006).

Projeler

2006-2008 yılları arasında Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenen 07/2006-4 nolu “DSP Tabanlı Şebeke Etkileşimli Evirici Tasarım ve Uygulaması” başlıklı proje çalışmasında araştırmacı olarak görev almıştır

Hobiler

Fotoğraf, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol