

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİLİ
VE UVM İNVERTERLİ FOTOVOLTAİK
SİSTEMİN YAPAY SİNİR AĞLARI
TABANLI KONTROLÜ

Ahmet Afşin KULAKSIZ
DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
Konya, 2007

ÖZET

Doktora Tezi

MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİLİ VE UVM İNVERTERLİ FOTOVOLTAİK SİSTEMİN YAPAY SİNİR AĞLARI TABANLI KONTROLÜ

Ahmet Afşin KULAKSIZ

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ramazan AKKAYA
2007, 189 sayfa

Jüri: Prof. Dr. Hacı BODUR
Prof. Dr. Novruz ALLAHVERDİ
Prof. Dr. Saadetdin HERDEM
Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÜRKMEZ
Yrd. Doç. Dr. Ramazan AKKAYA

Fotovoltaik (PV) panellerin yakıt gereksinimlerinin olmaması, kirlilik oluşturmamaları, gürültü çıkarmamaları gibi avantajlarına rağmen yaygın şekilde kullanılmalarını önleyen en önemli faktörler, yatırım maliyetlerinin yüksekliği ve enerji dönüşüm verimlerinin henüz düşük olmasıdır. Bu nedenle fotovoltaik enerji ile beslenen sistemlerin verimini iyileştirmeye yönelik çalışmalar önem kazanmıştır. Tezde, şebekeden bağımsız bir PV güç sisteminin maksimum güç noktası izleme (MPPT) performansının geliştirilmesi amacıyla genetik algoritma (GA) yardımlı yapay sinir ağı (YSA) tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Maksimum güç noktasının izlenmesi, tüm hava şartları için güneş panellerinden maksimum gücün alınabilmesi amacıyla yük olarak kullanılan bir asenkron motorun mekanik enerji çıkışı kontrol edilerek gerçekleştirilmiştir. Sistemde maksimum güç noktası, gerçek zamanlı olarak bulunmuş, PV panellerin çıkış gerilimi YSA ile belirlenen optimal noktaya getirilerek MPPT algoritması gerçekleştirilmiştir.

YSA'nın eğitilmesi amacıyla PV panellerin simülasyonla elde edilen modellerinin kullanılması yerine, deneysel ölçümler gerçekleştirilmiş, genellikle kullanıcıya hazır şekilde sunulmayan PV panel parametrelerinin bulunması ve PV panel hakkında bir ön bilgiye sahip olunması zorunlulukları ortadan kaldırılmıştır. Işık şiddeti ve sıcaklık değerleri, YSA'da giriş bilgisi olarak alınmış ve PV panellerin maksimum güç noktasındaki referans gerilim değeri bulunmuştur. MPPT

algoritmasında, oransal-integral (PI) denetleyici kullanılarak inverter frekansındaki değişme miktarının ayarlanmasıyla hızlı izleme cevabı elde edilmiş ve maksimum güç noktası etrafındaki dalgalanmalar önlenerek güç izleme hatası azaltılmıştır. GA, giriş veri setinde indirgemeler yapılarak daha etkin bir setin elde edilmesi ve sinir ağının genelleştirme yeteneğinin artırılması amacıyla kullanılmıştır. Diğer kullanım amacı ise sinir ağında gizli katmandaki düğüm sayılarının optimum şekilde belirlenmesidir. YSA'daki aşırı öğrenme probleminin önlenmesi amacıyla GA'da amaç fonksiyonu hesabı için doğrulama seti kullanılmış, ayrıca amaç fonksiyonuna bir ceza terimi eklenerek kompleks mimariler cezalandırılmış, böylece sayısal işaret işlemcide (DSP) programlanabilen ideal büyüklükte bir mimarinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, üç fazlı inverterin anahtarlanmasıyla kullanmak üzere gerçekleştirilen GA yardımcı YSA tabanlı bir uzay vektör modülasyonu (UVM) metodu önerilmiştir. GA, YSA tabanlı UVM'nin DSP'de gerçekleştirilmesi için optimum büyüklükte sinir ağı yapısının bulunabilmesi amacıyla topoloji optimizasyonunda kullanılmıştır.

Maksimum güç noktası izleyicide sinir ağı yapısının gerçekleştirilmesi ve üç fazlı inverterde kullanılan UVM metodu ile ilgili hesaplamaların yapılması amacıyla ADSP-21992 sayısal işaret işlemcisi kullanılmıştır. PV sistem, laboratuarda pratik olarak gerçekleştirilmiş, elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar verilmiştir. PV sistem üzerinde gün boyu yapılan deneysel çalışmalardan, GA optimizasyonunun kullanılmadığı YSA yapısını içeren MPPT algoritması için bulunan değerlere göre, teorik olarak hesaplanan PV panel gücünün ortalama olarak %95.14'ü kullanılabilirken, GA optimizasyonlu YSA yapısını içeren MPPT algoritması için %97.58'inin kullanılabildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Sistemler, Yapay Sinir Ağları, Genetik Algoritmalar, MPPT, PWM İnverter, DSP, Uzay Vektör Modülasyonu.

ABSTRACT

PhD Thesis

ANN-BASED CONTROL OF A PV SYSTEM WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKER AND SVM INVERTER

Ahmet Afşin KULAKSIZ

Selcuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
2007, 189 pages

Jury : Prof. Dr. Hacı BODUR
Prof. Dr. Novruz ALLAHVERDİ
Prof. Dr. Saadetdin HERDEM
Assist. Prof. Dr. Abdullah ÜRKMEZ
Assist. Prof. Dr. Ramazan AKKAYA

Despite the advantages of photovoltaic (PV) modules such as noiseless operation, being fuel-free and non-polluting, the most important factors hindering their wide use are high investment costs and low energy conversion efficiencies. By reason of that, studies involving efficiency improvement of the systems fed by PV energy is deemed important. In this thesis, a genetic algorithm (GA) assisted artificial neural network (ANN) based approach to improve maximum power point tracking (MPPT) performance of a stand-alone PV power system has been presented. The maximum power point tracking is accomplished by controlling mechanical energy output of induction machine to extract maximum available power from the solar array at all environmental conditions. In the system, maximum power point is determined in real time and MPPT algorithm is realized by forcing the PV modules to operate at its optimal point, determined by ANN.

Instead of using simulated models of PV modules, experimental measurements are employed to obtain the training set for neural network, and requirement of any prior knowledge and the cumbersome process of obtaining PV module parameters are eliminated. ANN uses irradiation and temperature as input information to estimate reference voltage value corresponding PV module's maximum power point. A proportional-integral (PI) controller is designed to adjust the step size of inverter frequency and compared to the applications with constant step size, smooth tracking of maximum power was obtained and tracking error was reduced. GA assistance was used to make reductions to input data set and a more

compact and effective data set has been obtained and the generalization performance of ANN has been improved. GA assistance has also been used to determine optimal number of neurons in the hidden layer. GA employs generalization error of ANN in objective function and also by adding a penalty term to objective function complex architectures are punished and ANN architecture in ideal size for programming in digital signal processor (DSP) is obtained.

In this thesis, a GA-assisted ANN-based implementation of space-vector modulation (SVM) method for three-phase inverter switching has been presented. In DSP implementation of ANN-based SVM method, GA assistance has been used in topology optimization to determine optimum size of neural network structure.

ADSP-21992 digital signal processor has been used for emulating the neural network structure of maximum power point controller and performing necessary calculations for presented SVM method. PV system has been practically implemented on the laboratory and simulation and experimental results have been presented. From the experimental studies conducted in the system through a day, it was shown that, while %95.14 of the theoretically calculated available PV power can be utilized by the conventional MPPT algorithm, which does not use GA assistance, %97.58 of available PV power can be utilized by the developed MPPT algorithm using GA assistance.

Key words: PV Systems, Artificial Neural Networks, Genetic Algorithms, MPPT, PWM Inverter, DSP, Space Vector Modulation.

ÖNSÖZ

Fosil kökenli enerji kaynaklarının sonlu olması, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri, yüksek enerji maliyetleri ve enerji güvenliği gibi konular yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında fotovoltaiik (PV) enerji, çevreye olumsuz etkisinin olmaması, sessiz çalışması, az bakım gerektirmesi gibi avantajlarıyla, özellikle şebekeden uzak bölgelerde enerji ihtiyacının karşılanması için kullanılabilecek önemli alternatiflerden birisidir. PV enerjinin kullanımının gittikçe yaygınlaşması ve çeşitli hükümet politikaları ile desteklenmesi, ekonomik açıdan daha etkin hale gelmesini sağlamaktadır. PV enerjinin henüz çok yaygın kullanım alanı bulamamasındaki en önemli etkenler, düşük verimleri ve PV panel maliyetlerinin henüz istenen seviyelere düşmemiş olmasıdır.

PV sistemlerde panellerin yanında, sistemde yer alan güç elektroniği dönüştürücüler de verime önemli ölçüde etki ettiğinden, PV enerjinin yaygınlaşması için bu konuda yapılmakta olan çalışmalar da önem kazanmıştır. Özellikle maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmasını yerine getiren güç elektroniği dönüştürücülerine sahip PV sistemler hakkında yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu tezde, şebekeden bağımsız uygulamalar için tasarlanan ve gerçekleştirilen MPPT'li bir PV sistemin, yapay zeka yöntemleri içerisinde önemli yeri olan yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar ile performansının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Bu tezin hazırlanmasının her aşamasında çalışmalarımı büyük bir titizlikle yönlendiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ramazan AKKAYA'ya, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Novruz ALLAHVERDİ'ye ve Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÜRKMEZ'e, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım bölümümüz değerli öğretim üyeleri ve elemanlarına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, PSIM simülasyon programını ücretsiz kullanmamı sağlayarak bu tezdeki simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmeme imkan verdiği için POWERSYS firmasına teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca gösterdiği sabır ve anlayıştan dolayı eşime, maddi ve manevi her türlü destekleriyle yanımda olan aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Konunun Tanıtımı	4
1.2 Tezin Amacı ve Önemi.....	6
1.3 Tezin Organizasyonu.....	8
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	9
3. TEORİK ESASLAR	18
3.1 Fotovoltaik Güç Sistemleri	18
3.1.1 Fotovoltaik enerji	19
3.1.1.1 Fotovoltaik teknolojinin gelişimi	20
3.1.1.2 p-n tek eklemlili hücre	21
3.1.1.3 Eşdeğer devre	21
3.1.1.4 Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri	24
3.1.1.5 Sıcaklık ve ışık şiddeti etkisi.....	25
3.1.1.6 Fotovoltaik paneller ve diziler	27
3.1.1.7 Elektriksel yük uyumu ve maksimum güç noktası izleyici	27
3.1.2 MPPT algoritmaları	30
3.2. Yapay Sinir Ağlarına Genetik Algoritma Optimizasyonunun Uygulanması ..	36
3.2.1. Yapay sinir ağları	37
3.2.1.1. Temel YSA bileşenleri.....	37
3.2.1.2. Yapay sinir ağı	39
3.2.1.3. Çok katmanlı perseptron modeli	40
3.2.1.4. YSA tabanlı bir sistemin gerçekleştirilmesi safhaları	46
3.2.1.5. YSA'nın uygulanmasındaki bazı önemli hususlar	47
3.2.2. Genetik algoritmalar	50

3.2.2.1. Popülasyonun rasgele değerlerle başlatılması.....	51
3.2.2.2. Popülasyondaki bireylerin uygunluklarının değerlendirilmesi	51
3.2.2.3. Yeni popülasyonun oluşturulması	51
3.2.3. GA optimizasyonunun YSA'ya uygulanması.....	55
3.3. İnverterler ve PWM Kontrol Metotları	61
3.3.1. İnverterler.....	61
3.3.2. Üç fazlı gerilim beslemeli inverterlerde kullanılan PWM metotları.....	67
3.3.3. Uzun vektör modülasyonu metodu.....	73
3.3.4. UVM metodunun sayısal işaret işlemcide gerçekleştirilmesi.....	83
4. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ.....	84
4.1. Sistem Donanımı.....	85
4.1.1. Fotovoltaik paneller.....	86
4.1.2. Işık şiddeti ve sıcaklık sensörü.....	87
4.1.3. ADSP-21992 Ez-kit lite deney kartı.....	87
4.1.4. Akıllı güç modülü.....	89
4.1.5. Üç fazlı asenkron motor.....	91
4.1.6. Seri haberleşme kartı	91
4.1.7. Arabirim devreleri	92
4.2. Sistem Yazılımı.....	95
4.2.1. GA yardımcı YSA tabanlı MPPT sisteminin gerçekleştirilmesi	97
4.2.1.1. MPPT denetleyici için YSA'da veri setinin elde edilmesi	98
4.2.1.2. MPPT denetleyici için YSA mimarisinin GA optimizasyonu ile belirlenmesi	100
4.2.1.3. MPPT'de YSA'nın giriş veri seti optimizasyonu için GA'nın kullanımı.....	107
4.2.2. PI denetleyicinin gerçekleştirilmesi	111
4.2.3. Sabit V/f kontrollü asenkron motor sürücüsünün gerçekleştirilmesi	112
4.2.4. GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunun gerçekleştirilmesi.....	113
4.2.4.1. UVM metodu için YSA'da veri setinin elde edilmesi.....	115
4.2.4.2. UVM metodu için YSA mimarisinin GA optimizasyonu ile belirlenmesi	116

4.2.4.3. UVM metodu için YSA'nın eğitilmesi ve testi	119
5. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI.....	121
5.1. Geleneksel YSA Tabanlı ve GA Yardımlı YSA Tabanlı MPPT Sistemleri .	121
5.1.1. Simülasyon sonuçları.....	121
5.1.2. Deneysel sonuçlar.....	130
5.2. Geleneksel UVM ve GA Yardımlı YSA Tabanlı UVM Metotları	143
5.2.1. Simülasyon sonuçları.....	143
5.2.2. Deneysel sonuçlar.....	150
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	156
6.1 Sonuçlar.....	156
6.2 Öneriler.....	159
7. KAYNAKLAR.....	161
EKLER.....	169
EK I. MATLAB PROGRAMLARI.....	169
EK II. PSIM PROGRAMLARI.....	186

SİMGELER ve KISALTMALAR

SİMGELER

e	: Hata
E_g	: Genelleştirme hatası
f	: Frekans (Hz)
g	: Gradyan vektörü
G	: Solar ışıık şiddeti (W/m^2)
I_a	: Üç fazlı inverterde faz akımı (A)
I_{kd}	: PV panel kısa devre akımı (A)
I	: Fotovoltaik akım (A)
I_0	: PV panel sızıntı akımı (A)
I_{MPP}	: Maksimum güç noktasındaki akım değeri (A)
I_p	: Paralel kol akımı (A)
I_{PV}	: PV panel çıkış akımı (A)
I_{sat}	: Diyot ters doyma akımı (A)
J	: Jakobiyen matrisi
K_I	: İntegral kazanç sabiti
K_p	: Oransal kazanç sabiti
M	: Modülasyon faktörü
P_{max}	: Maksimum güç (W)
P_c	: Çaprazlama operatörü
P_m	: Mutasyon operatörü
R_p	: Eşdeğer model paralel direnci (Ω)
R_s	: Eşdeğer model seri direnci (Ω)
S_a, S_b, S_c	: Üç fazlı inverter için anahtarlama sinyalleri
T_a ve T_b	: UVM metodunda aktif vektör süreleri (T_k ve T_{k+1} süreleri)
T	: Solar hücre sıcaklığı (K)
T_0, T_7	: Sıfır vektör süreleri
T_m	: Aktif modülasyon süresi
T_s	: Anahtarlama periyodu
V	: Fotovoltaik gerilim (V)

V_a, V_b, V_c	: Faz gerilimleri (V)
V_{ad}	: PV panel açık devre gerilimi (V)
V_d	: DC kaynak gerilimi (V)
$\vec{V}_k, \vec{V}_{k+1}$	: k'nci aralıkta referans vektöre en yakın iki aktif vektör
V_{ab}	: Üç fazlı inverter fazlar arası çıkış gerilimi (V)
V_{MPP}	: Maksimum güç noktasındaki gerilim değeri (V)
V_{PV}	: PV panel çıkış gerilimi (V)
V_{ref}	: Referans gerilimi (V)
$\vec{V}_{ref}$	: Referans gerilim vektörü
V_T	: Taşıyıcı dalganın tepe değeri (V)
$\vec{V}_\alpha, \vec{V}_\beta$	: Referans vektörün α ve β bileşenleri
Δf	: İnverter frekansındaki değişme miktarı (Hz)
η	: Yakınsama hızı
η_d	: Doluluk faktörü
μ	: Negatif olmayan bir büyüklük
θ	: Referans vektörün en yakın vektör bileşeniyle yaptığı açı (rad)
ω	: Açısal hız (rad/sn)

KISALTMALAR

AC, DC	: Alternatif akım, doğru akım
ADC	: Analog-Dijital dönüştürücü
ALU	: Aritmetik lojik birim
ASIC	: Uygulamaya özel entegre devre
DSP	: Sayısal işaret işlemci
FPGA	: Alan programlanabilir kapı dizisi
GA	: Genetik algoritma
GUI	: Grafik kullanıcı arabirimi
HB	: Histerezis bandı
HVAC	: Isıtma, havalandırma ve klima
I/O	: Giriş/Çıkış
IGBT	: İzoleli kapılı bipolar transistör
IPM	: Akıllı güç modülü

LM	: Levenberg-Marquardt
MOSFET	: Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
MPPT	: Maksimum güç noktası izleyici
MSE	: Ortalama karesel hata
P&O	: Pertürbasyon ve gözlem (Perturbation and observation)
PI	: Oransal-integral
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
RAM	: Rasgele erişimli bellek
RBF	: Radyal temelli fonksiyon
SHE-PWM	: Seçilmiş harmonik eliminasyonlu PWM
SPORT	: Seri port
SPWM	: Sinüzoidal PWM
THD	: Toplam harmonik distorsiyon
UART	: Evrensel asenkron alıcı verici
USB	: Evrensel seri yol
UVM	: Uzay vektör modülasyonu
YSA	: Yapay sinir ağları

1. GİRİŞ

Fosil kökenli geleneksel enerji kaynaklarının tükenmekte olması ve küresel ısınma konusundaki endişeler, son yıllarda güneş, rüzgar ve su gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları, geleneksel enerji kaynaklarına göre çevreye daha az zarar vermeleri, tükenmemeleri, güvenilirlik, sürdürülebilirlik ve üretildiği yerde tüketilmeleri gibi avantajlara sahiptir.

Yenilenebilir enerji kullanımının giderek yaygınlaşması ve çeşitli hükümet politikaları (vergi destekleri, indirimler vs.) ile desteklenmesi ekonomik olarak gittikçe daha cazip hale gelmelerini sağlamaktadır. Ülkemizde bu konuda atılan ilk önemli yasal adım 2005 yılında T.B.M.M.'de kabul edilen “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” olmuştur (Resmi gazete, 2005). Bu kanun ile yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaşmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır. Türkiye’de yenilenebilir enerji sektörünün güçlenmesi için, benzer hükümet teşvikleri ile yerli yenilenebilir enerji potansiyelinin kullanımının teşvik edilmesi, gelecekte fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına katkı sağlayabilecektir. Yapılması beklenen ek yasal iyileştirmelerle ülkemizde yenilenebilir enerji endüstrisinin oluşturulması hedefi de, bu konuda yapılan çalışmalara önem kazandırmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında fotovoltaik (PV) enerji, hareketli parçalar içermemesi nedeniyle çok az bakım gerektirmesi, gürültü ve yıpranma gibi dezavantajlarının olmaması ve yakıt maliyetlerinin bulunmaması gibi özellikleri sebebiyle önemli enerji alternatiflerinden biri haline gelmiştir. Özellikle ülkemizin coğrafi konumu itibarıyla güneş enerjisi kullanımı için çok uygun olması, örneğin yıllık ışık şiddeti ortalamasının 3.6kWh (m² başına günlük ortalama) ve toplam yıllık güneş alma periyodunun ise yaklaşık 2460 saat olması (Balat ve Havva 2005) güneş enerjisi konusunda yapılacak çalışmaları daha önemli hale getirmektedir. Fotovoltaik enerji, şebekeden uzak bölgelerde düşük miktarlarda enerjiye ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanım için en önemli enerji kaynağı alternatiflerindendir. En

yaygın kullanım alanları, telekomünikasyon, ısıtma, havalandırma, klima (HVAC) ve tarımsal alanlarda sulama gibi şebekeden uzak uygulamalardır.

Fotovoltaik sistemler, elektrik güç teknolojisinde gittikçe artan bir kullanım alanı bulmalarına rağmen, yüksek üretim maliyetleri ve düşük enerji dönüşüm verimlerine sahip olmaları gibi temel dezavantajlara sahiptir. Bunun nedeni büyük ölçüde, çıkış gerilim ve akım değerlerinin ışık şiddeti, çalışma sıcaklığı ve yük akımı ile nonlineer olarak değişmesidir. Bu dezavantajların giderilebilmesi için fotovoltaik panellerin üretim teknolojisinin geliştirilmesinin yanında, elektrik çıkış güçlerinin kontrolü de önemli yaklaşımlardan biridir. Bunun için PV enerji kaynağı ile yük empedansı, herhangi bir hava şartı için uyumlandırılarak maksimum güç üretimi elde edilmelidir. Maksimum güç noktası izleme (MPPT) olarak adlandırılan bu işlem ile PV panellerin çalışma noktasının on-line veya off-line şekilde çalışan algoritmalarla izlenmesi ve en iyi noktaya getirilmesi gerekmektedir.

Yapay sinir ağları (YSA), kompleks sistemlerin modellenmesi ve sistem tanımada etkili olması gibi özellikleri nedeniyle MPPT uygulamaları için iyi bir alternatiftir. Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, MPPT’de YSA’nın kullanılmasıyla sistem performansı iyileştirilmekte, bu yöntemle PV parametreleri hakkında çok az bilgiye ihtiyaç duyulmakta ve oldukça yüksek doğrulukta MPPT işleminin gerçekleştirilebilmesi mümkün olmaktadır.

Genel amaçlı bir optimizasyon aracı olan genetik algoritmalar (GA), fonksiyonel türevlerden bağımsız, sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerine uygulanabilir ve rasgele yapıda (stokastik) olmaları sebebiyle yerel minimumlara yakalanma olasılıklarının az olması gibi özellikleriyle gittikçe artan bir uygulama alanı bulmuştur. GA, ele alınan problemde bağımsız yapıda olduğu için uygunluk ölçütü ve gösterim yöntemi dışında ele alınan problem hakkında herhangi bir bilgiye ihtiyaç duyulmamaktadır. GA’lar sonlu uzunlukta genellikle de ikili dizilere sahip bireylerin oluşturduğu popülasyonun tümünde çalıştıklarından, geleneksel optimizasyon tekniklerine göre farklılıklar göstermektedirler. YSA ile GA’nın birlikte kullanılmalarının, sadece YSA’ya veya GA’lara dayalı uygulamalara göre akıllı sistemlerde büyük ölçüde iyileştirmelere yol açtığı görülmüştür (Yao 1999). GA’ların YSA tasarımında, topoloji optimizasyonu, genetik eğitim algoritmaları ve kontrol parametresi optimizasyonu gibi alanlarda kullanımları yaygınlaşmaktadır.

YSA'da bilgiyi işleme yeteneğini önemli ölçüde etkilediği için, mimari tasarım büyük önem taşımaktadır. Çeşitli çalışmalarda büyük boyuttaki ağlarda eğitme verisinin ezberlenerek genelleştirme yeteneğinin zayıfladığı, aşırı küçük boyuttaki sinir ağlarında ise eğitme örneklerinin bile öğrenilememesi problemiyle karşılaşıldığı görülmüştür (Miller ve Giles 1993, Giles ve Omlin 1994). Mimari tasarım, geçmiş yıllarda uzman yardımıyla gerçekleştirilmiş ve büyük ölçüde uzmanın tecrübesine bağlı olarak deneme yanılma yöntemiyle yapılmıştır. Çok zaman harcayan bir yöntem olan deneme yanılma, yüksek derecede belirsizlikler içerir. Yao (1999), en iyiye yakın bir mimarinin otomatik olarak tasarlanması için sistematik bir yaklaşım olmadığını belirtmiştir. Yapıcı ve bozucu (constructive and destructive) algoritmalar üzerinde yapılan araştırmalarda mimarilerin otomatik olarak tasarlanması yönünde çabalar harcanmıştır (Fahlman ve Lebiere 1990). Ancak Angeline ve ark. (1994) tarafından bu tip tepe-tırmanma (hill-climbing) metodlarının yerel optimumlara yakalanma olasılıklarının yüksek olduğu ve tüm ağ mimarisi sınıfı yerine sınırlı topolojik alt setleri araştırdığı belirtilmiştir. Miller ve ark. (1989), GA'ların bu amaç için iyi bir aday olduğunu göstermiştir.

Giriş veri seti optimizasyonunda, tüm girişlerden otomatik olarak önemli örneklerin alınmasıyla küçük boyutlu ve etkin bir veri setinin elde edilmesi amaçlanır. YSA'nın giriş örnekleri için optimale yakın bir setin bulunması problemi, bir arama problemi olarak formüle edilebilir. Büyük bir giriş veri seti için optimale yakın bir alt set bulunmaya çalışılır. Bu aramanın etkin olarak gerçekleştirildiği ve daha iyi bir performansın elde edildiği çeşitli araştırmacılar tarafından doğrulanmıştır (Brill ve ark. 1992, Guo ve Uhrig 1992, Brown ve Card 1997).

Şebekeden bağımsız PV güç sistemi uygulamalarında başlangıçta düşük güç dönüşüm maliyeti ve kolay uygulanabilirlik gibi nedenlerle DC motorlar kullanılmış olsa da, daha güvenilir olan ve bakım gerektirmeyen asenkron motor içeren PV sistemler gittikçe yaygınlaşmıştır. Yarı iletken güç elemanlarında, lojik devrelerde ve kontrol teorilerindeki ilerlemeler de AC motorların PV sistemlerde kullanımının yaygınlaşmasında etken olmuştur. Tezde gerçekleştirilen sistemde yük olarak, daha sağlam ve güvenilir olmaları, az bakım gerektirmeleri, çok yaygın şekilde bulunmaları, maliyetlerinin düşük olması gibi özelliklerinden dolayı, üç fazlı asenkron motor kullanılmıştır.

AC yüklerin güvenilir ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için gerekli gerilimin ve güç kalitesinin uygun şekilde sağlanması gerekir. Fotovoltaik panellerden sağlanan DC gerilimin üç fazlı AC gerilime dönüştürülmesi inverterlerle gerçekleştirilir. Üç fazlı inverterlerde, çıkış geriliminin üretilmesi için kullanılan çok sayıdaki yöntem arasından uzay vektör modülasyonu (UVM) metodu, sinüzoidal PWM metoduna göre daha yüksek çıkış gerilimi sağlaması, daha düşük anahtarlama kayıplarına ve toplam harmonik distorsiyona sahip olması gibi avantajlarından dolayı oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu metodun kullanımı son yıllarda asenkron motor, sabit mıknatıslı senkron motor, fırçasız DC motor ve anahtarlama relüktans motorların kontrolünde artış göstermektedir (Rathnakumar ve ark. 2005).

UVM metodu, donanım ve yazılım karmaşıklığı ile gerekli hesaplama sürelerinin azaltılması ve hassasiyetin artırılması için YSA tabanlı olarak gerçekleştirilebilir. Böylece örnekleme süresi azaltılarak daha yüksek anahtarlama frekanslarına erişilebilmekte ve çıkıştaki PWM dalga şekillerinde daha düşük harmonikler meydana gelmektedir (Vas 1999).

Tasarlanan PV sistemdeki karmaşık matematiksel işlemlerin gerçekleştirilmesi ve kontrol teorilerinin uygulanması, yüksek hızda sayısal işaret işlemcilerin (DSP) kullanılması ile mümkün olabilmektedir. DSP'ler matematiksel hesaplamaların çok hızlı şekilde yapılmasına ve geri beslemeli kontrol sistemlerinde band genişliğinin artırılabilmesine imkan sağlanacak şekilde optimize edilmiş işlemcilerdir. Kontrol sistemlerinin hızlı ve yeterli hassasiyette geri besleme ölçümüne gerek duymasından dolayı içerdikleri analog/dijital dönüştürücülerin (ADC) çözünürlük, dönüşüm hızı ve giriş örnekleme yapısı özellikleri, DSP'leri geleneksel işlemcilere göre daha güçlü kılmaktadır. Ayrıca DSP'ler güç dönüştürücülerinin kontrolünde önemli olan zamanlayıcı, PWM çıkışları gibi çevre elemanlarını da tümleşik halde bulundurmaları, maliyet ve baskı devre kart alanının azaltılması gibi avantajlar sağlamaktadırlar.

1.1 Konunun Tanıtımı

Fotovoltaik sistemlerde genellikle havalandırma ve su pompalama gibi uygulamalarda kullanılan elektrik motorları, normal ışık şiddeti ve sıcaklık seviyelerinde anma hızında çalışacak şekilde seçilir. Ancak ışık şiddeti ve

sıcaklıktaki herhangi bir değişme durumunda PV panellerden sağlanan güç ile yüke aktarılması gereken güç arasında uyumsuzluk meydana gelir ve bu durum sistem verimini düşürmekle birlikte özellikle de sistemde kararsız çalışmaya yol açar. Bu çalışmada, mekaniksel yüklerin ihtiyaç duyduğu gücün hızla orantılı olarak değiştii göz önüne alınarak, motorun hızı değiştirilmek suretiyle yükün ihtiyaç duyduğu güç kontrol edilmekte ve PV kaynak ile yük arasında uyum sağlanmaktadır. Böylece, MPPT algoritması kullanılarak PV panellerin herhangi bir sıcaklık ve ışık şiddetine karşılık gelen bir hava şartı için maksimum güç noktası olarak adlandırılan bir noktada çalıştırılması sağlanmaktadır.

MPPT algoritması, genellikle PWM kontrollü DC-DC dönüştürücüler ve herhangi bir kontrol yöntemini kullanan inverterler ile iki kademede gerçekleştirilir. Bu yaklaşımda, önce DC-DC dönüştürücü katında MPPT işlemini yerine getirmek için gerekli algoritmalar yürütölür, sonra bu algoritmalara ek olarak ayrı bir inverter yapısıyla AC yüklere sinüzoidal formda gerilim sağlanır. Bu çalışmada geleneksel yöntemlerden farklı olarak, MPPT ve DC-AC dönüşüm fonksiyonları sadece gerilim beslemeli üç fazlı inverter kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

PV enerji, şebekeden sağlanan elektrik enerjisiyle karşılaştırıldığında daha pahalı olduğu için şebekeden uzak bölgelerdeki uygulamalarda daha yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemlerin büyük çoğunluğunda enerji depolama işlemi akülerle gerçekleştirilir. Aküler pahalı, ağır, nispeten kısa ömürlüdür ve sürekli olarak izlenme ve bakım gerektirir. Şebekeden uzak bölgelerde bu işlem çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir. Tarımsal alandaki su pompalama uygulamalarında depolama işlemi, suyun depolanması şeklinde yapıldığından, havalandırma uygulamalarında ise kaynak ve talep yükü arasında uyum bulunduğundan dolayı sistemde elektrik enerjisi depolamaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Gerçekleştirilen sistem, elektrik enerjisi depolaması gerektirmeyen uygulamalarda kullanılabilir ve fotovoltaik panellerden sağlanan güç direkt olarak AC yüklere aktarılacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece sistem maliyetinin artmasında önemli etkiye sahip bileşenlerden olan akü depolama birimi sistemde yer almamış ve akülerin şarj edilmesi için gerekli olan ayrı bir şarj edicinin kullanımı da elimine edilmiştir.

İnverter, verim ve güç kalitesi gibi faktörler göz önüne alınarak, üç fazlı yükler için uygun bir besleme sağlamak amacıyla UVM metoduyla kontrol edilmiştir. MPPT işlemi, gerilim ve frekans parametrelerinin değiştirilmesiyle direkt olarak inverter biriminde gerçekleştirilmektedir. MPPT algoritmasında yapay sinir ağı, PV sistemdeki optimal çalışma geriliminin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Kontrol sinyali olarak kullanılan frekanstaki değişme miktarı, gerçek zamanlı olarak belirlenmekte ve PV çıkış gerilimi için gerçekleştirilen geri besleme ile PV sistemin maksimum güç noktasına karşılık gelen optimal gerilim değerinde çalışması sağlanmaktadır. İnverterde modülasyon faktörü, sabit V/f kontrol yöntemine göre değiştirilmektedir. Hızlı maksimum güç izleme cevabı elde edilmesi ve cevapta oluşan dalgalanmaların azaltılması için, frekanstaki değişme miktarı PI denetleyici ile belirlenmiştir.

Çalışmada pratik uygulama için DSP üzerinde programlamaya uygun yapıda bir YSA tabanlı uzay vektör modülatörü tasarlanmıştır. Bu amaçla YSA yapısında giriş olarak sadece açı değeri kullanılmış ve lineer bölgede çalışma ele alındığından, modülasyon faktörü YSA çıkışına direkt olarak uygulanmıştır. Böylece YSA yapısının sadeleştirilmesi sağlanmıştır. YSA'da gizli katmandaki sinir hücresi sayıları geleneksel deneme yanılma yöntemi yerine GA ile uzman yardımına ihtiyaç duyulmadan belirlenmektedir.

1.2 Tezin Amacı ve Önemi

Bu çalışmada maksimum güç noktası izleyicisi olarak çalışan üç fazlı gerilim beslemeli invertere sahip DSP ile kontrol edilen bir fotovoltaik sistemin tasarlanması, pratik olarak gerçekleştirilmesi ve PV sistemin veriminin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Bunu sağlamak için yapay zeka yöntemleri arasında sistem tanıma, tahmin gibi özellikleriyle güç elektroniği sistemlerindeki kullanımları gittikçe yaygınlaşan YSA'dan faydalanılmıştır.

Maksimum güç noktası izleyicide referans gerilim değerinin bulunmasında lineer fonksiyon yaklaşımı teknikleri YSA'ya göre özellikle işlem sadeliği açısından daha uygun görünmesine karşılık, referans gerilim değeri için tüm çalışma alanını kapsayacak matematiksel bir denklemin kurulması mümkün olmamaktadır. Eğri uydurma yöntemleri de referans gerilimin değerini istenen doğrulukta

vermemektedir. Bu sebeple tezde, ışık şiddeti ve sıcaklığa bağlı olarak referans değerin gerçek zamanda bulunması için YSA'dan faydalanılması ve gerçek zamanlı bir YSA uygulamasının gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

YSA tabanlı olarak gerçekleştirilen MPPT algoritmasının önemli özelliklerinden birisi, kontrol parametresi olarak PV panel gerilimi ve akımı yerine sadece PV panel geriliminin kullanılmasıdır. Böylece, akım ölçümünde ortaya çıkan gürültü gibi etkiler ve nispeten yüksek maliyetli akım sensörlerine gerek duyulmadan, maksimum güç noktasının izlenmesi sadece PV panel geriliminin ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Tezin diğer bir özelliği, MPPT'de kullanılan YSA yapısı için eğitime verisi olarak, PV panel modelinden elde edilen simülasyon sonuçları yerine, PV panellerin maksimum güç noktası için deneysel ölçümlerle bulunan maksimum gerilim değerlerinin kullanılmasıdır. Böylece, karmaşık simülasyon işlemine ve PV panellerin elektriksel karakteristiklerinin bilinmesine gerek duyulmamaktadır.

YSA, veriye dayalı bir yaklaşımdır (Maier ve Dandy 2000). YSA modelinde çok sayıda değişkenin kullanılması, ağ büyüklüğünü artırmakta ve bu da işlem hızını azaltarak ağırlıkların etkin şekilde hesaplanması için daha fazla veriye ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı, tezde gerçekleştirilen maksimum güç noktası izleyicide, YSA yapısı için eğitime seti değişkenlerinin otomatik şekilde seçilebilmesi ve böylece giriş veri setinin optimizasyonu için GA kullanılarak, daha küçük boyutlu, etkin bir veri setinin elde edilmesi ve ağırlık genelleştirme performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

YSA'da çok katmanlı perseptron yapıda gizli düğüm sayılarının belirlenmesi önemli konulardan biridir. Yetersiz sayıda düğüm bulunması, öğrenmeyi engelleyebilirken çok sayıda düğüm, ağırlık genelleştirme yeteneğinin zayıflamasına yol açar. Bu nedenle optimum gizli düğüm sayısının bulunması amacıyla YSA mimarisinde GA'dan yararlanılmıştır. YSA'da eğitime verisinde aşırı öğrenme probleminin önlenmesi amacıyla, amaç fonksiyonu hesabı için GA'da doğrulama seti kullanılmış, ayrıca amaç fonksiyonuna bir ceza terimi eklenerek kompleks mimariler cezalandırılmış, böylece DSP'de programlanabilecek ideal büyüklükte bir mimarinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Üç fazlı inverterin tasarımında, MPPT işlemini yerine getirmesinin yanında fotovoltaiik panellerden sağlanan enerjinin nonlinear yükleri etkin şekilde beslemesi ve harmonik distorsiyonun uygun seviyede tutulmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, üç fazlı inverter UVM metodu ile kontrol edilmiştir. UVM metodunda, kompleks hesaplama gereksinimi anahtarlama frekansını sınırlandırmaktadır. Geleneksel tablo yöntemi bu değeri artırmaya yardımcı olsa da darbe genişliğinin sınırlanmaması için çok büyük yapıda tablolara ve hafızaya ihtiyaç duyulmaktadır (Akkaya ve Kulaksız 2006). Ayrıca tablo yöntemi kullanıldığında, lineer olmayan fonksiyonların interpolasyonunun kullanılması, işlem doğruluğunun azalmasına yol açarak PWM dalga şekillerinde harmoniklerin artmasına yol açmaktadır.

Bu dezavantajların giderilmesi amacıyla, YSA'nın yüksek hesaplama yeteneklerinden yararlanılabileceği Pinto ve ark. (2000) tarafından belirtilmiştir. Bu çalışmada, işlem doğruluğunun artırılması ve geleneksel tablo yöntemiyle gerçekleştirilen uygulamalara göre daha iyi sonuçlar elde edilmesi amacıyla YSA'dan faydalanılmıştır. Böylece YSA'da sadece eğitme verileri için değil, farklı anahtarlama frekanslarına karşılık gelen değerler için de doğru sonuçlar elde edilebileceği göz önüne alınarak, geleneksel metotlara göre daha yüksek anahtarlama frekanslarına çıkılması amaçlanmıştır.

1.3 Tezin Organizasyonu

Bu bölümde yapılan girişin ardından ikinci bölümde kaynak araştırması verilmiş, üçüncü bölümde ise fotovoltaiik sistemler, yapay sinir ağlarına genetik algoritmanın uygulanması ve üç fazlı inverterlerde kullanılan UVM metoduna ilişkin teorik esaslar açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, sistemin tasarımı ve gerçekleştirilmesi detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca sistem yazılımında yapay sinir ağları ve genetik algoritmaların uygulanması simülasyon sonuçları ile birlikte detaylı olarak verilmiştir. Beşinci bölümde, gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ve sistemden elde edilen deneysel sonuçlar verilmiş, çeşitli geleneksel algoritmalar ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Altıncı bölümde sonuçlar ve öneriler, tezin son bölümlerinde ise kaynaklar ve ekler verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, öncelikle geleneksel ve YSA tabanlı MPPT algoritmalarını içeren çalışmalar verilmiş, üç fazlı yüklere sahip PV sistemler ve bu sistemlerde yapay zeka uygulamalarını içeren çalışmaların verilmesinin ardından UVM inverterler hakkında literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir.

- **Geleneksel MPPT algoritmalarını içeren çalışmalar**

Literatürde sunulan bir çok PV güç sisteminde maksimum güç noktası izleme (MPPT) metodu kullanılmıştır. Bu kısımda geleneksel MPPT algoritmalarını içeren bazı önemli çalışmalar özet olarak verilmiştir.

Enslin ve Snyman (1991), geleneksel güneş paneli matematiksel modelini kullanan bir yöntem önermişlerdir. Bu yaklaşımda güneş paneli malzemesi ve üretim özellikleri hakkında detaylı bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bilgiler kullanıcılara hazır şekilde sunulmadığından, matematiksel modelden elde edilen sonuçlar tam olarak doğru olmamakta ve nümerik yoldan elde edilen maksimum güç noktaları gerçek değerlerinden farklı olabilmektedir.

Hua ve Shen (1998), pertürbasyon ve gözlem (P&O), iletkenlik farkı (IncCond) ve gerilim geri beslemesi tekniklerini kullanan farklı maksimum güç noktası izleyicilerini incelemişlerdir. Metotlar, DSP tabanlı bir dönüştürücü sisteminde gerçekleştirilmiştir. Sistem ayırık zaman kontrolü ve PI kompanzator içermektedir. P&O ve IncCond metotlarında güç noktası izleme verimi %80'in üzerinde, gerilim geri beslemesi yöntemi için yaklaşık %65 düzeyinde, MPPT içermeyen direkt metotta ise %30'un altında bulunmuştur.

Brambilla ve ark. (1999) tarafından önerilen ve daha sonra çok sayıda araştırmacı tarafından geliştirilen bir MPPT yöntemi olan iletkenlik farkı yönteminin hızlı değişen atmosferik şartlarda iyi performans verdiği belirtilmiştir. Ancak daha karmaşık bir algorithmaya sahip olması, bu yöntemin dezavantajıdır. Çalışmada, P&O algoritmasının genel olarak yavaş olduğu ve bazı durumlarda algorithma değişen ortam şartlarında maksimum güç noktasına yaklaşma yerine uzaklaşmalar olduğu belirtilmiştir. Bu durum Hussein (1995) tarafından da açık şekilde gösterilmiştir.

Ikegami ve ark. (2001), PV panellerin eşdeğer devre parametrelerinin bulunması ve PV sistemin optimal çalışmasına uygulanması hakkında bir metot sunmuşlardır. Eşdeğer parametreler, ölçüm değerleri kullanılarak eğri uydurma metoduyla hesaplanmıştır. Model parametreleri kullanılarak yeni bir MPPT yöntemi gösterilmiş, çalışmada diğer MPPT metotlarına göre karşılaştırmalar simülasyon ortamında yapılmıştır.

Kunlun ve ark. (2001), farklı ışık şiddeti ve sıcaklık şartları altında PV paneller ile su pompalama yükleri arasında uyum sağlamak amacıyla basit bir MPPT yöntemi sunmuşlardır. Sistem PV paneller, MPPT denetleyici ve bir motor-pompa yükünden oluşmaktadır. MPPT denetleyici; akım ve gerilim sensörleri, mikrodenetleyici birimi ve PWM kontrolünden oluşmuştur. Güç geri besleme kontrolü ile PV panel, maksimum güçte çalışacak şekilde kontrol edilmekte böylece pompalanan su miktarı mümkün olduğunca artırılmaktadır. Çalışmada güç kontrolü, gücün gerilime göre türevinin sıfır olduğu nokta sürekli taranarak yapılmaktadır.

Masoum ve ark. (2002), nümerik hesaplamalara dayalı olarak yapılan gerilim (V_{MPPT}) ve akım (I_{MPPT}) yaklaşımları olmak üzere PV sistemler için iki adet basit, hızlı ve güvenilir MPPT yöntemi incelemişlerdir. İzleyici, mikroişlemci ile kontrol edilmiş, gerilim ve akım ölçümleri on-line şekilde yapılarak V_{MPTT} ve I_{MPTT} algoritmaları gerçekleştirilmiştir. Yöntemin temel avantajı, referans PV panel kullanımını elimine ederek daha verimli, ucuz ve güvenilir bir PV sistemin oluşturulmasıdır.

Noguchi ve ark. (2002) tarafından önerilen bir MPPT yöntemi, PV panellerin çalışma akımının kısa devre akımı ile lineer bir orantıya sahip olduğu mantığına dayanmaktadır. PV panellerin açık devre gerilimini kullanan yöntem ise (Enslin ve ark. 1997) maksimum güç noktasındaki çalışma geriliminin açık devre gerilimi ile orantılı olarak değiştiği varsayımına dayanmaktadır.

Kulaksız ve Akkaya (2003), maksimum güç noktası izleyicili bir PV güç sisteminin mikrodenetleyici tabanlı kontrolünü sunmuşlardır. Sistemde güneş paneline gelen ışık miktarından maksimum seviyede faydalanmak amacıyla güneş izleyici sistem gerçekleştirilmiş, panellerden alınan enerji P&O algoritmasıyla çalışan maksimum güç noktası izleyici üzerinden akülerde depolanmıştır. DC

formdaki bu enerji, seçilmiş harmoniklerin elimine edildiği darbe genişlik modülasyonu (SHE-PWM) metoduyla kontrolü sağlanan bir gerilim beslemeli inverter ile AC forma dönüştürülmüştür.

Santos ve Antunes (2003), P&O algoritmasını kullanan gerçek zamanlı bir maksimum güç noktası izleyici gerçekleştirerek PV sistemin enerji dönüşüm veriminin artırılmasını hedeflemişlerdir. MPPT algoritması, PV panel gerilim ve akım bilgisi kullanılarak gerçekleştirilmiş ve gerilim yükseltici (boost) dönüştürücünün bağıl iletim süresi, darbe genişlik modülasyonu metoduyla kontrol edilmiştir. Yöntemin temel avantajları güneş paneli karakteristiklerinin bilinmesini gerektirmemesi ve referans PV panel kullanımına gerek olmamasıdır.

Heng ve ark. (2005), şebekeden bağımsız bir PV su pompalama sistemi için akü depolaması içermeyen yeni bir hibrid MPPT kontrol stratejisi önermişlerdir. Kontrol işlemi, iki adımda gerçekleştirilmekte; ilk adımda hızın artırılması ya da azaltılması belirlenmekte, sonraki adımda ise hız komutu için değişme miktarı seçilmektedir. Çalışmada, temel olarak MPPT stratejisi sabit gerilim yöntemiyle kontrol edilmekte, referans gerilim ise çok kriterli yeni bir metotla periyodik şekilde güncellenmektedir.

Salas ve ark. (2005), sadece PV akım değerini kullanarak herhangi bir sıcaklık ve ışık şiddeti seviyesinde PV paneller için MPPT işlemini yerine getiren bir algoritma önermişlerdir. Gerilim düşürücü (buck) tip dönüştürücü içeren 100W gücünde bir prototip sistem, mikrodenetleyici ile geliştirilmiş, sistemde yük olarak akü ve direnç kullanılmıştır. Sistemin benzer çalışmalara göre temel avantajı PV panellerle ilgili tek bir parametrenin ölçülmesinin yeterli olmasıdır.

Tariq ve Asghar (2006), mikrodenetleyici tabanlı bir maksimum güç noktası izleyici sunmuşlar, P&O ve maksimum güç noktası gerilimi (V_{MPP}) olmak üzere iki algoritma gerçekleştirmişlerdir. Özellikle hızlı değişen atmosferik şartlarda P&O algoritmasında önemli enerji kayıplarının olduğu, buna karşılık V_{MPP} algoritmasında maksimum güç noktası etrafında salınımlar oluşmadan daha hızlı bir izlemenin gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir. Bu yöntemde referans bir güneş pili kullanılarak açık devre gerilimi ölçülmüş, bu gerilimin belli bir yüzdesinin maksimum güç noktasına karşılık geldiği düşünülerek referans gerilim bulunmuştur.

- **YSA tabanlı MPPT algoritmalarını içeren çalışmalar**

YSA, kompleks problemlerin çözümü için alternatif sağlayan önemli bir yöntem olarak son yıllarda büyük ölçüde kabul görmektedir. Literatürde YSA tabanlı MPPT algoritmalarını kullanan çalışmalardan bazılarının özeti aşağıda verilmiştir.

Torres ve ark. (1998), şebeke bağlantılı bir PV sistemde maksimum güç noktasının izlenmesi için sinir ağı tabanlı bir denetleyici gerçekleştirmişlerdir. Denetleyici, sinir ağından sağlanan maksimum güç noktası bilgisini kullanarak DC-DC gerilim yükseltici dönüştürücü için kontrol sinyali üretmekte, böylece PV sistemin maksimum güç noktasının bulunduğu PV panel gerilimi değerinde çalışması sağlanmaktadır. Çalışmada sinir ağının giriş parametreleri, referans güneş panelinin açık devre gerilimi ve zamandır. PV sistemin elektrik hattına bağlanması için üç fazlı gerilim beslemeli bir inverter kullanılmıştır.

Amoudi ve Zhang (2000) güneş panellerinin modellenmesi ve maksimum güç noktalarının bulunması amacıyla sinir ağı tabanlı bir yaklaşım sunmuşlardır. Eğitilen ağı, PV panellerin I-V ve P-V karakteristiklerinin yeterli doğrulukla temsil edilmesini sağladığı ve geleneksel modelleme veya P&O yöntemine göre maksimum güç noktası etrafındaki salınımların azaltıldığı gösterilmiştir.

Veerachary ve Yadaiah (2000), PV panellerden beslenen serbest uyartımlı bir DC motorun optimal çalışma noktasının belirlenmesinde YSA'nın uygulanmasını sunmuşlardır. PV panellerin çıkışının motor yüküne uyumlandırılması amacıyla gerilim düşürücü ve yükseltici (buck-boost) güç dönüştürücüsü kullanılarak tümeşik sistemin optimum noktada çalıştırılması sağlanmaktadır. Çalışmada, sinir ağının giriş parametresi ışık şiddeti, çıkış parametresi ise güç elektroniği dönüştürücüsü için bağıl iletim süresi olarak alınmıştır.

Sun ve ark. (2002), bir DC-DC dönüştürücü ve tek fazlı iki yönlü PWM dönüştürücü içeren bir PV enerji sistemi sunmuşlardır. Çalışmada maksimum güç noktası izleme ve sistemin çalışmasının bu noktaya yakın olacak şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla akım kontrollü MPPT yöntemi kullanılmıştır. MPPT sisteminde, YSA'nın güvenilirlik ve farklı hava şartlarına karşı gösterdiği duyarlılık gibi avantajlarından faydalanılmıştır.

Veerachary ve ark. (2002), dual gerilim yükseltici tip (boost) dönüştürücü içeren bir PV sistemde sadece PV panel gerilim bilgisi kullanılarak geliştirilen akım sensörsüz MPPT yöntemini sunmuşlardır. Herhangi bir ışık şiddeti seviyesi için, MPP izleme algoritması PV panel gerilimini maksimum güç noktasına karşılık gelen değere ayarlamaktadır. Çevrim için gereken referans gerilim daha önceden eğitilen sinir ağından elde edilmiştir. Çalışmada PWM modülatör için gerçek zamanlı kontrol sinyali PI denetleyici tarafından üretilmekte ve dönüştürücü için bağıl iletim süresi ayarlanmaktadır.

Premrudeepreechacharn ve Patanapirom (2003), güneş panellerinin modellenmesi ve maksimum güç noktasının izlenmesi amacıyla iki farklı sinir ağını karşılaştırmışlardır. Geriye yayılma (BP) ve radyal temelli fonksiyon (RBF) sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen modeller, geleneksel modelden elde edilen simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada geriye yayılma metodunda eğitime sürecinin uzadığı, ancak eğitime için daha az veriye ihtiyaç duyulduğu gösterilmiştir. RBF sinir ağlarında modellemenin doğru şekilde gerçekleştirilmesi için daha fazla veriye ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir.

Bahgat ve ark. (2004), bir PV sistem için YSA kullanılarak gerçekleştirilen PC tabanlı bir maksimum güç noktası izleyici sunmuşlardır. Sistem, PV paneller, DC motoru besleyen bir MPPT ve fandan oluşmaktadır. Kontrol algoritmasında farklı çalışma şartları altında optimal çalışma noktasının bulunması amacıyla YSA'dan faydalanılmıştır. Veri izleme, kontrol algoritmasının çalıştırılması, veri depolama, görüntüleme ve analiz işlemleri bir PC ile gerçekleştirilmiştir.

Ocran ve ark. (2005), güneş enerjisiyle çalışan elektrikli araçlarda akü şarjını sağlamak için YSA tabanlı bir MPPT önermişlerdir. MPPT, yüksek verimli bir gerilim yükseltici (boost) tip dönüştürücüden oluşmuş, referans gerilim gradyan eğim momentum algoritmasını kullanan yapay sinir ağından elde edilmiştir. Algoritmada, herhangi bir ışık şiddeti, sıcaklık ve yük şartı için dönüştürücünün bağıl iletim süresi ayarlanarak MPPT işlemi yerine getirilmektedir.

Samangkool ve Premrudeepreechacharn (2005), şebeke bağlantılı PV sistemler için YSA kullanan bir MPPT yöntemi önermişlerdir. Sistem gerilim yükseltici (boost) dönüştürücü ve şebeke bağlantılı tek fazlı bir inverterden

oluşmaktadır. Maksimum güç noktası izleyici, gerilim yükseltici dönüştürücüde anahtarlama elemanını kontrol etmekte, tek fazlı inverterde ise sinüzoidal dalga formunda akım üretme amacıyla histerezis akım kontrolü kullanılmaktadır. Çalışmada, YSA'nın geleneksel sabit bağıl iletim süresinde çalışan metoda göre daha fazla güç sağladığı gösterilmiştir.

Zhang ve Bai (2005), RBF sinir ağlarının PV panellerin I-V karakteristiklerinin ve maksimum güç noktalarının modellenmesine uygulanabileceğini göstermişlerdir. Çalışmada PV panelin sadece giriş örnekleri kullanılarak RBF'lerin optimal sayısının bulunması amacıyla GA-tabanlı RBF sinir ağı eğitime metodu sunulmuştur. Işık şiddeti ve sıcaklık ölçümlerini içeren giriş verisi kullanılarak, optimal RBF sinir ağı yapısının bulunması amacıyla GA içeren kendiliğinden gelişen (self-growing) prosedür kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların, optimal güç noktası izleme amacıyla PV sistemlerin kontrolünde kullanılması için uygun olduğu belirtilmiştir.

- **Üç fazlı motorlara sahip PV sistemler hakkında yapılan çalışmalar**

DC motorların fırça ve komütatör bulundurmaları gibi bazı dezavantajlarından dolayı üç fazlı motorlara sahip PV sistemler gittikçe daha yaygın bir kullanım alanı bulmakta ve literatürde son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalar artış göstermektedir. Bunlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Yao ve ark. (1994), PV panellerden beslenen bir asenkron motor sürücü sistemi gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemde, ışık şiddeti nominal seviyenin dışına çıktığında motor veriminin düşmesini önlemek amacıyla inverterin PWM kontrol sinyallerinin frekansı, ışık şiddeti ve sıcaklık şartlarına bağlı olarak ayarlanmıştır. Böylece motor hızı, dolayısıyla da yüke aktarılan güç, inverter frekansı ile kontrol edilmiştir. Böylece kaynaktan sağlanan maksimum güç ile yükün gereksinim duyduğu güç arasındaki uyumsuzluk elimine edilmiştir. Önerilen yöntem, hız ölçümüne gerek duyulmaması ve sistem kararlılığında iyileştirme sağlanması avantajlarına sahiptir.

Muljadi ve Taylor (1996), kare dalga inverter kullanan bir maksimum güç noktası izleyici içeren PV su pompalama sistemi önermişlerdir. Sistem; PV paneller, değişken frekanslı inverter, asenkron motor ve su pompası içermektedir. PV

panellerin optimum güç çıkışının bulunması amacıyla inverter, su pompası çıkışını değiştirecek şekilde değişken frekansla çalıştırılmıştır. İnverter, sistemde hem değişken frekans kaynağı, hem de tepe gücü izleyici olarak çalıştırılmış, kare dalga çalışma moduyla anahtarlama kayıplarının azaltılması sağlanmıştır.

Akbaba (2003), PV panellerin I-V karakteristikleri için, geliştirilmiş Akbaba modelini kullanarak maksimum güç transferinin sağlanması amacıyla üç fazlı AC yüklerin PV panellere uyumlandırılmasını incelemiştir. Akbaba modelinin geliştirilmesi ile dünya üzerindeki belirli bir bölge için sadece ışık şiddeti yüzdesi olmak üzere tek bir giriş kullanılarak PV panel-yük sisteminin performansı ve maksimum güç hesabı yapılabilmektedir. Çalışmada maksimum güç transferi için dual DC-DC gerilim yükseltici dönüştürücü ve kare dalga inverter kullanılmıştır.

Arrouf ve Bouguechal (2003), PV enerji kaynağı, empedans uyumlandırıcı DC-DC dönüştürücü, aküler ve vektör kontrollü asenkron motor içeren bir PV sistemi incelemiştir. PV enerji kaynağı, klasik bir arama algoritması kullanılarak maksimum güç noktasında çalıştırılmaya zorlanmış, akü şarjı ile motor yükü arasında tüm ışık şiddeti şartları için uyum sağlanmıştır. Çalışmada MPPT işlemi, DC-DC dönüştürücüyle sağlanmakta, aküler ise histerezis kontrollü gerilim beslemeli inverterin çalışma gerilimini belirli sınırlarda tutmaktadır. Motoru besleyen inverterde “bang-bang” kontrol metodu kullanılmıştır.

• Üç fazlı motorlara sahip PV sistemlerde yapay zeka uygulamaları içeren çalışmalar

Mikrodenetleyici ve DSP’lerdeki gelişmeler ve fiyatlarındaki düşmelerin de etkisiyle üç fazlı motorlara sahip PV sistemlerde yapay zeka algoritmalarının avantajlarından faydalanılması da mümkün olmaya başlamıştır. Son yıllarda bu alanda literatürde yapılmış olan az sayıda çalışma mevcuttur.

Benlarbi ve ark. (2004), santrifüj pompasına kuplajlı bir asenkron motora sahip PV su pompalama sisteminin veriminin on-line bulanık optimizasyonunu sunmuşlardır. Önerilen yöntemde yük empedansının PV panellere uyumlandırılması, kısıyıcı sinyalinin bulanık mantık kullanılarak ayarlanmasıyla sağlanmaktadır. Çalışmada bulanık mantık prosedürünün benzer PV su pompalama sistemleri için standart bir optimizasyon algoritması olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Akkaya ve ark. (2007), maksimum güç noktası izleyiciye sahip bir PV sistemden beslenen fırçasız DC motor sürücüsü gerçekleştirmişlerdir. MPPT denetleyici, GA yardımcı çok-katlı perseptron sinir ağı yapısı içermekte ve gerilim yükseltici yapıda (boost) bir DC-DC dönüştürücü ile gerçekleştirilmektedir. GA kullanılarak sinir ağının eğitilmesiyle elde edilen sonuçların, standart gradyan eğimi algoritmaları ile elde edilenlerle karşılaştırıldığında daha iyi olduğu gösterilmiştir. PI hız kontrol çevrimi içeren motor denetleyiciye sahip fırçasız DC motor sürücü, PV sistemde yük olarak kullanılmıştır.

- **UVM inverterler hakkında yapılan çalışmalar**

PWM metotları içinde uzay vektör modülasyonu (UVM) metodu, çıkış geriliminde düşük harmonik içeriğe sahip olması ve geniş lineer çalışma bölgesi sağlaması gibi özellikleriyle son zamanlarda gittikçe daha çok kullanılmaktadır. Bu konuyla ilgili bazı önemli çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Van der Broeck ve ark. (1988), gerilim beslemeli PWM inverterler için anahtarlama anlarının bulunmasını, uzay vektör prensibini kullanarak gerçekleştirmiş ve sinüzoidal PWM metoduyla karşılaştırmışlardır. Çalışmada UVM metodunda sinüzoidal modülasyon metoduna göre daha yüksek modülasyon faktörüne ulaşılabildiği ve daha düşük akım harmoniklerine yol açtığı gösterilmiştir.

Akkaya (1995), minimum kayıplı süresiz modülasyonlu yeni bir UVM metodu geliştirmiştir. Geliştirilen UVM metodu, inverter anahtarlama kayıplarını azaltırken aynı zamanda yüksek kaliteli çıkış akımı meydana getirmekte ve düşük hızlı mikrodnetleyicilerle anında ve gerçek zamanda PWM darbe örneklerinin kolayca üretilmesi mümkün olmaktadır. Çalışmada, geliştirilen UVM metodunun teorisi açıklanmış ve pratik olarak gerçekleştirilmesi üzerinde durulmuştur. UVM metodunun PWM inverterlerde, özellikle de mikrodnetleyici kontrollü AC sürücü uygulamalarında başarı ile kullanılabileceği belirtilmiştir.

Gerilim beslemeli inverterde YSA tabanlı UVM metodu ilk olarak *Bakhshai ve ark. (1996)* tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sadece lineer modülasyon bölgesi ele alınmış ve inverter anahtarlama durumlarının ve referans gerilime karşılık gelen gerilim genliklerinin belirlenmesi için rekabetçi (competitive) sinir ağının

kullanımı önerilmiştir. Çalışmada, klasik metotlara göre daha az hesaplama süresinde, daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir.

Tzou ve Hsu (1997), UVM metodu için yeni bir devre sunmuşlardır. UVM kontrol entegre devresi, alan programlanabilir kapı dizisi (FPGA) teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Böylece, hızlı prototip oluşturma, yüksek anahtarlama frekansı elde edilmesi ve hesaplama yükünün mikroişlemciden alınabilmesi gibi avantajlara sahip olunmuştur.

Pinto ve ark. (2000), gerilim beslemeli inverterde UVM metodunun YSA ile gerçekleştirilmesini önermişlerdir. Çalışmada, UVM metodunda işlemin kompleks olmasından ve fazlaca hesaplama gerektirmesinden dolayı anahtarlama frekansının sınırlandığı, bu sebeple öğrenme ve interpolasyon yetenekleri ile yüksek doğrulukta çıkış verebilmeleri gibi özellikleri sebebiyle YSA'dan faydalanılabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca sinir ağlarının, özellikle modülatörde ASIC (application specific integrated circuit) kullanıldığında UVM algoritmasını çok hızlı şekilde gerçekleştirebilme avantajına sahip olduğu belirtilmiştir.

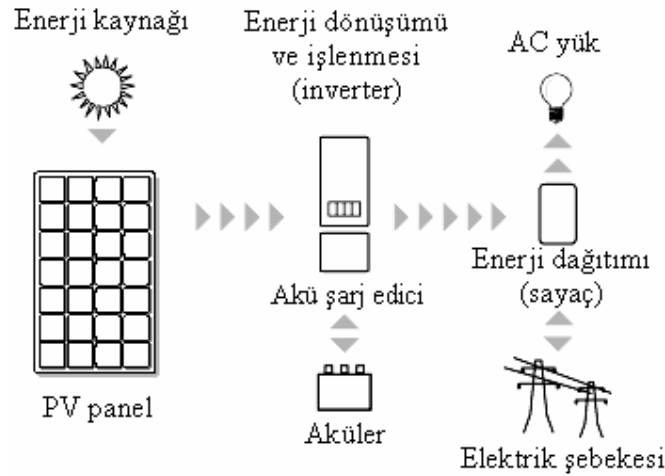
Dzung ve ark. (2005), gerilim beslemeli bir inverter için YSA tabanlı UVM denetleyici önermişlerdir. YSA tabanlı denetleyici, UVM algoritmasının çok hızlı gerçekleştirilebilmesi, böylece de güç dönüştürücüdeki güç anahtarlama elemanlarının anahtarlama frekanslarının artırılabilmesi avantajına sahiptir. YSA tabanlı UVM algoritmasının V/f kontrol tekniğiyle kullanılabileceği, denetleyicinin gelecekte ASIC entegreleri ile pratik olarak gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir.

Akkaya ve Kulaksız (2006), GA yardımcı sinir ağı tabanlı olarak gerçekleştirilen UVM metodunun gerçekleştirilmesini sunmuşlardır. Çalışmada, sinir ağı yapısı tek faz çıkışı için anahtarlama bilgisini vermekte; diğer fazlar basit bir faz kaydırma işlemiyle bulunmaktadır. Sinir ağında gizli katmandaki düğüm sayıları klasik deneme yanılma yöntemi yerine GA yardımıyla bulunmaktadır. Gerçekleştirilen metotla, sinüzoidal metoda göre daha yüksek çıkış gerilimi, daha düşük anahtarlama kayıpları ve daha düşük toplam harmonik distorsiyon elde edilmiştir.

3. TEORİK ESASLAR

3.1 Fotovoltaik Güç Sistemleri

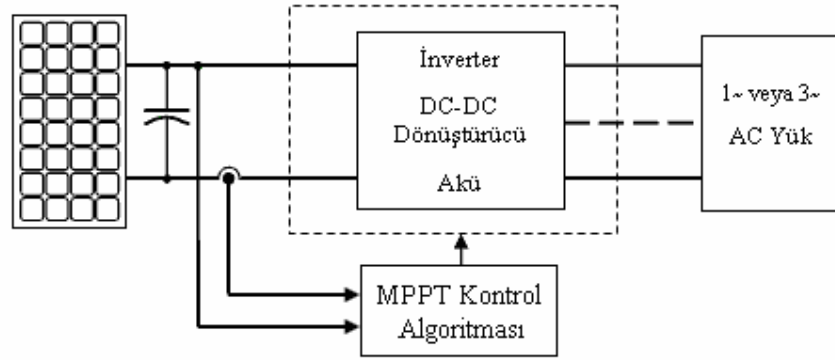
Fotovoltaik (PV) hücrelerden sağlanan elektrik enerjisi, küçük tüketici ürünlerinden, şebekeyi besleyen büyük güç istasyonlarına kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır. Fotovoltaik hücrenin akım-gerilim karakteristiklerinin değişken olmasından dolayı bu sistemlerde güç elektroniği devrelerinin önemli bir yeri vardır. PV sistemlerde kullanılan güç elektroniği devreleri, uygulamaya ve PV panellerden üretilen elektriğin kullanım amacına göre farklılıklar gösterir. Şekil 3.1’de verilen genel bir fotovoltaik sistem yapısından görüldüğü gibi sistemde PV panel, enerji depolama birimi olarak aküler, akü şarj edici ve kontrol birimi, inverter ve belirli amaca yönelik elektrik yükleri bulunabilir. Uygulamada fotovoltaik sistemde hangi bileşenlerin bulunması gerektiğini fonksiyonel ve işlemsel gereksinimler belirler.



Şekil 3.1 Genel bir PV güç sistemi yapısı

PV sistemler temel olarak şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız sistemler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Şebeke bağlantılı PV sistemler elektrik şebekesiyle paralel çalışacak şekilde tasarlanırlar. Sistemin temel bileşeni olan inverter, PV panellerin ürettiği DC gücün şebeke tarafından istenen gerilim ve güç kalitesi değerlerine uygun şekilde AC güce dönüştürülmesinde kullanılır. Şebekeden bağımsız PV sistemler, elektrik şebekesinden bağımsız çalışacak şekilde tasarlanırlar ve önceden belirlenen DC ve/veya AC elektrik yüklerini beslemeye

uygun şekilde boyutlandırılırlar. Bu çalışmanın da temel yapısını oluşturan AC yükleri besleyen şebekeden bağımsız bir PV güç sistemi blok şeması Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi güç dönüşümü, tek veya çift kademede yapılabilmektedir. Tek kademeli dönüşümde, doğrudan güneş panellerinin çıkışına, çift kademeli dönüşümde ise DC-DC dönüştürücü çıkışına bağlanan inverter ile panellerden sağlanan DC gerilim, AC yükleri ve motorları beslemek üzere AC gerilime dönüştürülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi dönüştürme işlemi, maksimum güç noktası izleyici (MPPT) algoritmasına uygun şekilde yapılır. Gerektiğinde fazla enerji bir akü biriminde depolanır.



Şekil 3.2 AC yükleri besleyen şebekeden bağımsız bir PV güç sistemi yapısı

3.1.1 Fotovoltaik enerji

Fotovoltaik enerji; güvenilir olması, hareketli parçalar içermemesi, çalışma ve bakım maliyetlerinin çok düşük olması ve atmosferik kirliliğe yol açmaması gibi avantajları sebebiyle yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutmaktadır. Buna karşılık fotovoltaik enerji, çeşitli dezavantajlara da sahiptir. İlk olarak, güneş ışığının süreksizliği ve elektrik enerjisinin depolanması için ucuz ve verimli metotların bulunmaması, ayrıca pek çok uygulamada güneş enerjisi ve elektriksel talep arasında iyi bir uyum olmaması, fotovoltaik enerjinin önündeki engellerdendir. Şebekeden bağımsız küçük boyutlu uygulamalarda fotovoltaik enerjinin akülerde depolanması, pratikte uygulanabilir en önemli depolama seçeneğidir. Bunun yanında, fotovoltaik enerjinin şu andaki en büyük dezavantajı, PV panellerin üretim maliyetlerinin yüksek oluşudur. Ancak fotovoltaik enerji kullanımının yaygınlaşması ve çeşitli hükümet politikaları (vergi destekleri,

indirimler vs.) ile desteklenmesi ekonomik olarak gittikçe daha etkin hale gelmelerini sağlamaktadır. Özellikle 2005 yılında T.B.M.M.’de kabul edilen “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” ile yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemizdeki kullanımının yaygınlaşmasına katkı sağlanması beklenmektedir.

3.1.1.1 Fotovoltaik teknolojinin gelişimi

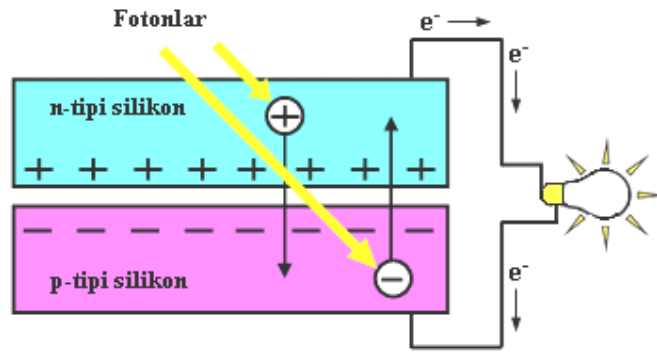
Fotovoltaik olayının tam olarak anlaşılması 19. yüzyılın başlarında kuantum teorisindeki gelişmelerle sağlanmıştır. 1839 yılında Alexandre Becquerel, ışık etkisiyle meydana gelen belirli kimyasal reaksiyonlar vasıtasıyla ortaya çıkan elektrik akımlarını gözlemiştir. 1873 yılında Smith’in katı selenyumda fotoiletkenliği gözlemlemesini, 1877 yılında Adams ve Day tarafından saf katı hal elemanda fotovoltaik etkinin keşfi takip etmiştir. Işık enerjisinin elektrik enerjisine direkt dönüşümünün sağlandığı fotovoltaik eleman uygulaması, Fritts tarafından 1883 yılında gerçekleştirilen ışık-ölçer cihazıdır. Selenyum güneş pillerine dayanan fotometreler, Almanya’da 1930’lu yıllarda ticarileşmiştir ve halen kullanılmaktadır (Archer ve Hill 2001).

Modern fotovoltaik hücre teknolojisini ilk olarak, 1941 yılında Russell Ohl geliştirmiş ve bu keşfi %6 verime sahip silikon fotovoltaik hücrelerin duyurulması takip etmiştir (Chapin ve ark. 1954). Modern fotovoltaik hücrelerin uygulama alanı bulması ilk olarak 1958 yılında güneşten elektrik enerjisi sağlayan ilk uydu olan Vanguard 1 uydusuyla gerçekleşmiştir. Uzay uygulamalarında kullanılmasının yaygınlaşmasıyla ve böylece teknolojinin yeterli olgunluğa erişmesiyle birlikte fotovoltaik enerji, şebekeden uzak yerlerde ve şebeke hattını beslemek amacıyla geniş bir alanda kullanılmaktadır.

1980’li yılların başında %16’lık fotovoltaik panel verimine ulaşılmasının ardından, 1994 yılında %30’luk verim bariyeri aşılmış, bu durum uzay endüstrisinin dikkatini çekmiştir. Günümüzde bir çok uyduda çok eklemli güneş hücresi yapısına sahip bu verim seviyelerindeki paneller kullanılmaktadır. Endüstri ortalaması olarak %12-18 arasındaki verimlerde çalışan fotovoltaik paneller üretilmekle birlikte, 2006 yılı Aralık ayında laboratuvar ortamında şu an için rekor seviye olan %40.7’lik verime ulaşıldığı duyurulmuştur (Spectrolab 2006).

3.1.1.2 p-n tek eklemli hücre

Fotovoltaik paneller, genellikle birkaç santimetrekare boyutunda yarı iletken hücrelerden meydana gelir. Hücrenin katı hal yapısı, temel olarak eklem bölgesi üst yüzeye yakın bulunan geniş alanlı bir p-n diyotudur. Şekil 3.3'te görülen temel yapıda güneş ışığı, PV hücrede doğrudan DC akıma dönüştürülür. Çok sayıda hücre, gerekli gücün üretilmesi amacıyla birbirine eklenerek panel yapısı oluşturulur.

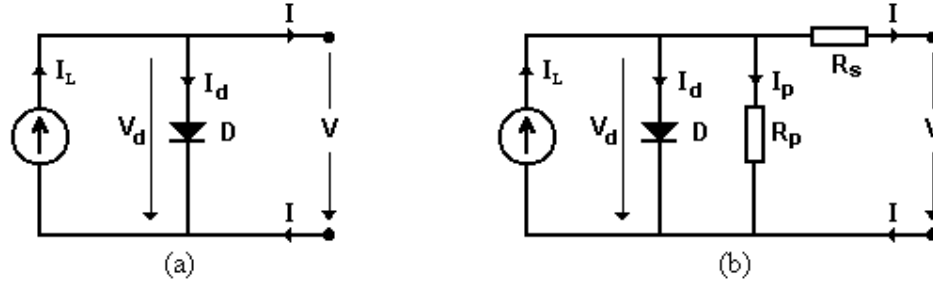


Şekil 3.3 Fotovoltaik hücrenin temel çalışması

Tüm fotovoltaik hücreler benzer şekilde çalışır. n-tipi silikon ile p-tipi silikon malzeme birleştirildiğinde eklem bölgesinde elektrik alan oluşumu ortaya çıkar. Elektrik alan, diyot davranışı göstererek elektronların p-tipi silikon malzemeden n-tipi silikon malzemeye geçişine yol açarken, ters yönde geçişi engeller. Yeterli enerji seviyesine sahip ışık, eklem tarafından emildiğinde, emilen fotonların enerjisi, malzemedeki elektron sistemine transfer edilir ve hareketli elektronlar ve delikler oluşur. Bunlar eklem bölgesinde bir potansiyel fark meydana getirip elektrik alan altında hızlanarak dış devre boyunca akım akışı sağlarlar.

3.1.1.3 Eşdeğer devre

Bir fotovoltaik hücrenin elektronik davranışının anlaşılabilmesi için, davranışları iyi bilinen ayrık elektriksel bileşenler kullanılarak elektriksel eşdeğer devresinin elde edilmesi gerekir. İdeal bir fotovoltaik hücre, Şekil 3.4(a)'da görüldüğü gibi bir diyot ve paralel bir akım kaynağı kullanılarak modellenilebilir. Akım kaynağı, ışık şiddeti (G) ile direkt orantılı olan fotovoltaik akım I_L 'yi meydana getirir. Şekildeki diyot, fotovoltaik hücrenin p-n geçiş bölgesini temsil etmektedir.



Şekil 3.4 Fotovoltaik hücrenin (a) basitleştirilmiş (b) tek diyotlu eşdeğer devresi

Basitleştirilmiş eşdeğer devreden PV hücrenin akım denklemi, Kirchhoff'un akım kanunundan aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I = I_L - I_d \quad (3.1)$$

Burada I fotovoltaik hücre akımı, I_L fotovoltaik akım, I_d diyot akımıdır.

Fotovoltaik hücre pratikte ideal olmadığı için, basitleştirilmiş eşdeğer devre elektriksel olarak optimal bir gösterimi vermemektedir. Gerçek fotovoltaik hücrede, harici kontaklar üzerinde gerilim düşümü gözlenir. Buradaki gerilim düşümü seri bir R_s direnci ile ifade edilebilir. Ayrıca, pratikte gözlenen sızıntı akımını ifade etmek amacıyla paralel bir R_p direnci de kullanılır. Böylece fotovoltaik hücre Şekil 3.4(b)'deki eşdeğer devre ile modellenenebilir (Akkaya ve Kulaksız 2004).

Eşdeğer devrede görülen temel akımlar;

- *Fotovoltaik akım I_L* : Fotovoltaik hücre üzerine düşen ışık şiddeti ile doğru orantılıdır.
- *Diyot akımı I_d* : Gerilime ve ters doyma akımı I_{sat} 'a bağlıdır ve denklem (3.2) ile ifade edilir.

$$I_d = I_{sat} \left[\exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

Burada I_{sat} diyot ters doyma akımı, q elektronun elektrik yükü, V_d diyot üzerinde düşen gerilim, n diyot emisyon faktörü, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

- *Paralel kol akımı I_p* : Paralel kol direncinde, eklem geriliminin etkisi ile ortaya çıkan ve denklem (3.3) ile ifade edilen akımdır. Paralel kol direnci R_p ,

n ve p eklemleri boyunca akan akımdan dolayı ortaya çıkan güç kaybını belirler.

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} \quad (3.3)$$

- *PV hücre çıkış akımı I:*

$$I = I_L - I_d - I_p \quad (3.4)$$

Yarı iletkenin direnci, ışık geçirmeyen (opak) elektrot direnci ve bağlantı noktalarındaki dirençlerin oluşturduğu seri direnç R_s , denklem (3.5) ile gösterilen gerilim düşümüne sebep olur.

$$IR_s = V_d - V \quad (3.5)$$

(3.2)-(3.3) ve (3.5) denklemleri (3.4)'te yerine konulursa, tek bir hücre için (3.6) denklemi ile verilen genel bir matematiksel model elde edilir.

$$I = I_L - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3.6)$$

Paralel direnç R_p , çok büyük olduğu için genellikle sonsuz kabul edilir. Hücre sıcaklığı, ışık şiddeti, ortam sıcaklığı ve rüzgar hızı gibi çevre şartlarından etkilenir. Bu faktörlerin tamamı fotovoltaiik hücredeki ısı transferine etki eder. Kelvin cinsinden hücre sıcaklığı, aşağıdaki denklem kullanılarak elde edilebilir (Premrudeepreechacharn ve Patanapirom 2003).

$$T = 3.12 + 0.25G + 0.899T_a - 1.3w_s + 273 \quad (3.7)$$

burada G ışık şiddeti (W/m^2), w_s rüzgar hızı (m/s), T_a ise ortam sıcaklığını (K) göstermektedir. Sıcaklığın ters doyma akımına etkisi, (3.8) denklemi ile verilir.

$$I_{sat} = I_{sat,ref} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left(\frac{qE_G}{nk} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \right) \quad (3.8)$$

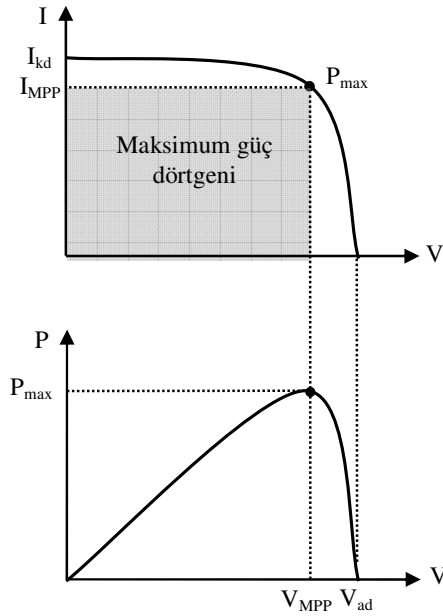
Burada $I_{sat,ref}$ referans sıcaklıktaki diyot ters doyma akımı, T_{ref} referans sıcaklık (298°K), E_G yarı iletken hücrenin band enerjisidir. Fotovoltaiik akım, ışık şiddeti ve fotovoltaiik hücre sıcaklığının bir fonksiyonudur ve (3.9) ile verilebilir.

$$I_L = \left[I_{L,ref} + k_i (T - T_{ref}) \right] \frac{G}{G_{ref}} \quad (3.9)$$

burada k_i , PV hücre kısa devre akımının sıcaklık katsayısı ($A/^{\circ}C$), $I_{L,ref}$ referans sıcaklıktaki fotovoltaiik akım, G_{ref} referans sıcaklıktaki ışık şiddetidir.

3.1.1.4 Fotovoltaiik hücrenin akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri

Bir fotovoltaiik hücrenin, Şekil 3.5'te görüldüğü gibi karakteristik akım-gerilim eğrisinde yüke bağlı olarak herhangi bir noktada çalıştırılması mümkündür. Eğrideki iki önemli nokta, fotovoltaiik hücrenin elektriksel performansını belirlemekte de kullanılan iki parametre olan açık devre gerilimi V_{ad} ve kısa devre akımı I_{kd} 'dir. Kısa devre akımı, çıkış uçları kısa devre edilerek ve tam aydınlatma altında uç akımı ölçülerek belirlenir. Düşük seviyedeki diyot akımı ile toprağa doğru olan sızıntı akımı, sıfır uç gerilimi altında ihmal edildiğinde ölçülen kısa devre akımı, I_L fotovoltaiik akımını verir. Kısa devre akımı (I_{kd}), aydınlatma seviyesi ile orantılı iken, açık devre gerilimi (V_{ad}), aydınlatma seviyesinin logaritması ile doğru orantılıdır. Maksimum hücre gerilimi ise, açık devre gerilimi durumunda elde edilir. Kısa devre ve açık devre şartlarında güç sıfırdır.



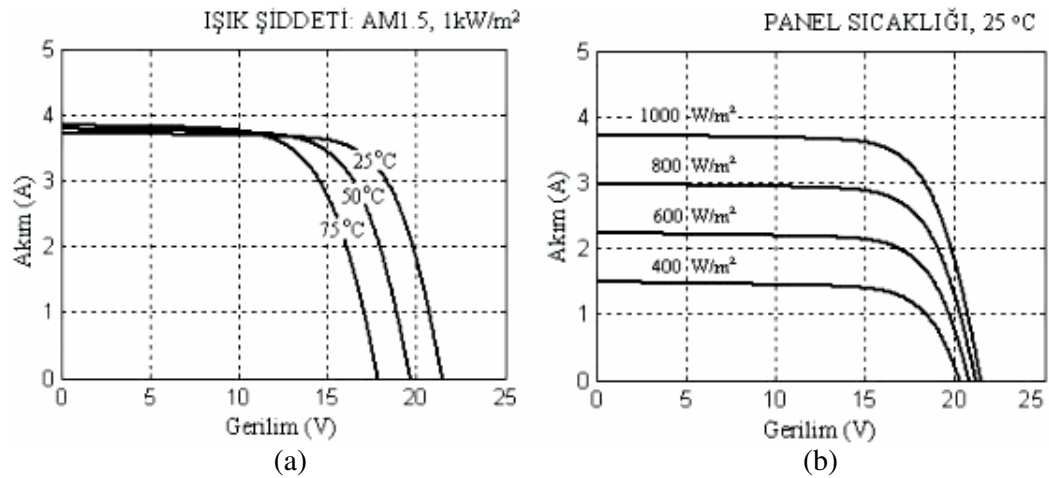
Şekil 3.5 İdeal bir fotovoltaiik hücrenin I-V ve P-V karakteristikleri

Fotovoltaik hücre, maksimum gerilim noktası V_{MPP} ve maksimum akım noktasında I_{MPP} maksimum güç üretir. Şekil 3.5'te görülen taralı alanın ($I_{MPP} \times V_{MPP}$) maksimuma ulaştığı durumda maksimum güç şartı oluşur. Şekildeki maksimum güç dörtgeni, maksimum güç noktasında üretilen güce eşittir. Doluluk faktörü η_d , I-V eğrisinin karesel olmasıyla alakalı bir ölçüttür ve (3.10) denklemi ile gösterilir.

$$\eta_d = \frac{I_{MPP} V_{MPP}}{I_{kd} V_{ad}} \quad (3.10)$$

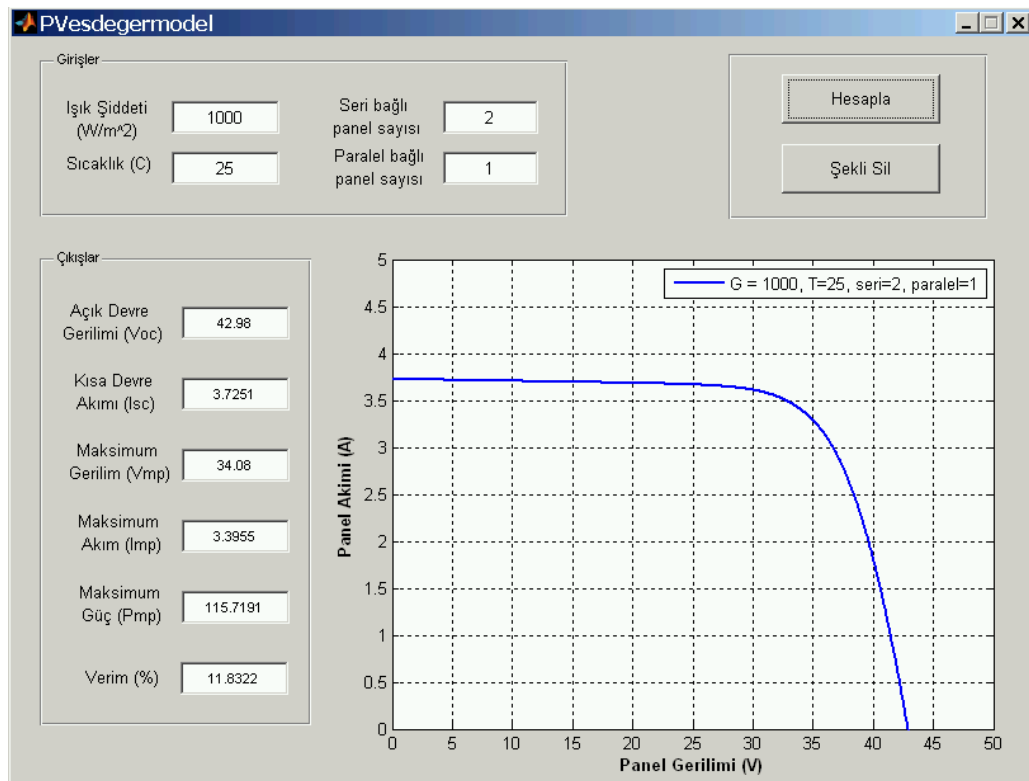
3.1.1.5 Sıcaklık ve ışık şiddeti etkisi

Pratikte fotovoltaik hücreler, standart şartlarda çalışmaz. Göz önünde bulundurulması gereken en önemli iki etki, sıcaklık ve ışık şiddetinin değişim etkileridir. Şekil 3.6(a)'da sıcaklığın fotovoltaik hücre karakteristiğine olan etkisini gösteren değişimler verilmiştir. Şekilden, özellikle gerilimin sıcaklık katsayısının negatif olduğu ve sıcaklıkla belirgin bir değişime uğradığı görülmektedir. Akım ve doluluk faktöründeki sıcaklık etkisi daha azdır. Farklı ışık şiddeti seviyeleri için fotovoltaik hücre karakteristikleri Şekil 3.6(b)'de görülmektedir. Fotovoltaik akımın büyüklüğü, tam aydınlatma altında maksimumdur. Az güneşli bir günde fotovoltaik akım, ışık şiddeti ile doğru orantılı olarak azalır. I-V karakteristiği, şekilde de görüldüğü gibi düşük ışık şiddetinde azalan eğilimdedir. Bulutlu bir günde kısa devre akımı büyük ölçüde azalırken açık devre gerilimindeki azalma daha düşüktür.



Şekil 3.6 Fotovoltaik hücredeki I-V karakteristiğinin (a) sıcaklığa (b) ışık şiddetine bağlılığı

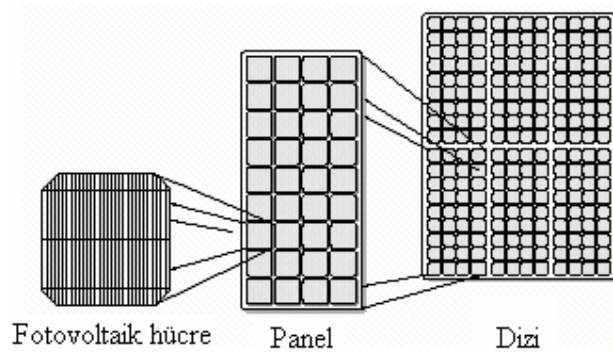
Tezde kullanılan KC60 model fotovoltaiik panellerin modellenmesi önceki kısımlarda verilen teoriye uygun olarak yapılmış ve gerçekleştirilen simülasyonlarda bu model kullanılmıştır. PV panellerin simülasyonunun gerçekleştirilmesi amacıyla, Şekil 3.7’de verilen MATLAB tabanlı bir grafik kullanıcı arayüzü tasarlanmıştır. Şekilde verilen kullanıcı ara yüzünde, istenen sıcaklık ve ışık şiddeti değerleri için fotovoltaiik panellerin açık devre gerilimi, kısa devre akımı, maksimum gerilim ve maksimum akım noktalarındaki değerler, maksimum güç ve verim değerleri hesaplanarak ekranda gösterilmektedir. Ayrıca fotovoltaiik panellerin I-V karakteristik eğrisi de çizdirilerek farklı ortam şartlarında davranışları gözlemlenebilmektedir. Arayüz üzerinde, sistemde kullanılan seri ve paralel bağlı fotovoltaiik panel adedine göre seçim yapma imkanı da sağlanmıştır. Gerçekleştirilen grafik kullanıcı arayüz için program kodları Ek I-1’de verilmiştir.



Şekil 3.7 KC60 model fotovoltaiik panellerin davranışlarının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen grafik kullanıcı arayüz

3.1.1.6 Fotovoltaik paneller ve diziler

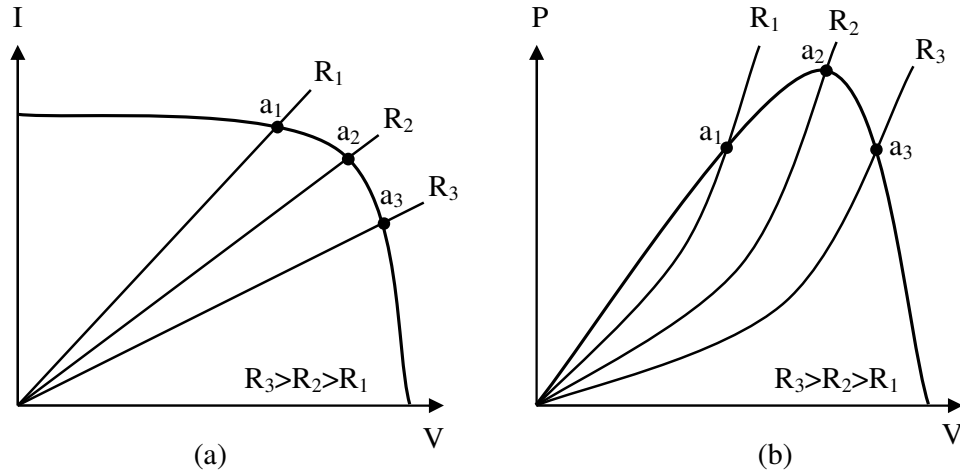
Belirli bir uygulama için gereken güç, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi fotovoltaik hücreler seri ve paralel bağlanarak uygun akım ve gerilim seviyelerinin elde edilmesiyle karşılanır. Ayrıca fotovoltaik hücreler, çevre şartlarından, özellikle de nemden etkilenmemeleri için korunmalıdırlar. Böylece, elektriksel bağlantısı yapılan ve çevre şartlarından korunan bu birim, fotovoltaik panel olarak adlandırılır. Tipik bir panel 36 adet seri bağlı hücre içerir. PV paneller 12 Voltluk kurşun-asit akülerin şarjı için yeterli gerilimi sağlayabilirler ve bu çalışmada olduğu gibi akü içermeyen sistemlerde de yaygın şekilde kullanılırlar. PV paneller, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi tek başına kullanılabilecekleri gibi daha yüksek güçler için devre içerisinde seri ve paralel bağlanarak fotovoltaik dizileri meydana getirirler.



Şekil 3.8 Fotovoltaik hücrelerin paneller ve dizileri oluşturması

3.1.1.7 Elektriksel yük uyumu ve maksimum güç noktası izleyici

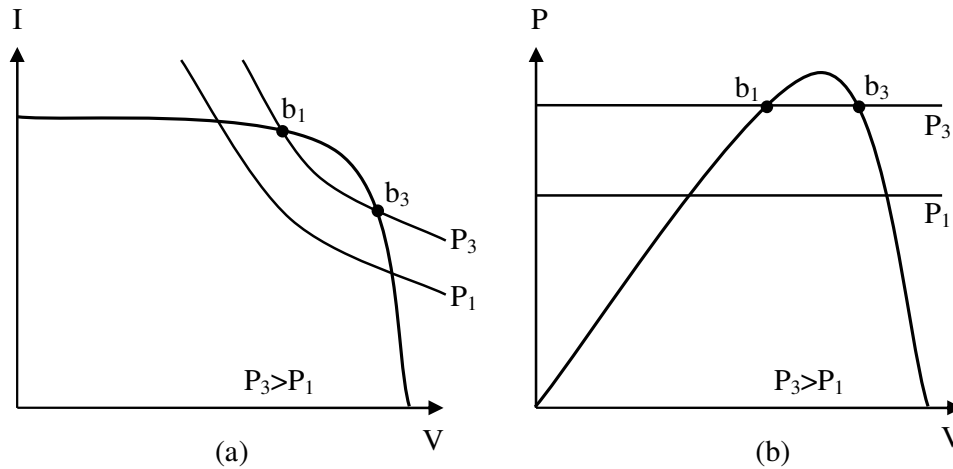
Güç sistemlerinin çalışma noktası, kaynak eğrisi ile yük çizgisinin kesiştiği noktadır. Eğer Şekil 3.9(a)’daki I-V karakteristiğine sahip bir PV kaynağı, R_1 direncini besliyorsa a_1 noktasında, R_2 veya R_3 dirençlerini besliyorsa sırasıyla a_2 ve a_3 noktalarında çalışacaktır. Şekil 3.9(b)’de görüldüğü gibi yük direncinin R_2 olduğu durumda panelden maksimum güç alınır. Kaynakla olan yük uyumu, PV panelden maksimum güç alınması için her zaman gereklidir (Markvart 2000).



Şekil 3.9 Omik yük için çalışma kararlılığı ve elektriksel yük uyumu için (a) I-V karakteristiği ve yük doğruları (b) P-V karakteristiği ve yük eğrileri

Sabit güçteki yüklerle çalışma, Şekil 3.10(a) ve (b)'de görülmektedir. Sabit P_3 gücünde yük çizgisi, kaynak çizgisi ile b_1 ve b_3 olarak belirlenen iki noktada kesişmektedir. Bu noktadan sapma oluşturacak herhangi bir bozucu etki, gücün tekrar b_3 noktasında çalışılması için geri yüklenmesini sağlayacağından sadece b_3 noktası kararlıdır. Bu yüzden sistem b_3 noktasında çalışır. Fotovoltaik panelin elektriksel çalışma kararlılığı için gerekli şart şu şekildedir;

$$\left[\frac{dp}{dv} \right]_{\text{yük}} > \left[\frac{dp}{dv} \right]_{\text{kaynak}} \quad (3.11)$$



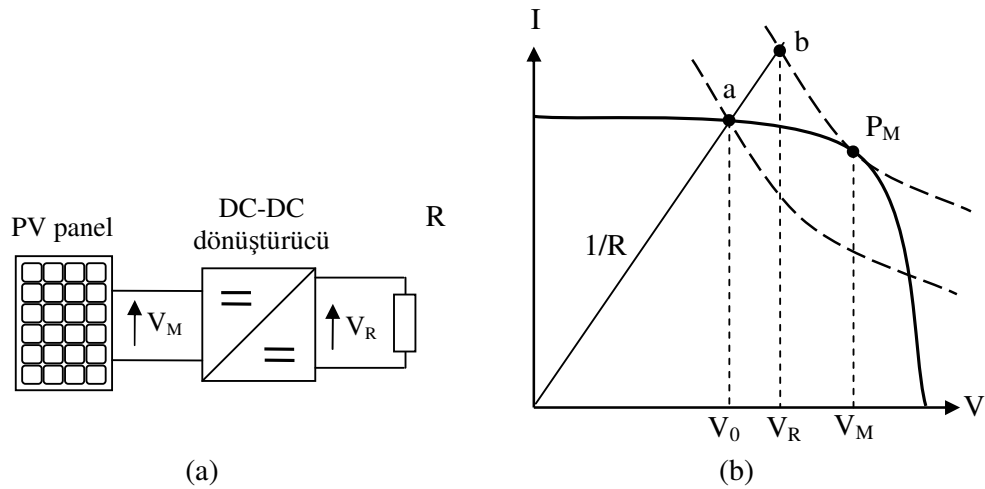
Şekil 3.10 Sabit güçteki yük için çalışma kararlılığı ve elektriksel yük uyumu

Isıtıcılar gibi bazı yükler, sabit dirence sahiptir ve güç, gerilimin karesiyle orantılı olarak değişir. Diğer yandan asenkron motorlar gibi bazı yükler, sabit güç yükleri olarak davranır ve daha düşük gerilimde daha yüksek akım çekerler. Karma yüklere sahip çoğu büyük sistemde güç, gerilimle yaklaşık lineer şekilde değişir.

Güneş izleyicilerin, PV paneli mekaniksel olarak güneşi izleyecek şekilde hareket ettirmesi, panelden maksimum güç alınmasını garanti etmez. Bu şart için PV panelin, verilen çalışma şartları altında maksimum güç noktasına (MPP) karşılık gelen belirli bir seviyede çalıştırılması gerekir. PV panellerden yüke sürekli olarak maksimum enerji transferinin sağlanması, maksimum güç noktası izleyiciler (MPPT) ile mümkündür. Şekil 3.11(a)'da DC-DC dönüştürücü ile gerçekleştirilen temel bir MPPT yapısı verilmiştir. Burada, PV panelin omik yükü beslediği durum için, bir DC-DC dönüştürücü yardımıyla yük gerilimi, (3.12) denklemine göre ayarlanarak maksimum güç transferi sağlanır (Markvart 2000).

$$V_R = \sqrt{P_{\max} R} \quad (3.12)$$

Şekil 3.11(b)'de verilen PV panel ve yük I-V karakteristikleri ve sabit güç eğrilerinden görüldüğü gibi, panelin yüke direkt bağlı olduğu durumdaki kesişme noktasında güç (a noktası), maksimum değerinden daha düşükken, DC-DC dönüştürücü ile yük geriliminin (3.12) denklemindeki değere ayarlanması durumunda çalışma noktası maksimum güç noktasına (b noktası) kaymaktadır.



Şekil 3.11 (a) Temel bir MPPT yapısı, (b) MPPT'nin çalışması

3.1.2 MPPT algoritmaları

PV panellerden çekilen gücün; ışık şiddeti, sıcaklık gibi çalışma şartlarından bağımsız olarak maksimum yapılabilmesi için uygun bir kontrol algoritmasının gerçekleştirilmesi gerekir. Yüke sağlanan gücün maksimum yapılması amacıyla PV panellerden çekilen akım veya PV panel uçlarındaki gerilim, maksimum güç noktası civarında sabit tutulur. Bunun için, DC-DC dönüştürücü ve/veya inverter gibi güç elektroniği dönüştürücüleri MPPT algoritmaları ile kontrol edilmelidir.

Literatürde gerçekleştirilen MPPT yöntemleri, on-line ve off-line yöntemler olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. On-line yöntemler genel olarak; PV panellerden sağlanan gücün hesaplanması, önceki güç değeriyle karşılaştırılması ve gerçek maksimum güç noktasına doğru referans sinyalin ayarlanması şeklinde gerçekleştirilir. Referans sinyal, güç elektroniği dönüştürücüsü kullanılıyor ise anahtarlama elemanı için iletim süresi, inverter kullanılıyor ise frekans ve modülasyon faktörü olabilir. Off-line yöntemler ise PV paneller hakkında önceden detaylı bir bilgiye sahip olunması ve ışık şiddeti, PV panel sıcaklığı, PV panellerin kısa devre akımı veya açık devre gerilimi gibi parametrelerin ölçülmesini gerektirir.

Tezde geliştirilen MPPT algoritmasının karşılaştırılabilmesi amacıyla literatürde sunulan algoritmalarından yaygın olarak kullanılanlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

- Pertürbasyon ve gözlem (P&O) algoritması,
- İletkenlik farkı (Incremental Conductance, IncCond) algoritması,

on-line olarak gerçekleştirilen yöntemlerdir.

- Sabit gerilim yöntemi,
- Sabit akım yöntemi,

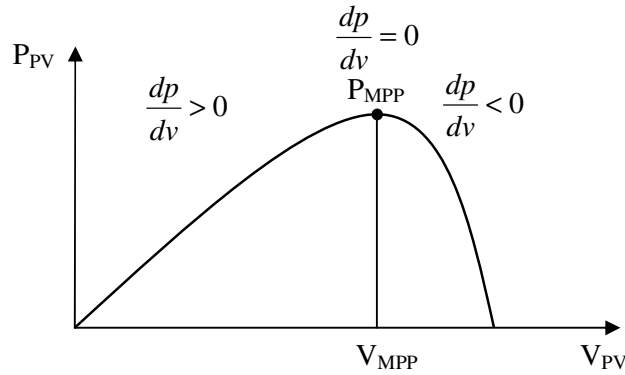
off-line olarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- **P&O algoritması**

Kullanılan en yaygın MPPT algoritmalarından biri olan P&O algoritması, PV panellerin çalışma noktasının değiştirilmesi sonucunda meydana gelecek olan değişimin gözlenmesi ve böylece maksimum güç noktasına doğru sonraki değişimin

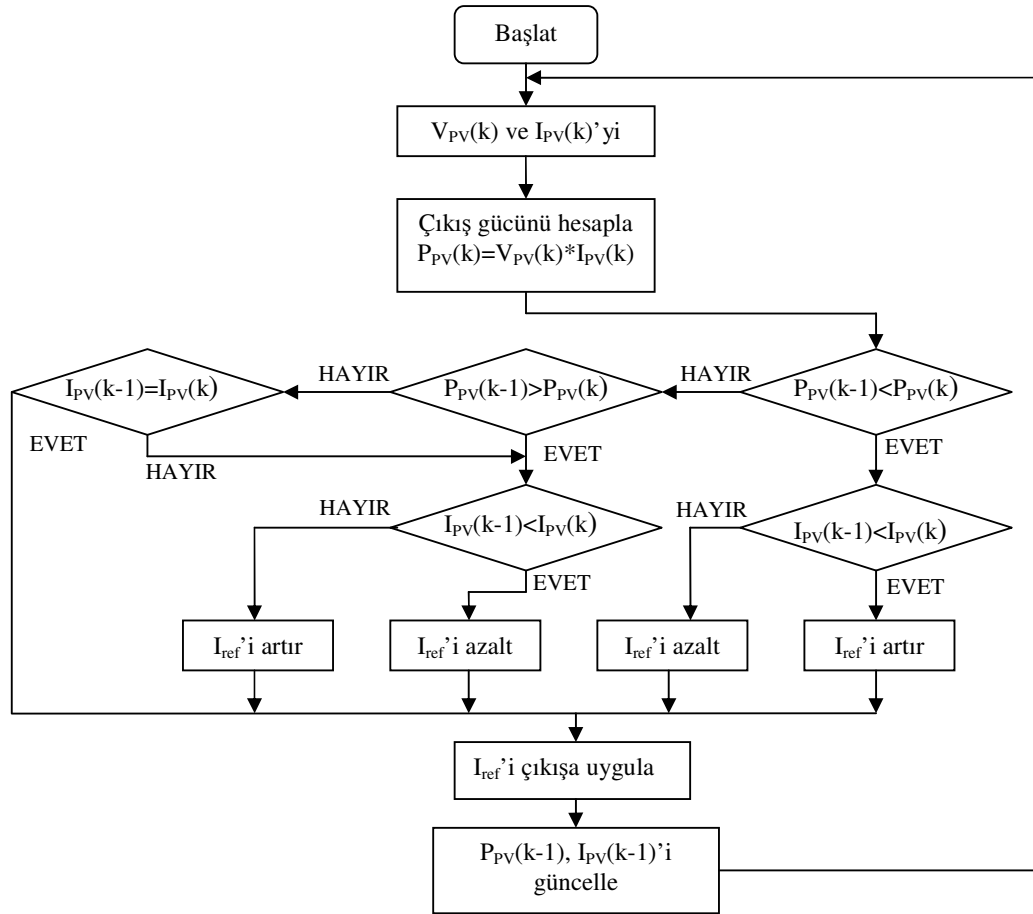
belirlenmesi prensibine dayanır. P&O algoritması basit yapısı ve kolay şekilde gerçekleştirilebilmesinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır (Kulaksız ve Akkaya 2003, Santos ve Antunes 2003, Xuejun 2004, Tan ve ark. 2005).

Bu metotta, Şekil 3.12’de görüldüğü gibi PV panellerin çıkış gerilimi izlenir, eğer $dp/dv > 0$ olarak bulunursa, çalışma noktası maksimum güç noktasının solundadır. Bu durumda P&O algoritması, PV panel referans gerilimini maksimum güç noktasına doğru artırır. Eğer $dp/dv < 0$ ise, çalışma noktası maksimum güç noktasının sağındadır ve PV panelin referans gerilimi azaltılır. Bu yöntemde, Şekil 3.11(b)’de verilen karakteristik eğri üzerindeki maksimum güç noktasının izlenmesi için gereken yönün tayini büyük önem taşımaktadır (Xuejun 2004).



Şekil 3.12 P_{PV} - V_{PV} karakteristiğinde çalışma bölgeleri

Şekil 3.13’te P&O algoritmasının akış diyagramı verilmiştir (Xuejun 2004). Burada PV panel çıkış akımı, kontrol değişkeni olarak kullanılmaktadır. İlk olarak V_{PV} panel gerilimi ve I_{PV} panel akımı ölçülür ve panellerin çıkış gücü hesaplanır. Eğer PV panel akımındaki artışla birlikte PV panel çıkış gücü artıyor ise, referans akımı bir adım büyüklüğü kadar artırılır. Aksi halde, yani PV panel çıkış gücü akım azalırken artıyor ise referans akım bir adım büyüklüğü azaltılır. Eğer panellerin çıkış gücü, akımdaki artışla birlikte azalıyor ise, referans akımı bir adım büyüklüğü azaltılır. Aksi halde, yani PV panel akımı azalırken çıkış gücü de azalıyor ise referans akım bir adım büyüklüğü kadar artırılır. P&O algoritmasında güç artıyorsa, izleme sonraki çevrimde aynı yönde devam eder. Aksi durumda ters yönde devam eder, yani eğim işareti değişir. Bu nedenle bu algoritma “tepe-tırmanma” algoritması olarak da bilinir. Böylece, farklı ışık şiddeti ve sıcaklık değerleri için PV panellerin çalışma noktası maksimum güç noktasına doğru taşınabilir (Xuejun 2004).



Şekil 3.13 P&O algoritmasının akış diyagramı

P&O algoritmasının dezavantajlarından birisi maksimum güç noktası etrafında salınımlar oluşmasıdır. Salınımlar, kontrol edilen parametre için kullanılan adım büyüklüğünün azaltılmasıyla minimize edilebilir. Ancak daha düşük adım büyüklüğü maksimum güç noktası izlemeyi yavaşlatabilir. Bu problem için çözüm yollarından birisi, değişken bir adım büyüklüğünün kullanılmasıdır. Geliştirilmiş P&O algoritması olarak adlandırılan bu yöntemde maksimum güç noktası etrafında adım büyüklüğü küçültülür (Hua ve Lin 2001, Xiao ve Dunford 2004).

- **İletkenlik farkı yöntemi**

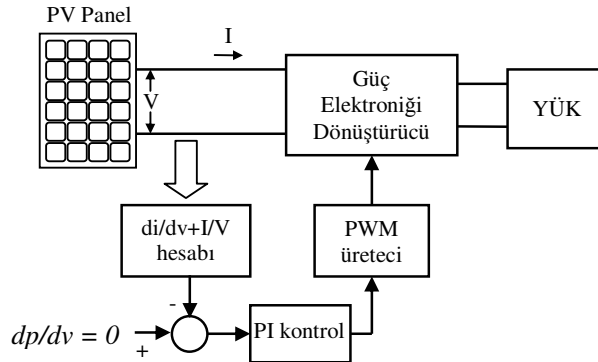
Şekil 3.14'te blok şeması verilen iletkenlik farkı yöntemi, maksimum güç noktasında gücün, gerilim veya akıma göre türevinin sıfır olması prensibini kullanır. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi maksimum güç noktasının sol tarafında güç, gerilimle doğru orantılı ($dp/dv > 0$), sağ tarafında ise gerilimle ters orantılı olarak değişir

($dp/dv < 0$). Maksimum güç noktasında ise $dp/dv = 0$ şartı sağlanır. Bu şartlar kullanılarak PV panellerin akım ve gerilimlerine bağlı olarak aşağıdaki denklemler yazılabilir.

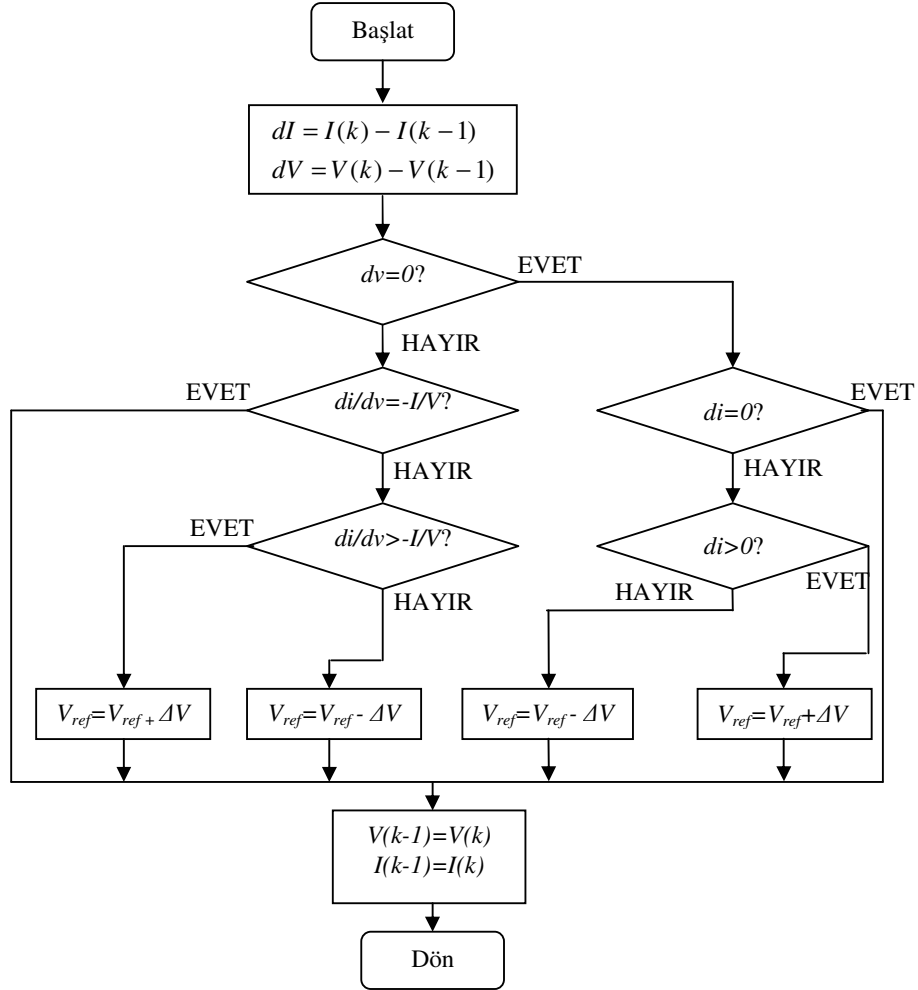
$$dp/dv = d(iv)/dv = I + V di/dv \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{V} dp/dv = \frac{I}{V} + di/dv \quad (3.14)$$

Böylece PV panellerin uç gerilimi, iletkenlik farkı ve ani iletkenlik değerleri (sırasıyla di/dv ve I/V) ölçülerek ve yukarıdaki denklemlerde yerine konularak maksimum güç noktasına göre ayarlanabilir. İletkenlik farkı yönteminin akış diyagramı Şekil 3.15'te verilmiştir (Hussein ve ark. 1995). Algoritma, $I(k)$ ve $V(k)$ değerlerinin ölçülmesiyle başlar ve daha sonra bir önceki çevrimden saklanan $I(k-1)$ ve $V(k-1)$ değerleri kullanarak farklar için $di \approx I(k) - I(k-1)$ ve $dv \approx V(k) - V(k-1)$ yaklaşımları elde edilir. Öncelikle di/dv ile $-I/V$ karşılaştırılır ve bu kontrolün sonucuna göre kontrol referans sinyali V_{ref} , panelin gerilimi maksimum güç noktasına doğru kaydırılacak şekilde ayarlanır. Maksimum güç noktasında $di/dv = -I/V$ olduğundan her hangi bir ayara gerek duyulmaz ve referans değişmediğinden çalışma noktası maksimum güç noktasında kalır. Algoritmada parametreler çevrimin sonunda saklanır. Paneller maksimum güç noktasında çalışırken, her hangi bir denetleme gereksiniminin olup olmadığını belirlemek için iki farklı durum daha kontrol edilir. Bunun için, atmosferik şartlarda bir değişimin olup olmadığı ($di \neq 0$) işlemiyle kontrol edilir. Burada V_{ref} 'in ayarlanması di 'nin akış diyagramında gösterildiği gibi pozitif veya negatif olmasına bağlıdır. PI denetleyicinin kullanılmasıyla sistemde daha etkin bir kontrol sağlanır.



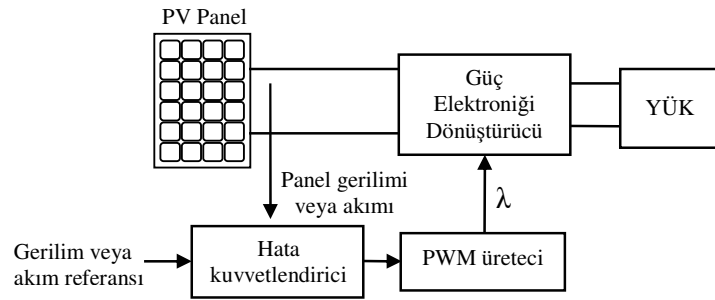
Şekil 3.14 İletkenlik farkı yöntemi için blok şeması



Şekil 3.15 İletkenlik farkı algoritmasının akış diyagramı

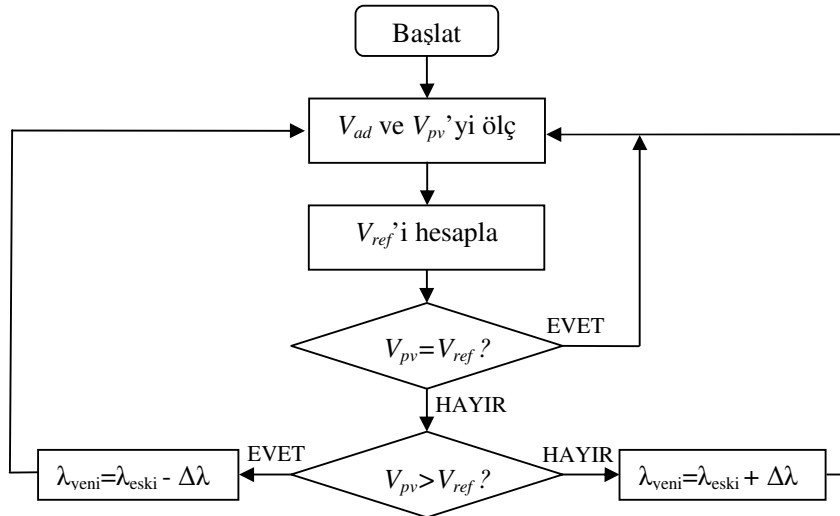
- **Sabit gerilim yöntemi**

Sabit gerilim yöntemi, PV panellerden maksimum gücün elde edildiği çalışma noktasının açık devre geriliminin sabit bir yüzdesine karşılık gelmesi prensibine dayanır (Masoum ve ark. 2002). Bu yöntemde PV panellerin akımı kısa bir süre sıfır yapılarak panellerin açık devre gerilimi ölçülür. Alternatif olarak panellerin açık devre geriliminin ölçülmesi için ek bir PV panel de kullanılabilir (Abu Tariq ve Asghar 2006). Sabit gerilim yöntemini kullanan MPPT algoritması için blok şema Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16 Sabit gerilim veya sabit akım MPPT yöntemi için blok şeması

Sabit gerilim yöntemi için çalışma adımları, Şekil 3.17'deki akış diyagramında görülmektedir. Akış diyagramında görüldüğü gibi, öncelikle PV panelin açık devre gerilimi ölçülmekte ve açık devre geriliminin belli bir yüzdesine göre referans gerilim V_{ref} hesaplanmaktadır. Şekil 3.16'da görüldüğü gibi elde edilen referans gerilim bir hata kuvvetlendirici üzerinden PWM üreticine uygulanmakta ve bağlı iletim süresinin (λ) kontrolü ile panellerin dönüştürücü üzerinden yüke maksimum güç noktasına yakın bir bölgede güç aktarması sağlanmaktadır. Algoritmada kontrol edilen parametre olan PV panel gerilimi, maksimum güç noktası gerilimine eşit olacak şekilde ayarlanır.



Şekil 3.17 Sabit gerilim yöntemi için akış diyagramı

- **Sabit akım yöntemi**

Sabit akım yöntemi, sabit gerilim yönteminde olduğu gibi farklı ortam şartlarında maksimum güç noktasının yaklaşık olarak kısa devre akımıyla orantılı olması prensibine dayanır (Mutoh ve ark. 2002, Noguchi ve ark. 2002). Kısa devre akımı, PV paneller kısa bir süre için kısa devre edilerek ölçülür. PV panellerin maksimum güç noktasındaki akımı, k sabitine bağlı olarak kısa devre akımı ile orantılı olarak değişir.

$$I_{MPP}=k \cdot I_{kd} \quad (3.15)$$

Kısa devre akımı anlık olarak belirlenir ve sistemde referans akım (I_{ref}) maksimum güç noktasındaki akıma (I_{MPP}) eşitlenecek şekilde akım kontrollü güç dönüştürücüsü ile kontrol işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntem için de Şekil 3.16'da verilen sistem kullanılabilir ve sabit gerilim yöntemine benzer şekilde çalışma sağlanır.

3.2. Yapay Sinir Ağlarına Genetik Algoritma Optimizasyonunun Uygulanması

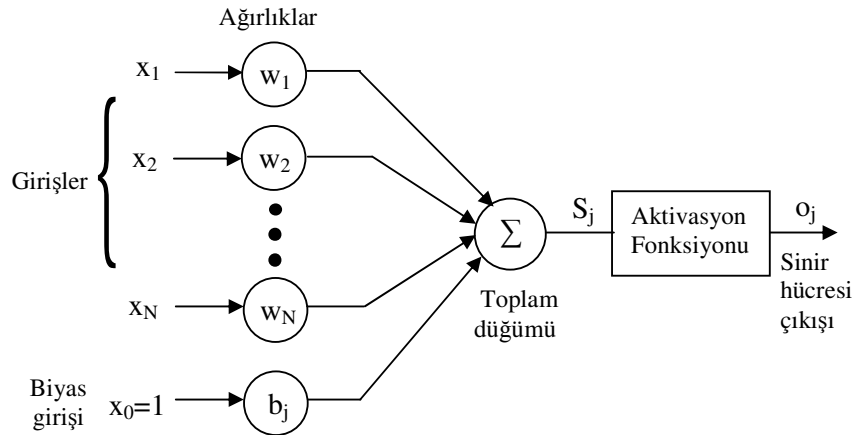
Genetik algoritmalar (GA), YSA tasarımında, topoloji optimizasyonu, genetik eğitime algoritmaları ve kontrol parametresi optimizasyonu gibi alanlarda gittikçe artan şekilde kullanılmaktadır. YSA topoloji optimizasyonunda GA, gizli katman sayısının, gizli düğüm sayılarının ve bağlantı deseninin belirlenmesinde kullanılır. GA'lar, belirlenen kritere ulaşılan kadar en iyi çözümün bulunması için doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini kullanırlar. GA parametreleri, biyolojideki genleri temsil ederken, parametrelerin toplu kümesi de bireyi (kromozomu) oluşturmaktadır. Hibrid nöro-genetik uygulamalarda genler, optimize edilmesi istenen sinir ağı parametreleridir. Bu işlemde GA bir başlangıç popülasyonu oluşturur ve her bir birey için sinir ağı eğitilerek popülasyon değerlendirilir. Daha sonra popülasyon, çoklu nesiller kullanılarak en iyi ağ parametrelerine ulaşılması için geliştirilir (Jang ve ark. 1997).

3.2.1. Yapay sinir ağıları

İnsan beynindeki hafıza, zeka ve buna karşılık gelen düşünme işlemi, 100 milyar civarındaki sinir hücresi veya biyolojik nöronun birbirlerine bağlanmasından oluşan biyolojik sinir ağı tarafından gerçekleştirilir. Yapay sinir ağıları (YSA), insan beyninin biyolojik sinir sistemini elektronik devreler veya bilgisayar programları ile çok sınırlı şekilde taklit etmeye çalışır. Biyolojik sistemlerin; nonlineerlik, yüksek düzeyde paralellik, sağlamlık, hata toleransı, eğitime ve genelleştirme yetenekleri gibi bilgi işleme karakteristiklerine sahip olmaları YSA'nın büyük ölçüde ilgi çekmesini sağlamıştır (Jain ve ark. 1996).

3.2.1.1. Temel YSA bileşenleri

YSA bileşenleri, biyolojik sinir hücresi ile direkt benzerlik gösterir. Yapay sinir hücresinin yapısı, Şekil 3.18'de görüldüğü gibi analog toplayıcı benzeri bir yapıdır ve temel olarak girişler, ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonunu içerir (Vas 1999). Giriş sinyalleri, sürekli değişkenler veya ayırık darbeler şeklinde olabilir. Her bir giriş sinyali bir kazanç veya ağırlık ile çarpılır ve toplayıcı düğümünde ağırlıkla çarpılan tüm giriş sinyallerinin ve bias sinyalinin toplamı alınır ve çıkışa bir aktivasyon fonksiyonu boyunca aktarılır.



Şekil 3.18 Yapay sinir hücresinin temel yapısı

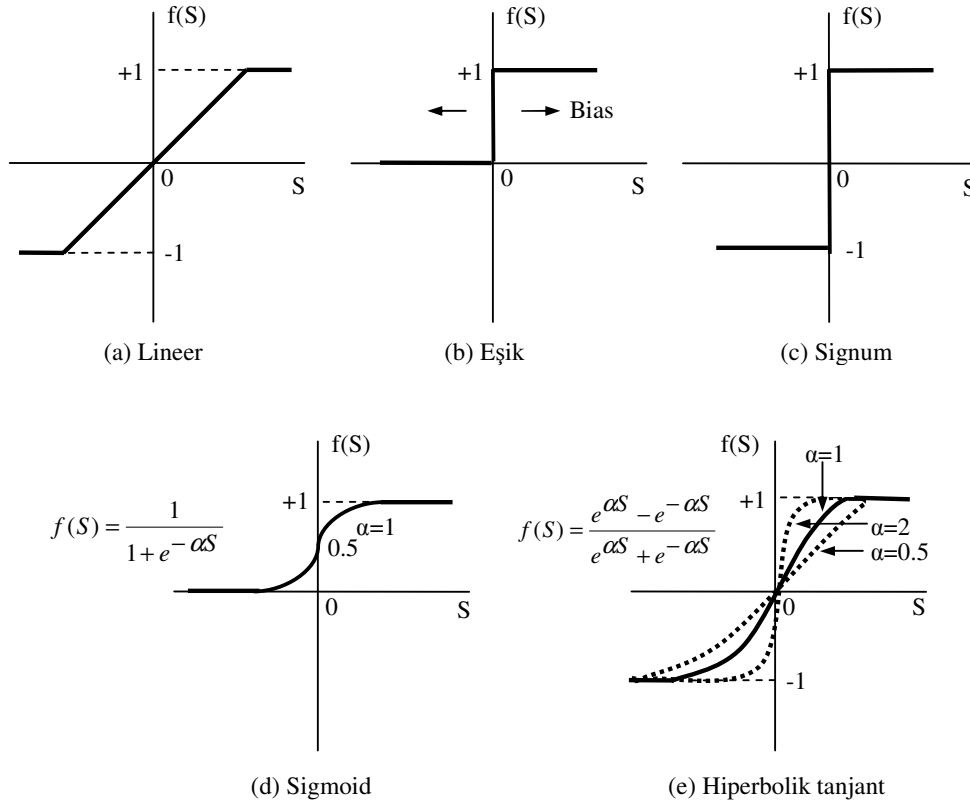
Şekil 3.18’de gösterildiği gibi herhangi bir j ’nci sinir hücresi çıkışı için giriş sinyalleri ve biyas teriminin ağırlık toplamı matematiksel olarak şu ifade ile verilir;

$$S_j = \sum_{i=1}^N w_{ji} x_i + b_j \quad (3.16)$$

burada N , j ’nci çıkış sinir hücresine uygulanan toplam giriş sayısı, w_{ji} çıkış sinir hücresi j ile önceki katmandaki x_i çıkış sinyaline sahip olan i ’nci sinir hücresi arasındaki ağırlık, b_j ise biyas terimidir. Böylece aktivasyon fonksiyonu uygulandıktan sonra j ’nci sinir hücresinin çıkışı aşağıdaki denklemle belirlenir.

$$o_j = f_j(S_j) = f(S_j) \quad (3.17)$$

Sinir ağı yapısında en yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları (veya transfer fonksiyonları) Şekil 3.19’da görülmektedir. Bunlardan en basiti, Şekil 3.19(a)’da görülen, çıkışın girişle lineer olarak değiştiği ve ± 1 değerleriyle sınırlandırıldığı lineer aktivasyon fonksiyonudur. Aktivasyon fonksiyonu, adım veya eşik tipinde olabilir. Şekil 3.19(b)’de görüldüğü gibi eğer $S > 0$ ise $+1$, $S < 0$ ise 0 sonucu çıkışa aktarılır. Eşik değerini değiştirmek amacıyla S değeri için pozitif veya negatif biyas verilebilir. Şekil 3.19(c)’de görülen sıfır biyasa sahip signum aktivasyon fonksiyonunda eğer $S > 0$ ise $+1$, $S < 0$ ise -1 değeri çıkışa aktarılır. Eşik aktivasyon fonksiyonuna sahip sinir ağı “tek katmanlı perseptron” olarak, signum aktivasyon fonksiyonuna sahip sinir ağı ise “Adaline” olarak adlandırılır. En yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları, nonlinear yapıda olan ve 0 ile $+1$ veya -1 ile $+1$ asimptot değerleri arasında zamanla değişen fonksiyonlardır. Bunlar, sırasıyla Şekil 3.19(d) ve (e)’de gösterilen sigmoid fonksiyonu ve hiperbolik tanjant fonksiyonudur. Matematiksel ifadeleri şekilde verilen bu fonksiyonlarda α , eğimi veya hassasiyeti ayarlayan kazançtır. Bu fonksiyonların türevi alınabilir. $S=0$ için $df(S)/dS$ türevi maksimum ve S değeri her iki yönde de artarken, türev gittikçe azalma eğilimindedir. Tüm bu fonksiyonlar, asimptotik değerler arasında sinir hücresinin dinamik çalışmasını sınırlandırdığı için “sınırlandırıcı fonksiyonlar” olarak da karakterize edilirler. Lineer olmayan aktivasyon fonksiyonunun kullanılması, sinir hücresinin lineer olmayan transfer karakteristiğine sahip olmasına yol açar ve YSA’da lineer olmayan bir giriş/çıkış karakteristiği elde edilmesine imkan verir.



Şekil 3.19 Yapay sinir hücresi için aktivasyon fonksiyonları ve matematiksel ifadeleri

3.2.1.2. Yapay sinir ağı

Tek sinir hücresiyle basit bazı veri işleme fonksiyonları yerine getirilebilmesine rağmen, YSA'nın bilimsel, mühendislik ve başka gerçek yaşam problemlerini çözmeye yarayan gücü, sinir hücrelerinin çeşitli kombinasyonlarla ağlar halinde birbirleriyle bağlanmasından gelmektedir. Sinir hücreleri arasındaki bağlantı tipleri, YSA topolojisini belirler. YSA'daki sinir hücreleri, her bir sinir hücresinin diğer tüm sinir hücrelerine bağlı olduğu tam bağlantılı şekilde olabileceği gibi, sadece farklı katmanlardaki sinir hücreleri arasında bağlantılara izin verildiği kısmi bağlantılı şekilde de olabilir. Sinir hücrelerinin giriş ve çıkış setlerinin ve kullanılan katmanların sayılarına göre YSA iki temel bağlantı mimarisine sahiptir. Bunlar;

- *Öz ilişkili (autoassociative)*: Bu mimaride giriş sinir hücreleri aynı zamanda çıkış sinir hücresidir. Hopfield ağları bu tipte ağlardır.

- *Ayrı ilişkili (heteroassociative)*: Bu mimaride farklı giriş ve çıkış sinir hücresi setleri mevcuttur. Örnek olarak perseptron ve çok katmanlı perseptron ve Kohonen ağı verilebilir.

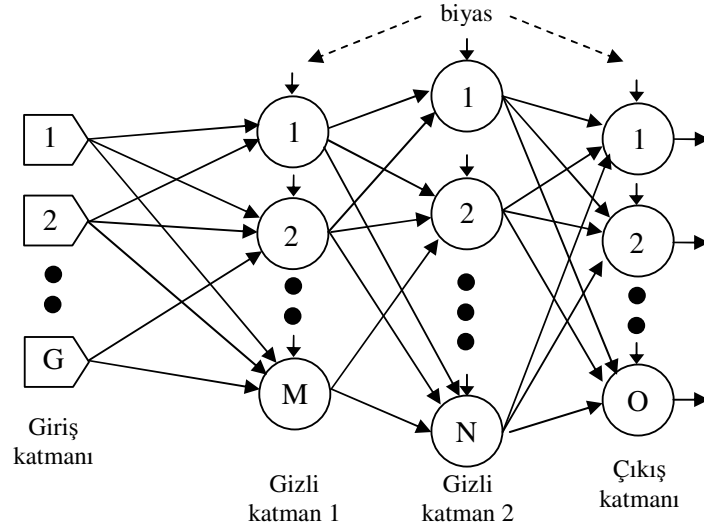
Bir ağda geri besleme bağlantılarının bulunup bulunmamasına göre mimariler iki ayrı sınıfa ayrılır. Bunlar;

- *İleri beslemeli mimari*: Çıkış sinir hücrelerinden giriş sinir hücrelerine doğru bir bağlantı mevcut değildir. YSA, önceki çıkış değerleri ve sinir hücrelerinin aktivasyon durumları hakkındaki bilgiyi saklamaz. Perseptron benzeri ağlar ileri beslemeli tiptendir.
- *Geri beslemeli mimari*: Çıkış sinir hücrelerinden giriş sinir hücrelerine doğru bağlantılar mevcuttur. Bu tipte YSA daha önceki durumları hafızasında tutar ve sonraki durumlar sadece giriş sinyallerine değil ağıın önceki durumlarına da bağlıdır. Hopfield, Elman ve Jordan ağları bu tipte ağlara örnektir.

Bir yapay sinir ağının temel modelini, sinir hücrelerinin tipi ve bağlantı mimarisinin yanında eğitime algoritması belirler. Eğitime algoritması, YSA'nın öğrenme yeteneği kazanması için gereklidir. YSA eğitildikten sonra, giriş vektörlerinden oluşan bir veri seti ağa uygulandığında istenen çıkış vektör veri seti, ağda hesaplanır ve böylece giriş setinin iç karakteristikleri ve yapısı hakkında YSA eğitilmiş olur. Giriş setinin elemanlarına "eğitime örnekleri" adı verilir. Eğitime işlemi, ağdaki bağlantı ağırlıklarının değiştirilmesiyle gerçekleştirilir (Sağıroğlu ve ark. 2003).

3.2.1.3. Çok katmanlı perseptron modeli

Tüm YSA modelleri içinde çok katmanlı perseptron modeli, genelleştirme kapasitesi, çalışma basitliği ve fonksiyon yaklaşımı gerçekleştirme yetenekleriyle en yaygın olarak kullanılan modeldir. Çok katmanlı perseptronların işlem yeteneği, ağda bulunan sinir hücrelerinin lineer olmama özelliğine dayanır. Sinir hücreleri eğer lineer elemanlar olsalardı, iki veya üç katmanlı perseptronlar yerine uygun ağırlık değerine sahip tek katmanlı bir ağ kullanılabilirdi. Çok katmanlı temel bir perseptron yapısı Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.20 Çok katmanlı temel perspetron yapısı

Temel yapıdaki katmanlar aşağıdaki işlevleri yerine getirirler;

Giriş katmanı: Dış ortamdan bilgiyi alan ve bunu işlem yapmak üzere YSA'ya aktaran sinir ağı katmanıdır. Girişler sensörlerden alınabileceği gibi, modellenen sistemlerden sağlanan sinyaller de olabilir.

Gizli katman: Giriş katmanından bilgiyi alan ve ileten sinir ağı katmanıdır. Dış dünyayla direkt bir bağlantısı yoktur. Gizli katmandan diğer katmanlara tüm bağlantılar sistem içerisinde gerçekleştirilir.

Çıkış katmanı: İşlenmiş bilgiyi alan ve sistem çıkışına çıkış sinyalleri olarak gönderen sinir ağı katmanıdır.

Biyas: Sinir hücresi üzerinde değer kaydırma (offset) görevi yapar. Biyasın fonksiyonu, sinir hücrelerinin aktivasyonu için bir eşik değerinin sağlanmasıdır. Biyas girişi ağıdaki her bir gizli katmana ve çıkış katmanına bağlanır.

Çok katmanlı perseptron modelinin eğitilmesinde kullanılan geriye yayılma ve Levenberg-Marquardt metotları aşağıda açıklanmıştır.

a) Çok katmanlı perseptronda geriye yayılma eğitim metodu

Geriye yayılma (BP) metoduyla eğitme (Rumelhart ve ark. 1986), çok katmanlı perseptronlarda yaygın olarak kullanılan bir metottur. Bu metot, temel

olarak Widrow ve Hoff (1960) tarafından “Adaline” eğitime için geliştirilen delta öğrenme kuralının genelleştirilmiş şeklidir. Başlangıçta, katmanların sayısı ile birlikte ağ yapısı, gizli katmanlardaki sinir hücrelerinin sayısı ve aktivasyon fonksiyonları seçilir. Deneysel olarak veya bir sistem modeli mevcut ise sistemin simüle edilmesiyle elde edilen bilgiler toplanarak giriş/çıkış veri örnekleri elde edilir. YSA’da ağırlık değerleri, eğitime başlamadan önce doyumun önlenmesi amacıyla rasgele pozitif ve negatif değerlere ayarlanır. Bir giriş örneği için çıkış hesaplanır ve hedeflenen çıkış değeriyle karşılaştırılarak toplam hata minimum yapılmaya çalışılır. Hata, genellikle ortalama karesel hata (MSE) şeklinde aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$E = \frac{1}{N.S} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^P (d_{kj} - o_{kj})^2 \quad (3.18)$$

Burada E ortalama karesel hata, N eğitime setindeki örnek sayısı, P ağdaki çıkış sayısı, d_{kj} k ’nci örnek için j ’nci istenen çıkış ve o_{kj} k ’nci örnek için j ’nci çıkış değeridir. Böylece ortalama karesel hata, S sayıdaki eğitime örneği hatasının ortalamasına eşit olur. Benzer eğitime, tüm giriş örnekleri ile yapılır. Eğer yakınsama olmazsa, gizli katmandaki sinir hücrelerinin sayısının değiştirilmesi veya ekstra katmanlar eklenmesi gerekebilir (Bose 2002).

Hatanın azaltılması için ağırlıkların ayarlanması, geriye yayılma algoritmasında (3.19) denklemi ile verilen azalan eğim (steepest descend gradient) metodu ile yapılır (Hu ve Hwang 2001).

$$\Delta w = -\eta g(t) = -\eta dE / dw \quad (3.19)$$

Bu denklemde g gradyan vektörü, η yakınsama hızını ve ağırlıkların eğitime esnasındaki kararlılığını etkileyen eğitime hızı veya adım büyüklüğüdür. Böylece, geriye yayılma algoritması ile eğitilen YSA için ağırlıklar hata gradyanına göre ayarlanır. w_{ji} ağırlığındaki değişimden S_j değeri ve hata, dolayısıyla da o_j çıkışı etkilendiği için hatanın değişimine zincir kuralının uygulanması ile aşağıdaki denklem elde edilir (Bishop 1995);

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial S_j} \frac{\partial S_j}{\partial w_{ji}} \quad (3.20)$$

Bu çarpımdaki ikinci terim, $S_j = w_{j1}x_1 + w_{j2}x_2 + \dots + w_{jJ}x_J$ ağırlıklı toplamının w 'ya göre türevidir ve ağırlıklı toplam ifadesinde J girişteki örnek sayısıdır. Çarpımdaki ikinci terim için (3.21) denklemi verilebilir.

$$\frac{\partial S_j}{\partial w_{ji}} = x_i \quad (3.21)$$

(3.21) denklemi (3.20)'de ve elde edilen sonuç da (3.19)'daki azalan eğim denkleminde yerine konursa (3.22) denklemi elde edilir.

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial S_j} x_i \quad (3.22)$$

E , S_j 'nin çok parçalı bir fonksiyonu olduğundan dolayı ($E = E(S_j) = E[o_j(S_j)]$), bu denklemdeki kısmi türev için uygun bir ifade elde etmek amacıyla zincir kuralı kullanılabilir (Vas 1999).

$$\frac{\partial E}{\partial S_j} = \frac{\partial E}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial S_j} \quad (3.23)$$

(3.23) denklemindeki ikinci terim, aktivasyon fonksiyonunun türevidir.

$$\frac{\partial o_j}{\partial S_j} = f'_j(S_j) \quad (3.24)$$

Burada, aktivasyon fonksiyonunun, türevi alınabilir tipte bir fonksiyon olması gerektiği görülmektedir. (3.18) denklemiyle verilen hata ifadesi kullanılarak, (3.23) denklemindeki ilk kısmi türev ifadesi için (3.25) denklemi elde edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial o_j} = -(d_j - o_j) \quad (3.25)$$

(3.23)-(3.25) denklemleri (3.22) denkleminde kullanılırsa;

$$\Delta w_{ji} = \eta x_i (d_j - o_j) f'_j(S_j) \quad (3.26)$$

(3.26) denklemindeki geriye yayılma, çıkış sinir hücresindeki eşdeğer hata ve j sinir hücresinin yerel gradyanı;

$$\delta_j = (d_j - o_j) f'_j(S_j) \quad (3.27)$$

denklemleriyle verilir. Bu denklem, (3.26)'da yerine yazılırsa delta kuralı olarak da bilinen çıkış katmanında hata düzeltme (ağırlık güncelleme) denklemi elde edilir.

$$\Delta w_{ji} = \eta x_i \delta_j \quad (3.28)$$

Böylece, bir önceki katmandaki i 'nci sinir hücresinden j 'nci çıkış sinir hücresine bağlantıya sahip bir ağırlıktaki değişim miktarı, genellikle 0 ile 1 arasında değerler alan eğitme katsayısı η 'nın eşdeğer sinir hücresi çıkış hatası δ_j ve i 'nci sinir hücresinin aktivasyon değeri x_i ile çarpımıyla belirlenir. Her bir sinir hücresinde bias için güncelleme formülü de benzer şekilde elde edilir.

Bu ağırlık güncelleme denklemi ile $(k+1)$ 'nci iterasyon adımında çıkış katmanındaki ağırlıkların yeni değeri (3.29) denklemi ile hesaplanır.

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \Delta w_{ji} = w_{ji}(k) + \eta x_i(k) \delta_j(k) \quad (3.29)$$

Ağırlık güncelleme işleminin gizli katmanlara da uygulanması için azalan eğim metodunun tekrar kullanılması gerekir. Burada ortaya çıkan zorluk gizli katmandaki bir sinir hücresi için istenen bir çıkış değerinin önceden bilinmemesidir. Bu yüzden gizli katmandaki sinir hücresi için hata sinyalinin, sinir hücresinin bağlı olduğu tüm çıkış sinir hücrelerindeki hata sinyallerinden özyineli (recursively) şekilde belirlenmesi gerekir.

Geriye yayılma algoritması, gradyan eğim algoritması olduğu için lokal minimumun başlangıç noktası ile optimal nokta arasında bulunması durumunda, işlemde sadece lokal bilgi kullanıldığı için problemler meydana gelebilir. Ayrıca bu işlem gradyan hakkında tahminde bulunulmasını gerektirdiğinden gürültüye duyarlıdır ve yakınsama yavaş olur. Momentum eğitme, standart azalan eğim algoritmasına bir hafıza terimi eklenerek ağırlığın geçmiş değerlerinin saklanmasıyla gerçekleştirilir ve hızı artırarak yakınsamayı daha kararlı hale getirir. Bu eğitme yönteminde momentum teriminin ilavesiyle (3.30) ile verilen hata güncelleme denklemi kullanılır.

$$\Delta w_{ji}^{güncel}(k) = \Delta w_{ji}(k) + \mu \Delta w_{ji}(k-1) + \varepsilon_{ji}(k) \quad (3.30)$$

Burada $\Delta w_{ji}(k)$ (3.19) denklemiyle elde edilen ağırlık güncelleme terimi, $\mu \Delta w_{ji}(k-1)$ adım büyüklüğünü adaptif şekilde ayarlayan momentum terimidir. Ard

arda gelen epoklarda eğim vektörleri aynı yönde ise etkin adım büyüklüğü artar ve momentum kazanılır. Eğim vektörleri arama örneğinde sürekli yön değiştiriyorsa etkin eğim yönü bu momentum terimiyle sabit tutulmaya çalışılır ve toplam hata değerinin azaltılabilir.

Öğrenme hızı veya adım büyüklüğü olarak adlandırılan η ve momentum sabiti μ $[0, 1]$ aralığında seçilir. (3.30) denklemindeki son terim, rasgele seçilen küçük bir gürültü değerine sahiptir. Arama anında lokal minimuma ulaşırsa karşılık gelen gradyan vektörü veya momentum terimi azalır. Böyle bir durumda gürültü değeri yardımıyla eğitme algoritması lokal minimumdan çıkabilir ve global optimum çözüme ulaşmak için aramayı devam ettirir.

b) Levenberg-Marquardt algoritması

Tezde gerçekleştirilen YSA yapısının eğitilmesinde kullanılan Levenberg-Marquardt (LM) algoritması (Levenberg 1944), Gauss-Newton metoduna dayanmaktadır ve geriye yayılma tekniğinin hızını ve güvenilirliğini artıran momentum ve adaptif eğitme hızı teknikleri kullanılmış olsa bile genel olarak geriye yayılma algoritmasından daha iyi sonuçlar vermektedir (Vas 1999). En verimli yüksek seviyeli adaptif yöntemleri kullanan ve eğitme süresinin kısaltılmasını sağlayan bu algoritmada, geriye yayılma tekniğinden daha ileri düzey bir teknik kullanılır ancak daha büyük hafızaya ihtiyaç duyulur. Bu algoritma, eğitme algoritmaları içerisinde en hızlısı olmasına rağmen ağırlık sayısı ile orantılı hafıza gereksinimine sahip olması nedeniyle özellikle büyük ağlar için uygulanabilir değildir (Levenberg 1944, Marquardt 1963, Bishop 1995).

Levenberg-Marquardt algoritması ile ağırlık ayarlanmasında ağırlık güncelleme, denklem (3.31)'e göre yapılır.

$$\Delta w = (J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (3.31)$$

Burada; J her bir hatanın ağırlıklara göre türevlerini içeren Jakobiyen matrisi, μ negatif olmayan bir skaler, I birim matris ve e hata vektörüdür. Bu ağırlık güncelleme denkleminde en önemli bileşen μI 'dir. Bu metotta μ 'nün büyüklüğüne bağlı olarak azalan eğim ve Gauss-Newton tekniklerine karşılık gelen iki durum arasında geçişler meydana gelir. Eğer μ skaleri çok büyük ise ağırlık güncellemede

azalan eğim tekniği kullanılırken, μ skaleri çok küçük olduğunda Gauss-Newton metodunda elde edilen ağırlık güncelleme tekniği kullanılır. Pratikte μ için herhangi bir değer seçilir ve bu değer minimizasyon işlemi sırasında uygun şekilde değiştirilir. Her adımda hatadaki değişim gözlenir. Eğer hata azalıyorsa (3.31) ile verilen denklemden yeni ağırlık değeri elde edilir, Gauss-Newton metoduna hızlı geçilmesi için μ değeri 10 kat azaltılır ve işlem devam eder. Böylece Gauss-Newton metodunun minimum hataya yakın yerlerde daha hızlı ve daha doğru sonuç vermesi özelliği kullanılır. Eğer hata artarsa, μ değeri 10 kat artırılır ve eski ağırlık değeri geri yüklenir ve yeni bir ağırlık güncelleme için hesap yapılır. Böylece μ her başarılı adımdan sonra azaltılırken sadece bir adımda hatada artış olmuşsa artırılır. Hata istenen seviyeye düşüncüye kadar bu işlem tekrarlanır.

3.2.1.4. YSA tabanlı bir sistemin gerçekleştirilmesi safhaları

Başarılı bir YSA tabanlı sistem, Şekil 3.21’de görüldüğü gibi altı safhada gerçekleştirilebilir.

İlk safha, problemin belirlenmesi ve formüle edilmesidir. Bu safha, problemin özellikle neden-sonuç ilişkileri ile birlikte yeterli düzeyde anlaşılmasına dayanır. Modelleme yönteminin seçilmesinden önce YSA’nın diğer tekniklere göre sağlayacağı faydalar değerlendirilir.

İkinci safha, sistemin tasarlanmasıdır. Burada, probleme uyan YSA tipi ve eğitme kuralı belirlenir. Ayrıca verinin elde edilmesi, kullanılan YSA tipine göre ön işleme tabii tutulması, verinin istatistiksel olarak analiz edilmesi ile eğitme, test ve doğrulama olmak üzere üç alt veri setine bölünmesi gerekir.

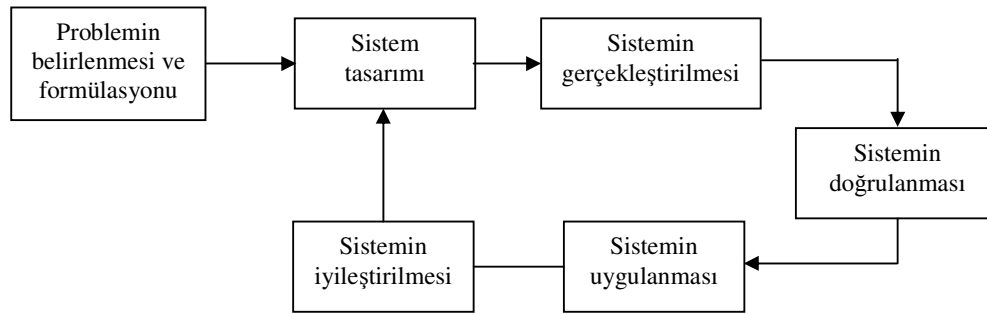
Üçüncü safha olan sistemin gerçekleştirilmesi safhasında, eğitme ve test alt veri setleri kullanılarak YSA eğitilir ve aynı anda ağ performansı tahmin hatası analiz edilerek denetlenir. Ağ büyüklüğü, eğitme hızı, eğitme çevrimi sayısı ve hata gibi çeşitli parametrelerin optimal şekilde seçilmesi, YSA’nın performansına etki eder.

Dördüncü safha, sistem doğrulama safhasıdır. YSA’nın gerçekleştirilmesi eğitme devam ederken test verisi kullanılarak test edilmesini de içeriyor olmasına rağmen, elde edilen en iyi ağın doğrulama alt seti kullanılarak genelleştirme yeteneği

açısından kontrol edilmesi gerekir. Doğrulama işlemi, YSA tabanlı modelin sinir ağı geliştirilirken kullanılmamış olan örneklere tepkisinin ne kadar doğru olduğunu görmek amacıyla yapılır. Bu safha, YSA tabanlı modelin istatistiksel regresyon ve uzman sistemler gibi diğer yaklaşımlara göre karşılaştırılmasını da içerir.

Beşinci safha, elde edilen ağıın donanım denetleyicisi veya bilgisayar programı gibi çalışan bir sistem üzerinde uygulanmasını içerir.

Altıncı safhada geliştirilen sistem, çevre şartlarındaki veya sistem değişkenlerindeki değişimlere göre güncellenir. Bu, yeni bir geliştirme çevrimini içerir (Basheer ve Majmeer 2000).



Şekil 3.21 YSA tabanlı bir sistemin gerçekleştirilme safhaları

3.2.1.5. YSA'nın uygulanmasındaki bazı önemli hususlar

YSA eğitime başlanmadan önce dikkate alınması gereken bazı önemli hususlar vardır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

i) Veri seti büyüklüğü ve verinin bölünmesi: Eğitimde kullanılacak veri seti, problem domeninde bilinen tüm varyasyonları içine alacak şekilde büyük olmalıdır. Böylece daha önce YSA'da görülmeyen durumları da iyi bir genelleştirme yeteneğiyle gerçekleştirilen modelden tanıyabilir. YSA geliştirilirken veri tabanının tümü eğitime, test ve doğrulama olmak üzere üç alt sete bölünür. Eğitim alt setinin problem domenine ait tüm veriyi içermesi ve ağıdaki ağırlıkların güncellenmesi için eğitime safhasında kullanılması gerekir. Test alt seti, eğitime işlemi sırasında ağıın eğitimde kullanılmayan veriye gösterdiği tepkiyi kontrol etmekte kullanılır. Test alt setinde kullanılan veri, eğitimde kullanılan veriden farklı olmalı ancak, eğitim verisi değerlerinin sınırları içerisinde kalmalıdır. Test alt seti için YSA'nın performansına

göre mimari değiştirilebilir veya daha fazla eğitime iterasyonu uygulanır. Diğer veri alt seti olan doğrulama alt seti, diğer iki alt sette olmayan örnekler içerir. Bu alt set, en iyi YSA seçildikten sonra YSA'nın daha fazla incelenmesi veya sisteme uygulanmadan önce hassasiyetinin doğrulanması amacıyla kullanılır. Şu anda veri alt setlerinin büyüklüklerinin belirlenmesinde kullanılan matematiksel bir kural yoktur. Looney (1996), tüm veri tabanının %65'inin eğitmede, %25'inin testte, %10'unun ise doğrulama amaçlı kullanılmasını tavsiye ederken Swingler (1996), test için %20, Nelson ve Illingworth (1990) ise %20-30 değerlerini tavsiye etmiştir. Haykin (1994), örnek sayısı-ağırlık oranı için 10'dan daha büyük bir değer seçilmesinin, Masters (1994) ise 4'ten büyük bir değer seçilmesinin yeterli olduğunu öne sürmüştür.

ii) *Veri normalizasyonu:* Verinin düzenli bir aralıkta normalize edilmesi büyük değerlerin küçük değerleri etkisiz kılmasını ve gizli düğümlerin beklenenden önce doyuma ulaşmasına neden olarak eğitime işlemine engel olmasını önlemek amacıyla gerçekleştirilir. Giriş ve çıkışların normalize edilmesinde standart bir işlem yoktur. Kullanılan yöntemlerden birisi, giriş ve çıkış değişkenlerinin (z_i), $[\lambda_1, \lambda_2]$ aralığında aşağıdaki transfer fonksiyonuna karşılık gelecek şekilde ölçeklenmesidir.

$$x_i = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) \left(\frac{z_i - z_i^{\min}}{z_i^{\max} - z_i^{\min}} \right) \quad (3.32)$$

Burada x_i , z_i 'nin normalize edilmiş değeri, $z_i^{\max}$ ve $z_i^{\min}$ ise veri tabanında z_i 'nin sahip olduğu maksimum ve minimum değerlerdir. Sigmoid fonksiyonunun eğitmeyi yavaşlatması veya durdurmasını önlemek için normalize edilen verinin, 0 ve 1 arasında değerler yerine, 0.1 ve 0.9 gibi değerler arasında normalize edilmesi tavsiye edilir (Masters 1994, Hassoun 1995).

iii) *Ağ ağırlıklarının başlangıç değerleri:* Sinir ağında ağırlıklar için verilen başlangıç değerlerinin yakınsamaya etkisi olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (Li ve ark.1993, Schmidt ve ark. 1993). Genellikle ağırlık ve biyas için başlangıç değerleri, ortalaması sıfır olan rasgele sayılar şeklinde küçük bir aralıkta düzenli olarak başlatılır. Küçük sayıların seçilmesi, sinir hücrelerinin beklenenden önce doyuma uğraması ihtimalini azaltır. Asce (2000), ağırlık ve biyas değerlerine başlangıçta -0.30 ile +0.30 arasında rasgele küçük değerler atanmasını tavsiye etmiştir.

iv) *Transfer fonksiyonunun seçimi*: Transfer fonksiyonu, bir sinir hücresine gelen tüm sinyallerin ağırlıklı toplamalarının, sinir hücresinin tetiklenme seviyesini belirlemede kullanılır. Bazı fonksiyonlarda, örneğin adım fonksiyonunda, net uyarım bir eşik değeriyle karşılaştırılır ve tetikleme olup olmayacağı belirlenir. Çoğu uygulamada $(-\infty, +\infty)$ aralığında süreklilik ve türev alınabilirlik gibi özelliklerinden dolayı sigmoid fonksiyonu kullanılır. Moody ve Yarvin (1992), veri lineersizliği ve gürültüye bağlı olarak farklı transfer fonksiyonlarının farklı başarı oranlarına sahip olduğunu göstermiştir. Belirli bir transfer fonksiyonunun seçilmesinin diğerlerine göre avantajları teorik açıdan henüz tam olarak anlaşılamamıştır (Basheer ve Hajmeer 2000).

v) *Yakınsama kriteri*: Eğitmenin durdurulması için üç farklı kriter kullanılabilir. Bunlar; eğitim hatası, hatanın gradyanı ve doğrulamadır. Üçüncü kriter daha güvenilir olmasına karşın daha fazla hesaplama gerektirir ve genellikle çok sayıda veriye ihtiyaç duyulur. Yakınsama genellikle hata fonksiyonuna dayanır. Hata, istenen minimum değere ulaşana kadar eğitim devam eder. YSA'da eğitimde en yaygın olarak kullanılan durdurma kriteri, MSE'dir.

vi) *Eğitim çevrimlerinin sayısı*: Sinir ağı tarafından istenen genelleştirme yeteneğinin kazanılması için gerekli eğitim çevrimlerinin sayısı deneme yanılma yöntemiyle belirlenir. Herhangi bir YSA mimarisi için eğitim ve test hatası, her bir eğitim çevrimi için izlenir. Teorik olarak aşırı eğitim, eğitim verisinin tahmininde sıfıra yakın bir hata değeri verirken test verisindeki genelleştirme yeteneği önemli ölçüde azalabilir.

vii) *Eğitim modları*: Eğitim örnekleri, sinir ağına örnek tabanlı eğitim ve grup eğitim olmak üzere iki modun her hangi biri veya her ikisinin bir kombinasyonu ile uygulanabilir. Örnek tabanlı eğitim modunda, ağırlıklar her bir eğitim örneği uygulandıktan hemen sonra güncellenir. Burada, ilk örnek ağı uygulanır ve eğitim algoritması belirli sayıda yineleme için veya hata istenen bir seviyenin altına düşünceye kadar yürütülür. İlk örnek eğitildikten sonra ikincisi uygulanır ve işlem devam eder. Grup eğitimde ise ağırlık güncellemesi, tüm eğitim örnekleri sinir ağına uygulandıktan sonra gerçekleştirilir. Böylece ilk eğitim çevrimi, tüm eğitim örneklerinin uygulanmasını içerir ve hatanın tüm eğitim örnekleri

boyunca ortalaması alınarak eğitime kuralına göre güncelleme yapılır. Daha sonra ikinci çevrimde tüm örnekler tekrar uygulanır ve işlem bu şekilde devam eder. İki eğitime modunun etkinliği probleme göre değişiklik gösterir.

viii) Gizli katman sayısı: Pek çok fonksiyon yaklaşımı problemde, sürekli fonksiyonlara yaklaşıklık sağlamak için tek gizli katman yeterlidir (Hecht-Nielsen 1990, Basheer 2000). Süreksizliklere sahip eğitime fonksiyonları için iki gizli katman gerekli olabilir. Gizli katmanların ve gizli katmandaki düğüm sayılarının belirlenmesi YSA tasarımındaki en önemli işlemlerden birisidir. Giriş ve çıkış katmanlarının aksine gizli katman büyüklüğü ve sayısı için her hangi bir ön bilgi bulunmaz. Gizli düğümler için optimal sayının bulunmasında en çok kullanılan yaklaşım, deneme yanılma yöntemidir. Genellikle az sayıda gizli düğümle başlanır ve istenen model doğruluğuna ulaşılan kadar artırılır. Sinir ağı büyüklüğünün optimize edilmesinde farklı bir yöntem GA yardımının kullanılmasıdır.

3.2.2. Genetik algoritmalar

Genetik algoritmalar, doğal seçim ve genetik kuralları kullanan basit, güçlü, genel amaçlı, türevden bağımsız global optimizasyon yöntemleridir. Optimum çözüm, en iyi olanın hayatta kaldığı seçici ortamda doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon olarak adlandırılan üç genetik işlemi içeren yeni çözümler incelenerek elde edilir. Amaç fonksiyonlarının türevinin alınabilir olması zorunluluğu olmadığı için, amaç fonksiyonu istendiği kadar kompleks olabilir.

GA'ları diğer geleneksel arama ve optimizasyon metotlarından ayıran temel faktörler şunlardır;

- Türev içermeyen bir teknik olmaları, problemde bağımsız şekilde uygulanmalarını mümkün kılar.
- Sürekli ve ayrık optimizasyon problemlerinde kullanılabilirler.
- Optimum çözüm için belirli kurallar yerine rasgele operatörler kullanılır.
- Tek bir nokta yerine noktaların oluşturduğu popülasyonla çalıştıklarından dolayı lokal minimumlara yakalanma riskleri azdır.
- Tasarım değişkenlerinin kendisi yerine kodlanmış şekliyle çalışırlar.

GA'nın adımları temel olarak özetlenecek olursa, ilk adım başlangıç popülasyonunun (gen havuzu) olası bir çözümün temsil edildiği bireylerle rasgele oluşturulmasıdır. Daha sonra başlangıç popülasyonunda bireylerin uygunluk değerleri hesaplanır ve en iyi bireylerin seçilmesiyle eşleştirme havuzu oluşturulur. Genetik havuzda yeni nesillerin elde edilmesi için bireyler çaprazlama işlemine tabii tutulur ve yeni nesillere mutasyon operatörü uygulanır. Bu işlem, durma için belirlenen kriter sağlanana kadar tekrarlanır.

3.2.2.1. Popülasyonun rasgele değerlerle başlatılması

GA'da ilk adım, verilen problem için olası çözümlere karşılık gelen başlangıç popülasyonunun oluşturulmasıdır. Genel olarak popülasyonda n adet birey vardır ve bireylerden çiftler oluşturulacağı için n çift sayıdır. Çoğu GA'da her bir çözüm için parametreleri tanımlamadan 0'lar ve 1'lerden oluşan ikili kodlu sonlu uzunlukta diziler kullanılır ve bunlar kromozom olarak adlandırılır. Her bir dizi, temsil ettiği parametre setine göre kodlanır. Böylece başlangıç popülasyonu, rasgele üretilmiş ikili diziler kümesi halini alır. Bireylerin ikili sayı dizisiyle ifade edilmesi en çok tercih edilen temsil şekli olmasına karşın, bunun yerine tamsayı veya reel sayılar da kullanılabilir. Bu çalışmada olduğu gibi, daha çok ikili düzenin tercih edilmesinin sebebi basit olması ve bilgisayarda daha kolay ve hızlı biçimde işlem yapılabilmesini mümkün kılmasıdır.

3.2.2.2. Popülasyondaki bireylerin uygunluklarının değerlendirilmesi

Bu adımda başlangıçta oluşturulan popülasyonun tüm bireyleri uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilir. Uygunluk fonksiyonu, amaç fonksiyonundan elde edilir. Uygunluk değerleri daha sonraki adımda genetik havuzun oluşturulmasında kullanılır.

3.2.2.3. Yeni popülasyonun oluşturulması

Biyolojik bir evrim sürecinde yeni popülasyon oluşumu, üç işlemin aynı anda gerçekleşmesiyle meydana gelir. Bunlar, en uygun ebeveynlerin doğal seçimi, çaprazlama ve mutasyondur. GA uygulamalarında da benzer şekilde yeni neslin

oluşturulması temel olarak üç evrede gerçekleşir. Burada temel amaç, yüksek uygunluk değerlerinde bireylere sahip yeni bir neslin oluşturulmasıdır. Bireylerin uygunluk derecelerine göre yeni bir popülasyon oluşturulur. Bu amaçla ilk olarak, doğal seçim evresi gerçekleştirilerek eşleştirme havuzu elde edilir ve diğer genetik operatörler kullanılarak popülasyon değişime uğratılır. Bu operatörler, biyolojik çaprazlama ve mutasyon işlemindekilere benzerdir ve GA’larda da sırasıyla çaprazlama ve mutasyon operatörleri olarak adlandırılır. Bu üç evre aşağıdaki kısımlarda verildiği gibi gerçekleşmektedir.

i) Doğal seçim evresi

Çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanmadan önce bireyler uygunluk değerlerine göre popülasyondan seçilir ve sonra yeni nesil oluşturma operatörü uygulanır. Başka bir ifadeyle başlangıç popülasyonundaki bireyler en yüksek uygunluk değerlerine sahip olanların belirlenmesi amacıyla olasılık kuralına göre seçilirler ve böylece yeni bir popülasyon oluşturulur. Doğal seçim, GA’da bireylerin uygunluk değerlerinin evrim sürecine etki ettiği tek bileşendir. Çok sayıda doğal seçim kuralı vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan kurallar aşağıda açıklanmıştır;

Rulet doğal seçimi: Bir kromozomun seçilme şansı, uygunluk derecesiyle orantılıdır. Bu yöntemde bir bireyin seçilme ihtimali aşağıdaki gibi bulunur;

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{k=1}^n f_k (k = 1, 2, \dots, n)} \quad (3.33)$$

Burada; n popülasyon büyüklüğü, f_i ise uygunluk fonksiyonudur. Bu yöntemle ortalamanın üzerinde uygunluk değerine sahip bireyler, ortalamanın altında değere sahip olanlarla değiştirilir. Her bir nesildeki toplam dizi sayısı, hesaplama verimi için sabit tutulduğundan daha düşük uygunluk değerine sahip olan diziler elenirken diğerleri sonraki nesile kopyalanır.

Turnuva doğal seçimi: Rulet seçimi, turnuva büyüklüğü olarak verilen N sayısı kadar tekrarlanır ve kromozomlardan bir turnuva alt seti elde edilir (Goldberg ve Deb 1991). Bu alt setteki en iyi kromozom seçilerek doğal seçime ek bir seçme işlemi yaptırılır ve rulet doğal seçiminin daha gelişmiş bir şekli ortaya çıkar.

En iyi yüzdenin doğal seçimi: Popülasyonun en iyi uygunluk değerine sahip yüzde N 'lik kısmından rasgele kromozom seçimi yapılır.

En iyinin doğal seçimi: En iyi kromozom seçilir. Eğer aynı uygunluk değerinde iki veya daha fazla kromozom varsa birisi rasgele seçilir.

Rasgele doğal seçim: Popülasyondan rasgele bir kromozom seçilir.

Doğal seçim evresi esnasında isteğe bağlı olarak “elitizm” stratejisi de kullanılabilir. Burada, uygunluk değerlendirmesiyle belirlenen en iyi kromozomlar direkt olarak sonraki nesile aktarılır. Böylece her nesilde en iyi kromozomların korunması sağlanmış olur. Orijinal popülasyondaki en iyi kromozomlar, aynı zamanda doğal seçim ve çaprazlama işlemi için de kullanılır. Ancak bu işlem, tüm bireylerin daha çok birbirine benzemesini sağlayacağı için çözüm her zaman optimal olmaz.

ii) Çaprazlama evresi

Çaprazlama, GA'lardaki en önemli arama operatörüdür. Çaprazlamanın amacı ebeveynlerden gelen iyi karakteristiklerin yeni bireylere aktarılması için farklı ebeveynlerdeki parçaların birleştirilmesidir (Holland 1975). Yeni bireylerin oluşturulması için kromozomların bulunduğu eşleştirme havuzundan iki tane kromozom seçilerek rasgele şekilde eşleştirilir ve $n/2$ adet genetik çift elde edilir. Çaprazlama işleminde yeni kromozom, her bir ebeveynin en iyi karakteristiklerini almışsa onlardan daha iyi olabilir. Çaprazlama işlemi, çaprazlama olasılığı P_c 'ye bağlı olarak meydana gelir ve bir popülasyonda ne kadar kromozomun çaprazlamaya tabii tutulacağını belirler. P_c genellikle $[0.6, 0.9]$ aralığında seçilir (Schaffer ve ark. 1989). En yaygın kullanılan çaprazlama operatörleri şunlardır;

Tek nokta çaprazlama: Kromozomda rasgele bir çaprazlama noktası seçilir ve yeni nesiller oluşturmak için iki ebeveyn kromozomun yerleri bu noktadan itibaren değiştirilir.

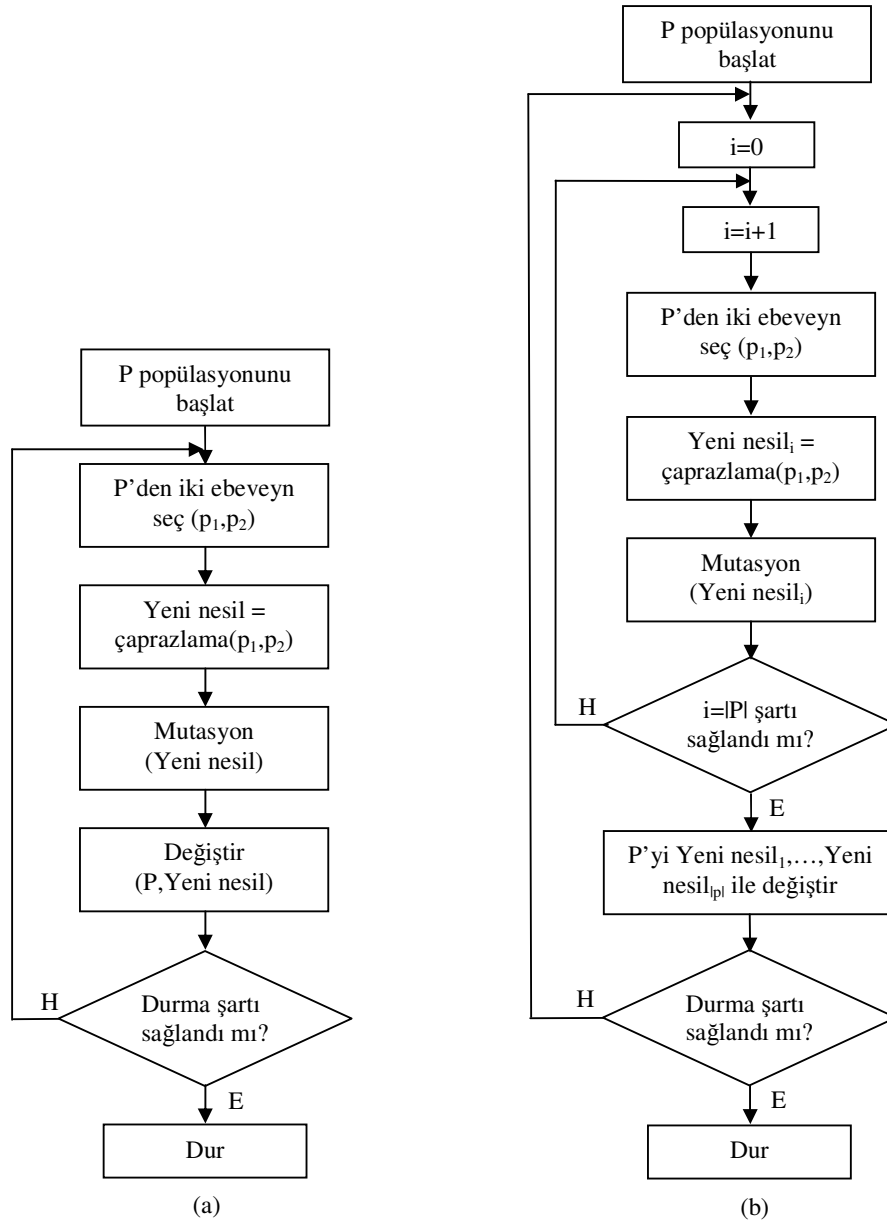
İki nokta çaprazlama: Kromozomda rasgele iki çaprazlama noktası seçilir ve iki yeni nesil oluşturacak şekilde bu noktalar arasında iki ebeveynin kromozomları değiştirilir.

Düzenli çaprazlama: Yeni nesil kromozomlarında her bir gen değerinin hangi ebeveyn tarafından sağlanacağına karar verilir. Bu işlem, karışma oranı olarak adlandırılan bir olasılık değerine göre yapılır ve ebeveyn kromozomlarının karışmasının önceki yöntemlerdeki gibi parça düzeyinde değil bit düzeyinde olması sağlanır.

iii) Mutasyon evresi

Çaprazlama işlemini, bit dizisinde daha fazla değişikliğe neden olan ve popülasyonda genetik çeşitlilik meydana getiren mutasyon evresi takip eder. İlk olarak Holland (1975) tarafından ortaya atılan yöntemde popülasyona, ebeveynlerden gelmeyen ve çaprazlamada ortaya çıkmayan yeni genetik materyal ilave edilir. Böylece gen havuzuna yeni gen değeri eklenmesiyle GA'nın daha önceden elde edilemeyen daha iyi sonuçlara ulaşması hedeflenir. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemde, mutasyona uğrayacak bireyler bit dizisinden rasgele seçilir ve bu bitler 1 ise 0, 0 ise 1 şeklinde değiştirilir. GA'larda mutasyon operatörü olarak kullanılan P_m , mutasyon hızını düşürmek amacıyla genellikle [0.001,0.01] aralığında düşük bir değerde seçilerek iyi kromozomların korunma şansı artırılır (Holland 1975). Mutasyon operatörünün kullanılması popülasyonun yerel optimuma yakınsamayı önlemesine yardımcı olur. Çaprazlama ve mutasyon evreleri birlikte GA'lara arama etkinliğini kazandırırken, mutasyon bu arama etkinliğinin artmasına katkı sağlar. Bu üç evreden sonra, elde edilen popülasyondaki yapılar değerlendirilir ve yeni popülasyonlar ortaya çıkar. Oldukça fazla sayıdaki popülasyondan en iyi bireyler seçilir. GA'da uygunluk fonksiyonunun seçimi çok önemlidir. Çünkü bu değer doğal seçim işleminin temelini oluşturur.

GA tasarımıda önemli konulardan birisi, genetik işlemlerin kontrolünde kullanılan prosedürdür. Bunun için sürekli durum ve nesile dayalı prosedürler olmak üzere iki farklı yöntem kullanılır. Şekil 3.22(a)'da verilen sürekli durum ve Şekil 3.22(b)'de verilen nesile dayalı prosedürler arasındaki en önemli fark popülasyonun güncellenmesinde kullanılan yöntemdir (Oh ve ark. 2004). Sürekli durum prosedüründe, genellikle her nesilde bir kromozom güncellenirken nesile dayalı prosedürde, popülasyonun tamamı veya büyük bir kısmı güncellenir. Bu fark, GA'nın geniş arama uzayında çözüme ulaşma etkinliğini büyük ölçüde etkiler.



Şekil 3.22 Genetik algoritmalarda (a) Sürekli durum (b) Nesile dayalı prosedürleri için akış şemaları

3.2.3. GA optimizasyonunun YSA'ya uygulanması

Araştırmacılar tarafından GA, YSA'da iki temel amaçla kullanılmıştır. İlk kullanım amacı, ağ mimarisinin tasarımındaki kullanımıdır. Ağ mimarisi, ağ performansını ve çözeceği problemleri büyük ölçüde etkiler. Lineer olmayan problemlerin çözümünde sinir ağının en azından bir gizli katman içermesi gerektiği

bilinmektedir. Ancak gizli katman sayısı ve büyüklüğü genellikle deneme yanılma yöntemiyle bulunur. GA'lar, bu parametrelerin ve bağlantı deseninin bulunması için kullanılabilir (Yao 1999). İkinci temel kullanım amacı, sinir ağındaki ağırlıkların bulunması veya eğitme setindeki en belirgin özelliklere sahip elemanlarının seçilmesi ile eğitme seti büyüklüğünün azaltılmasıdır.

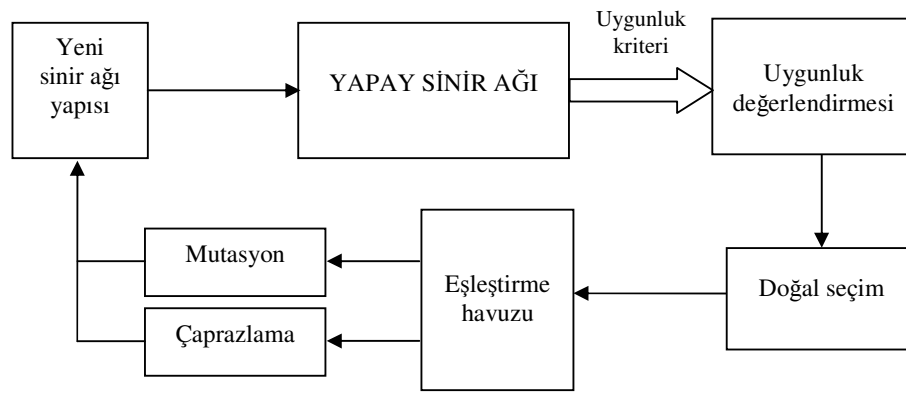
Yapılan çalışmada GA, sinir ağında gizli katmandaki sinir hücresi sayısının belirlenmesi ve eğitme seti büyüklüğünü azaltarak daha küçük boyutlu ve etkin bir veri setinin elde edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

- **YSA mimarisi tasarımında GA'nın kullanımı**

Çok katmanlı perseptron ağlarının performansı, kullanılan YSA mimarisinde ağ büyüklüğü, ağ yapısı ve bağlantılarla birlikte eğitme algoritmasında kullanılan eğitme hızı, momentum terimi gibi parametrelere bağlıdır. Katmanların sayısı ile ilgili olarak sinir ağında kesin olan tek şey YSA'ya verilerin aktarılabilmesi bir giriş katmanı ve YSA'dan verilerin elde edileceği bir çıkış katmanının bulunmasıdır. Bu katmanlardaki sinir hücresi sayıları probleme bağlı olduğundan önceden bilinir. Ancak her problem için gizli katmanların veya gizli katmandaki sinir hücrelerinin teorik olarak belirlenmesi mümkün değildir. Ağ mimarisinin belirlenmesinde en yaygın kullanılan metot, deneme yanılma yöntemidir. Bu metodun uygulanması, en uygun mimariye ulaşılan kadar değişiklikler yapılarak sinir ağının test edilmesine dayanır. Ancak bu işlem çok uzun zaman gerektirir ve çok farklı performans kriterleri aynı anda değerlendirildiği için en iyi sonuçlara erişilmesini garanti etmez. Sinir ağı mimarisinde bu amaçla pek çok araştırmacı tarafından GA optimizasyonu kullanılmıştır (Balakrishnan ve ark. 1995, Branke 1995, Mendes ve ark. 1997). Şekil 3.23'te, ağ bileşenlerinin GA ile optimizasyonunun gerçekleştirildiği temel bir blok diyagramı verilmiştir.

YSA'nın GA yardımıyla tasarlanmasında her bir birey, çözülmek istenen probleme karşılık gelen bir ağ bileşenidir. Evrim süreci, ağ bileşeni için rasgele belirlenen değerlerden oluşan popülasyonla başlatılır. YSA, aynı eğitme veri seti kullanılarak eğitilir ve eğitme sırasında ortalama karesel hata, ağ büyüklüğü gibi kalite kriterleri, performansın değerlendirilebilmesi amacıyla GA'ya aktarılır. Her ağ için uygunluk değeri, performansa göre hesaplanır. Uygunluk değerine göre her ağ

bileşeni belli sayıda yeni nesile sahiptir. Belirli bir doğal seçim yöntemi kullanılarak uygunluk değerlerine göre popülasyon büyüklüğüne ulaşılan kadar ağ bileşenlerinin seçimi yapılır ve seçilen ağ bileşenleri eşleştirme havuzuna konulur. Burada mutasyon ve çaprazlama gibi operatörler kullanılarak yeni nesiller ebeveynlerin karakteristiklerine de bağlı olacak şekilde elde edilir. Bu işlem, istenen bir performans seviyesine ulaşılan kadar devam eder. Evrim esnasında en iyi bireyler ve bazı istatistiksel veriler sürecin değerlendirilebilmesi için saklanır (Mandischer 1993).



Şekil 3.23 YSA'nın GA ile optimizasyonu için temel blok diyagramı

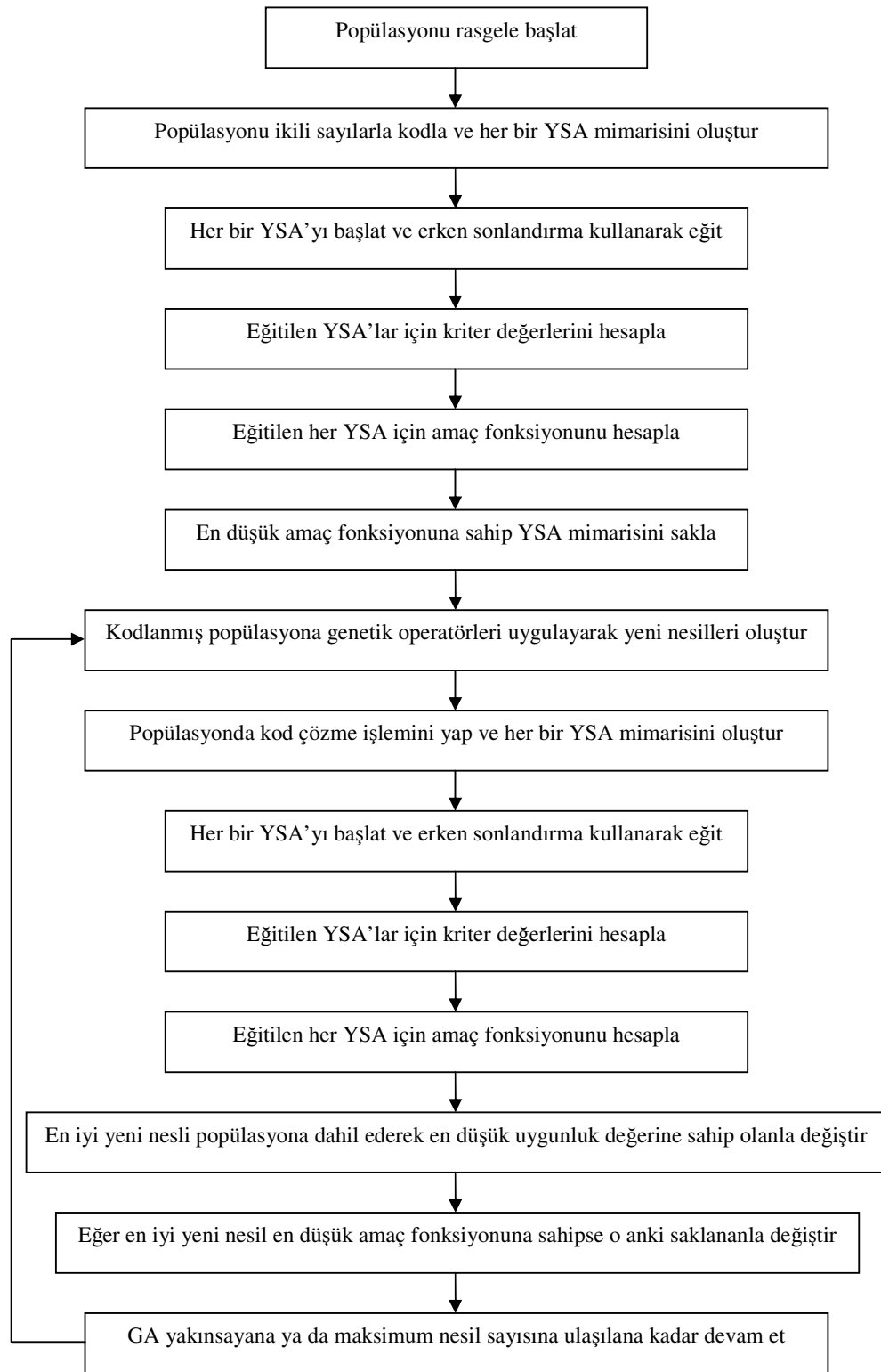
YSA'da gizli katmandaki sinir hücresi sayısının belirlenmesinde kullanılan metot, temel olarak Şekil 3.24'te görülen algoritma ile verilebilir (Benardos ve Vosniakos 2007). Bu algoritma, aşağıdaki adımları içermektedir.

i) Sadece gizli düğüm sayılarının kromozomda kodlandığı, rasgele bir başlangıç popülasyonu oluşturulur.

ii) Başlangıç popülasyonunda, kod çözme işlemi yapılır ve farklı büyüklükte YSA mimarileri oluşturulur.

iii) Bu modellerin her birinde ağırlıklar rasgele şekilde başlatılır ve erken sonlandırma yöntemi kullanılarak Levenberg-Marquardt algoritmasıyla eğitilir.

Giriş veri seti; eğitime, doğrulama ve test setleri olarak üç alt sete bölünür. İlk alt set YSA'yı eğitmek için kullanılırken, doğrulama alt seti, hata belirli sayıdaki epok boyunca sabit kalırsa veya hızlı şekilde artmaya başlarsa, eğitmenin durdurulması ve böylece verinin ezberlenmesinin önüne geçilmesi için kullanılır.



Şekil 3.24 YSA'da gizli sinir hücresi sayısının bulunmasında GA'nın kullanılması

Test alt seti, eğitime tamamlandıktan sonra YSA modelinin genelleştirme yeteneğini değerlendirmede kullanılır.

iv) Eğitilen her YSA mimarisi için performansı belirleyen kriterler hesaplanır.

v) Bu değere göre her yapay sinir ağı için amaç fonksiyonu hesaplanır ve en düşük değere sahip olanlar saklanır.

vi) Evrim süreci; uygunluk değeri, doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanarak başlatılır ve yeni nesiller oluşturulur.

vii) Bu adımda yeni nesiller için ii-v adımları tekrarlanır.

viii) Yeni nesil popülasyona eklenerek en düşük uygunluk değerine sahip ebeveynlerle değiştirilir. Daha önceden saklanan en iyi YSA modeli, en iyi yeni nesil YSA modeli ile karşılaştırılarak daha iyi olanı saklanır.

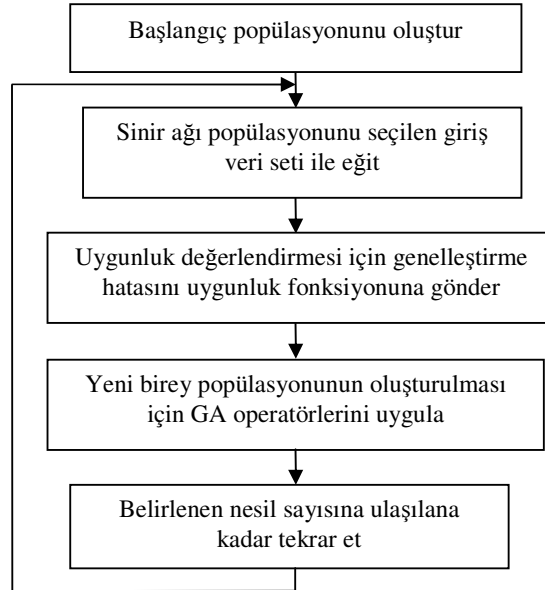
ix) GA yakınsayana kadar veya maksimum nesil sayısına ulaşılan kadar vi-viii adımları yürütülür.

- **Giriş örnek setinde GA'nın kullanılması**

Giriş örneklerinde GA, yapay sinir ağının tüm giriş setinin azaltılarak daha düşük boyutlu ve etkin bir veri setine dönüştürülmesini sağlayabilir. Bu işlem, boyutun azaltılması için evrimsel bir yaklaşımdır. Pek çok durumda sinir ağının giriş ve çıkışları probleme göre tespit edilir. Örneğin; bir maksimum güç noktası izleyicide kullanılan sinir ağında, ortam sıcaklığı ve ışık şiddeti olmak üzere iki giriş, maksimum akım ve/veya maksimum gerilim noktaları olarak da bir veya iki çıkış bulunabilir. Giriş verilerinin deneysel yöntemlerle elde edilmesi, gürültü gibi sebeplerden dolayı giriş verisinde genelleştirme yeteneğini azaltmakta, eğitim sonucunda ağ etkinliğini düşürecek verilerin bulunmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle giriş veri seti içinden daha az elemana sahip optimal bir alt veri setinin bulunması amacıyla GA'lar kullanılabilir. GA, giriş veri setine bazı değerleri ekler, bazılarını da çıkarır ve böylece en düşük hata değerini elde etmeyi amaçlar. Literatürde yapılan çalışmalarda, giriş sayısının GA yaklaşımı kullanılarak azaltılmasıyla, tüm giriş setinin kullanılmasından daha iyi performans elde edildiği gösterilmiştir (Brill ve ark. 1992, Guo ve Uhrig 1992).

Giriş örneklerinin GA ile optimizasyonunda popülasyondaki her bir birey, optimizasyon problemi için çözülmesi gereken parametre olan veri alt setini temsil eder. GA'da bireyler, genellikle n -bit ikili vektörler kullanılarak gösterilir. Böylece arama uzayı n -boyutlu boolean uzayına karşılık gelir. Her bir nesilde bir bireyin yani giriş verisi alt setinin değerlendirilmesi YSA'nın eğitilmesini ve sonucun uygunluk fonksiyonunda kullanılmasını gerektirir.

Sinir ağlarında kullanılan GA tabanlı giriş veri seti optimizasyonu için akış diyagramı Şekil 3.25'te verilmiştir. Burada GA, bir başlangıç popülasyonu oluşturmakta ve sinir ağını her bir kromozom için eğiterek bu popülasyonu değerlendirmektedir. Daha sonra en iyi giriş parametrelerini aramak için çok sayıda nesille popülasyonun gittikçe gelişmesini sağlamaktadır. Eğitilen ağı o anki veri seti kullanılarak elde edilen genelleştirme performansı, uygunluk fonksiyonu değeri olarak GA'ya aktarılır. Yeni bireyleri içeren popülasyonun oluşturulması için GA, belirli bir nesil sayısına ulaşılan kadar yürütülür. Değerlendirme, popülasyondaki her bir birey için gerçekleştirilir. Böylece giriş setinde GA optimizasyonu, model oluşturmada kullanılan verilerden en gerekli ve önemli olanlarının bulunması için adaptif bir yol izlenmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.25 YSA'da giriş veri seti optimizasyonu için akış diyagramı

GA'lar bir sonraki nesil için bireylerin oluşturulmasında daha önceki kısımda açıklandığı gibi bireylerin uygunluk değerine bağlı olan olasılık doğal seçimini kullanır. Seçilen bireyler yeni neslin oluşturulması için genetik operatörlere maruz kalırlar ve genetik operatörler çözüme ulaşmak için arama uzayında algoritmanın arama yapmasına izin verir. Uygunluk değerine bağlı olarak gerçekleştirilen doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerin uygulanması işlemi, istenen bir çözüm bulununcaya kadar tekrarlanır (Yang ve Honavar 1998). Pratikte GA'ların performansını, genetik gösterim ve operatörlerin seçimi, uygunluk fonksiyonu, uygunluk değerine bağlı doğal seçim prosedürü ve popülasyon büyüklüğü, farklı genetik operatörlerin uygulanma olasılığı gibi faktörler etkiler.

3.3. İnverterler ve PWM Kontrol Metotları

PV panellerden elde edilen DC gücün AC'ye dönüşümü inverterlerle gerçekleştirilir. PV sistemlerde şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı olmak üzere iki tip inverter kullanılır. İnverterler birbiriyle benzerlikler gösterse de kontrol fonksiyonları bakımında farklılıklara sahiptir ve her iki tip için de enerji dönüşüm verimi çok önemlidir. Bu çalışmanın da konusu olan şebekeden bağımsız PV sistemlerdeki inverterler aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır (Nayar ve ark. 2001).

- Sinüzoidal çıkış gerilimi
- Gerilim ve frekansın izin verilen sınırlarda tutulması
- DC giriş geriliminden optimum faydalanma
- Çıkış gerilimi regülasyonu
- Elektrik yüklerinin zarar görmemesi için düşük harmonik üretimi
- Pompa ve soğutucu gibi yüklerdeki yüksek kalkınma akımlarındaki kısa süreli aşırı yüklenmelere dayanması

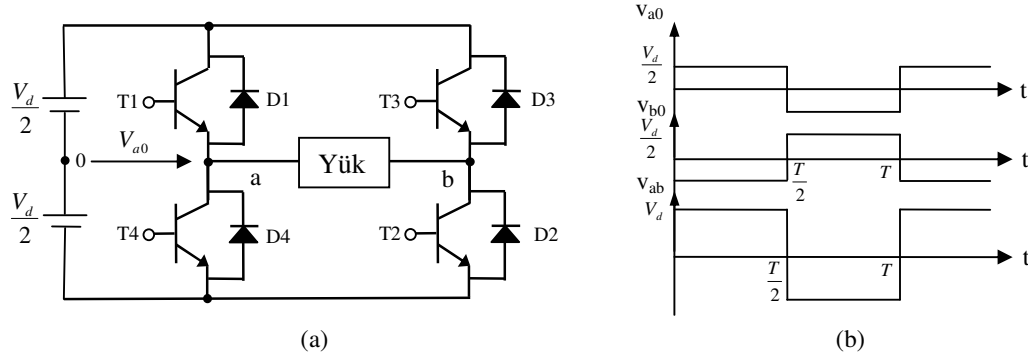
3.3.1. İnverterler

İnverterler, yarı iletken güç elemanlarının uygun şekilde kontrol edilmesiyle DC gücü AC güce dönüştüren statik sistemlerdir. DC gerilim, AC şebekeden alınan gerilimin doğrultulup filtrelenmesiyle veya PV paneller, yakıt pilleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından ya da akülerden elde edilebilir. Çıkış gerilimi, tek

fazlı veya çok fazlı olabilir ve dalga şekli kare, sinüs veya PWM dalga formunda olabilir. İnverterler, genelde gerilim beslemeli ve akım beslemeli inverterler olarak iki kısma ayrılırlar. Bu çalışmada gerilim beslemeli inverter kullanıldığı için bu tip inverterler üzerinde durulacaktır.

- **Tek fazlı gerilim beslemeli inverterler**

DC kaynaktan AC formda gerilim üretmek için kullanılan temel bir tek fazlı gerilim beslemeli tam köprü inverter devresi Şekil 3.26(a)'da ve çıkış gerilimi dalga şeklinin değişimi de Şekil 3.26(b)'de verilmiştir. Devre dört anahtarlama elemanı içermektedir. T_1 ve T_2 transistörleri aynı anda iletimdeyken, yük uçlarında $+V_d$ gerilimi görülür. T_3 ve T_4 transistörleri aynı anda iletime sokulduğunda ise, yük uçlarındaki gerilim $-V_d$ olur. Böylece yük uçlarında AC çıkış gerilimi elde edilir. Güç anahtarlama elemanlarına paralel olarak bağlanan ters akım diyotları omik-endüktif yüklerde iletime girer ve yük üzerindeki enerji, bu diyotlar üzerinden DC kaynağa geri verilir. Böylece bu diyotlar, endüktif yük akımının kesilmesi esnasında oluşan yüksek gerilim tepelerinin anahtarlama elemanına zarar vermesini önler.



Şekil 3.26 Tek fazlı tam köprü inverter için (a) devre şeması (b) gerilim dalga şekilleri

Şekildeki değişimden yük uçlarındaki gerilimin efektif değeri (V_{ab}) aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_{ab} = \left(\frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_d^2 dt \right)^{1/2} = V_d \quad (3.34)$$

Çıkış geriliminin dalga şekli Fourier serisine açılırsa ani çıkış gerilimi,

$$V_{ab}(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_d}{n\pi} \sin n\omega t \quad (3.35)$$

olarak bulunur. (3.35) denkleminde $n=1$ için, temel bileşenin efektif değeri,

$$V_{ab1} = \frac{4V_d}{\sqrt{2\pi}} = 0.9V_d \quad (3.36)$$

olarak elde edilir.

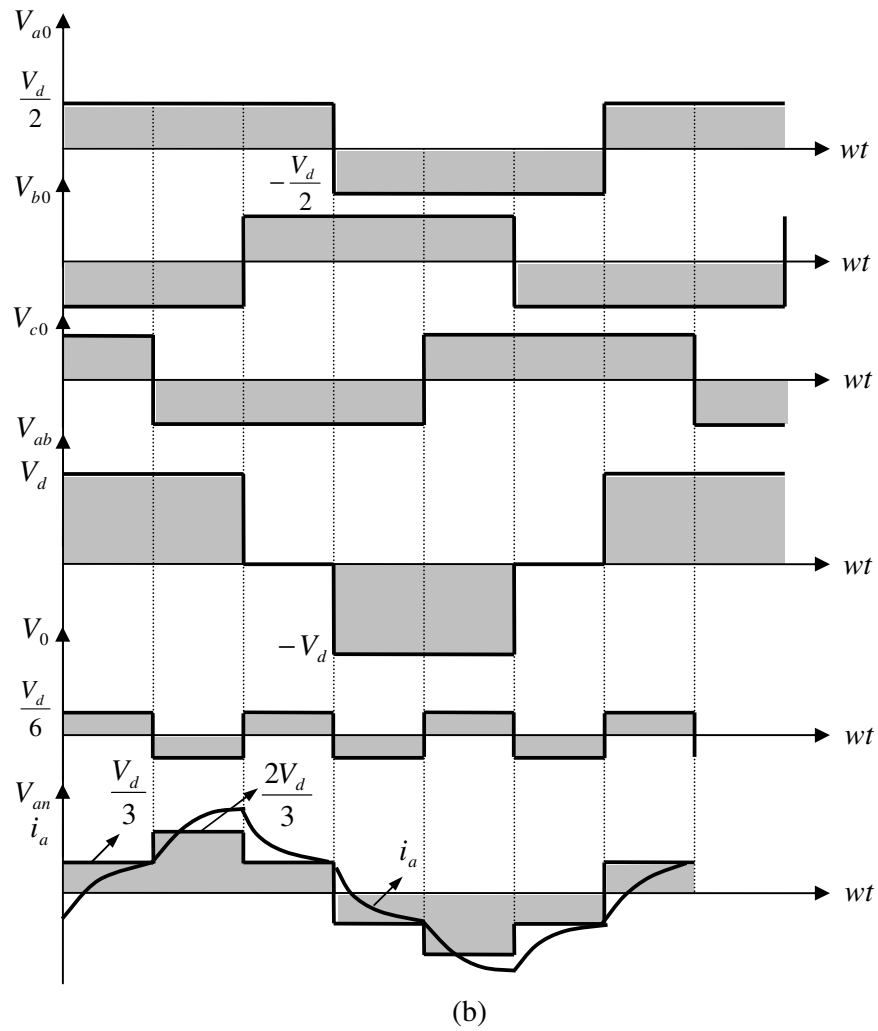
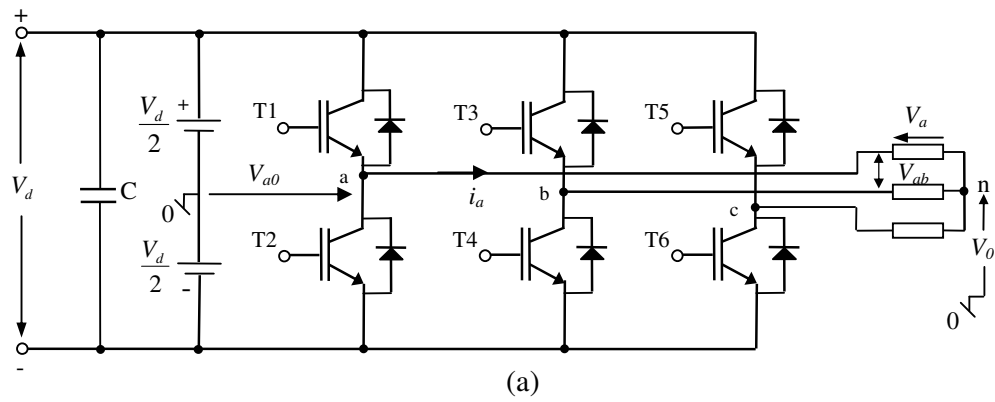
- **Üç fazlı gerilim beslemeli inverterler**

Sabit bir DC gerilimden üç fazlı AC çıkış gerilimleri üretmek için üç fazlı inverterler kullanılır. Standart bir üç fazlı gerilim beslemeli inverter yapısı Şekil 3.27(a)'da görülmektedir. Burada V_a , V_b ve V_c inverter çıkış gerilimleri, V_d DC kaynak gerilimi ve T1-T6 elemanları ise çıkış geriliminin oluşturulmasını sağlayan altı adet güç anahtarlama elemanıdır. Devrede her bir anahtarlama elemanı 180° süresince iletimde kalmaktadır. Üst koldaki anahtarlama elemanlarından birisi kesime girdikten sonra karşılık gelen alt koldaki anahtarlama elemanı, ölü zaman değeri kadar sonra ilettime sokulur. Böylece aynı fazdaki iki anahtarlama elemanının aynı anda ilettime girmesi ve DC giriş kaynağının kısa devre olması engellenir.

DC hattın orta noktasına göre tanımlanan her bir inverter faz geriliminin genliği, üstteki eleman iletimde ise $+V_d/2$, alttaki eleman iletimde ise $-V_d/2$ değerindedir. İnverter faz gerilimi dalga şekli Şekil 3.27(b)'de görüldüğü gibi $\pm V_d/2$ genliğinde bir kare dalgadır. Buna göre her bir faz geriliminin Fourier serisi tüm tek harmonikleri içerir ve a fazı için kaynağın orta noktasına göre elde edilen inverter ve yük faz gerilimleri sırasıyla,

$$\begin{aligned} V_{a0}(t) &= \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right] \\ V_a(t) &= \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} \left[\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right] \end{aligned} \quad (3.37)$$

şeklinde verilebilir.



Şekil 3.27 Üç fazlı gerilim beslemeli inverterin (a) devre şeması (b) çıkış gerilimi dalga şekilleri

Şekil 3.27(b)'den, fazlar arası gerilimin Fourier serisi ile ifadesi,

$$V_{ab}(t) = \sqrt{3} \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} \left[\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \dots \right] \quad (3.38)$$

olarak bulunur. Buradan faz gerilimi ve fazlar arası gerilimin temel bileşeninin maksimum genliği sırasıyla,

$$V_{a1m} = \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} = 0.636V_d \quad (3.39)$$

$$V_{ab1m} = \sqrt{3} \frac{4}{\pi} \frac{V_d}{2} = 1.1 V_d \quad (3.40)$$

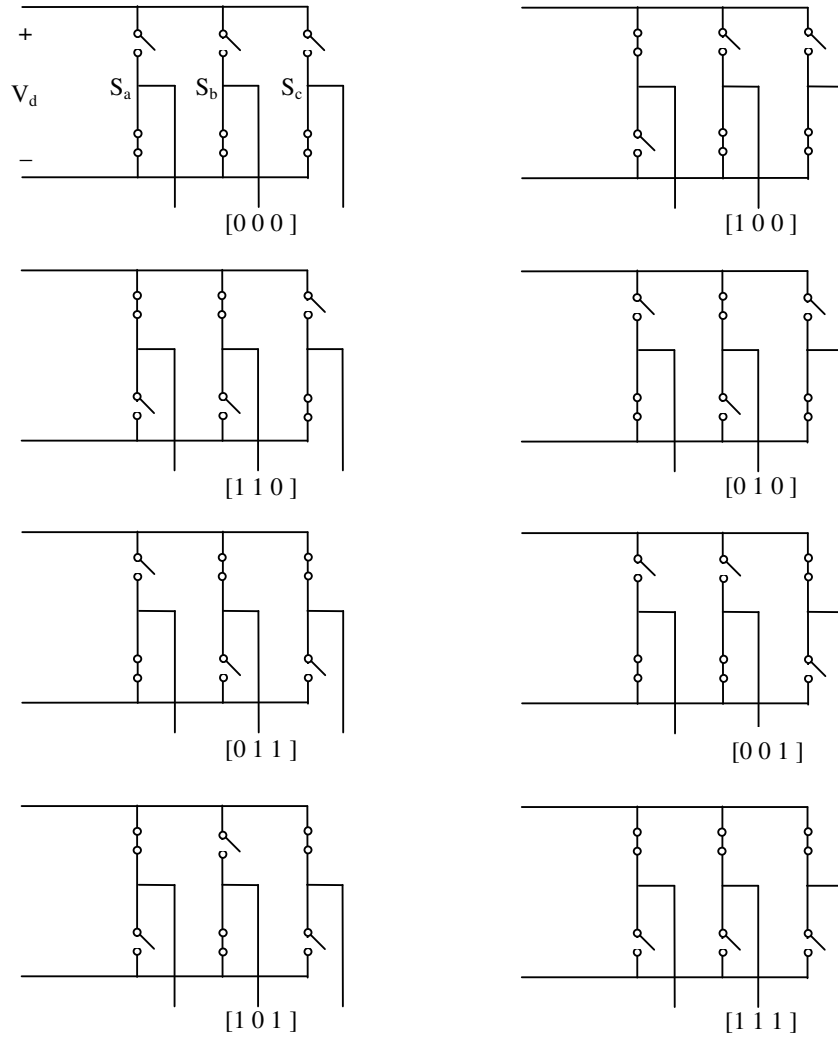
olarak yazılabilir. (3.37) ifadesi ile verilen inverter faz gerilimi, üç ve üçün katı harmonikleri içerirken, yükün nötr noktasının izolasyonu sayesinde yük uçlarındaki faz gerilimleri ve (3.38) denkleminde görüldüğü gibi fazlar arası gerilimler üç ve üçün katı harmonikleri içermezler (Akkaya 1995, Bose 2002).

S_a , S_b ve S_c her bir faz kolunda anahtarlama durumunu gösteren değişkenler olarak ifade edilirse, yük uçlarındaki faz gerilimleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_d \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Burada a fazı için üstteki anahtar iletimde ise $S_a=1$, alttaki anahtar iletimdeyse $S_a=0$ değerini alır. Benzer durumlar b ve c fazları için de geçerlidir.

Şekil 3.27'deki inverterde, üst veya alt kollardan birinin iletimde diğerinin kesimde olması durumu için Şekil 3.28'de görüldüğü gibi sekiz farklı anahtarlama durumu mümkündür. Üç fazlı AC çıkış gerilimi elde etmek için inverterin şekilde gösterilen sekiz anahtarlama durumunun altısı arasında anahtarlanmasıyla gerçekleştirilen çalışma, "kare dalga çalışma modu" olarak adlandırılır. Kalan iki durum (111 ve 000), sıfır durumdur ve bu durumlarda tüm fazlar, (111) için DC kaynağın pozitif ucuna, (000) için de DC kaynağın negatif ucuna bağlandığından çıkış gerilimi sıfır olur.



Şekil 3.28 Üç fazlı gerilim beslemeli inverterin anahtarlama durumları

Sekiz anahtarlama durumunun kombinasyonu ve DC kaynak gerilimi V_d 'ye göre faz ve fazlar arası çıkış gerilimleri, Tablo 3.1'de verilmiştir. Tabloda gölgeli şekilde gösterilen kısımlar kare dalga çalışma modunu göstermektedir. İstenen bir gerilim dalga şeklinin elde edilmesi için inverter Tablo 3.1'deki anahtarlama durumları arasında geçiş yapar ve sonuçtaki fazlar arası AC çıkış gerilimleri, Şekil 3.27'de verilen inverter yapısı için V_d , 0 ve $-V_d$ ayırık değerlerini içerir. Çıkış geriliminin sıfır olduğu (000) ve (111) anahtarlama durumu uygun şekilde kullanarak çıkış gerilimi kontrol edilebilir. İstenen çıkış dalga şeklinin oluşturulması için inverterin kontrolü, sadece uygun anahtarlama durumlarının kullanıldığı modülasyon teknikleri ile sağlanır.

Tablo 3.1 Sekiz farklı anahtarlama durumu için faz ve fazlar arası çıkış gerilimleri

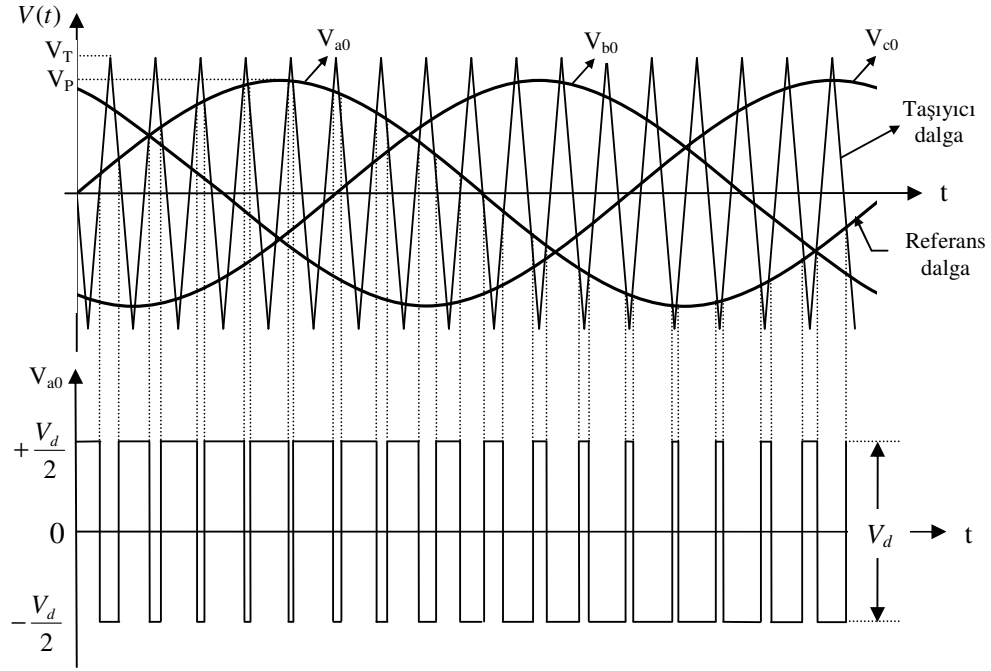
Anahtarlama durumları			Faz gerilimleri			Fazlar arası gerilimler		
S_a	S_b	S_c	V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$2/3 V_d$	$-1/3 V_d$	$-1/3 V_d$	V_d	0	$-V_d$
1	1	0	$1/3 V_d$	$1/3 V_d$	$-2/3 V_d$	0	V_d	$-V_d$
0	1	0	$-1/3 V_d$	$2/3 V_d$	$-1/3 V_d$	$-V_d$	V_d	0
0	1	1	$-2/3 V_d$	$1/3 V_d$	$1/3 V_d$	$-V_d$	0	V_d
0	0	1	$-1/3 V_d$	$-1/3 V_d$	$2/3 V_d$	0	$-V_d$	V_d
1	0	1	$1/3 V_d$	$-2/3 V_d$	$1/3 V_d$	V_d	$-V_d$	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

3.3.2. Üç fazlı gerilim beslemeli inverterlerde kullanılan PWM metotları

Darbe genişlik modülasyonu (PWM), istenen çıkış frekansı ve gerilimi için yarı iletken güç elemanlarının uygun şekilde anahtarlanmasıyla gerilim darbelerinin üretildiği bir yöntemdir. Sabit frekanslı motor sürücülerle karşılaştırıldığında PWM kontrollü inverterler, daha yüksek verim ve daha iyi performansa sahiptirler. Tipik bir modülatör, PWM periyodu içerisinde referans gerilime eşit bir ortalama gerilim değeri üretir. PWM periyodunun çok kısa olduğu dikkate alındığında referans gerilim, anahtarlanan darbe örneğinin temel bileşenini verir. Çıkış geriliminin üretilmesi için kullanılan çok sayıda metot arasında başlıcaları sinüzoidal PWM (SPWM), seçilmiş harmonik eliminasyonlu PWM (SHE-PWM), histerezis bandlı PWM ve uzay vektör modülasyonu (UVM) metotlarıdır. Sinüzoidal PWM ve histerezis bandlı PWM metodu analog yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilirken diğer yöntemler mikroişlemci veya DSP kullanımını gerektirir.

- **Sinüzoidal PWM metodu**

Sinüzoidal PWM metodu, endüstriyel dönüştürücülerde çok yaygındır ve literatürde geniş şekilde yer almaktadır (Pollmann 1986, Ogasawara ve ark. 1989, Holtz 1992). Bu metotta, Şekil 3.29’da görüldüğü gibi bir üçgen taşıyıcı dalga, f temel frekansında sinüzoidal modülasyon dalgası ile karşılaştırılır. Taşıyıcı ve modülasyon dalgalarının kesişme noktaları, güç elemanlarının anahtarlanma anlarını belirler. Çıkış dalgasının darbe genişlikleri sinüzoidal şekilde değiştiği için ortalama veya temel frekans bileşeni f ile aynı, genliği ise modülasyon gerilimiyle orantılıdır. Şekil 3.29’da görüldüğü gibi aynı taşıyıcı dalga üç faz için de kullanılır.



Şekil 3.29 Üç fazlı inverter için sinüzoidal PWM metodu ve V_{a0} faz geriliminin değişimi

Şekil 3.29'daki V_{a0} dalgasının Fourier açılımı aşağıdaki gibi verilebilir.

$$V_{a0} = M \frac{V_d}{2} \sin(\omega t + \phi) + \text{yüksek frekanslı harmonik bileşenler} \quad (3.42)$$

Burada M , modülasyon faktörü, ω temel dalga frekansı, ϕ faz kaymasıdır. Modülasyon faktörü M , referans dalganın genliğinin taşıyıcı dalganın genliğine oranı olarak ifade edilir;

$$M = \frac{V_P}{V_T} \quad (3.43)$$

burada V_P sinüzoidal modülasyon sinyalinin genliği, V_T taşıyıcı dalganın tepe değeridir. $V_T = \text{sbt}$ olup V_P genliği değiştirilmek suretiyle modülasyon faktörü $0 \leq M \leq 1$ aralığında kontrol edilebilir (Bose 2002).

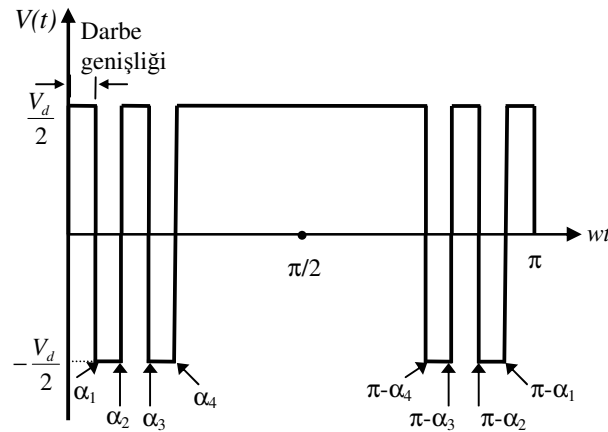
Yüksek taşıyıcı frekansında inverter hat akımı harmonikleri yükteki endüktans bileşeni ile filtrelenerek sinüs dalgaya oldukça yakın bir değişim gösterir. Taşıyıcı frekansının seçimi, inverter kayıpları ve yükte meydana gelecek harmonik kayıplara göre yapılır. Frekans arttıkça inverter anahtarlama kayıpları artar ancak

yükteki harmonik kayıplar azalır. Optimum frekans değeri, toplam sistem kaybı göz önünde bulundurularak belirlenir. Anahtarlama frekansının belirlenmesinde önemli bir etki de akustik gürültünün oluşumudur. Bunu önlemek için anahtarlama frekansı değişken yapılabilir, ya da duyulabilir aralığın üzerindeki frekanslara çıkılabilir. Alçak geçiren filtrelerin kullanılması ile de bu problem giderilebilir (Kulaksız 2001).

- **Seçilmiş harmonik eliminasyonlu PWM**

Seçilmiş harmonik eliminasyonlu PWM (SHE-PWM) kullanılarak, seçilen harmoniklerin çok az sayıda anahtarlama kullanılarak elimine edilmesi mümkündür. Bu tekniğin temel avantajı, yüksek gerilim kazancı ve düşük anahtarlama frekansına sahip olmasıdır (Akkaya ve Kulaksız 2004).

SHE-PWM algoritması, Newton iterasyonuna dayanır. Şekil 3.30'da pozitif yarım periyodu verilen faz gerilimi dalga şekillerinde, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$ değerlerine sahip m adet anahtarlama açısı hesaplanarak, $(m-1)$ sayıda seçilmiş harmoniklerin elimine edilmesi ve temel gerilimin kontrolü sağlanır. Anahtarlama açılarının sayısı artırılarak daha fazla sayıda harmonik bileşenin elimine edilmesi mümkündür.



Şekil 3.30 SHE-PWM metodu için faz gerilim dalga şekilleri

Bu metodun temel özelliği dalga şekli analizinin Fourier domeninde yapılmasıdır. Dalga şekilleri, Fourier serisine açılırsa aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (3.44)$$

Çeyrek periyottaki simetriden dolayı, b_n katsayıları ve n 'in çift katlı harmonikleri sıfır olacağından sadece sinüs bileşenler mevcuttur. Böylece;

$$a_n = 0$$

$$v(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (3.45)$$

$$\text{burada} \quad b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} v(t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (3.46)$$

Bose (2002) tarafından verilen integrasyon ve hesaplamalardan sonra b_n için (3.47) ile verilen denklem elde edilir.

$$b_n = \frac{4V_d}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \quad (3.47)$$

Buradan (3.48) ile verilen denklem sistemine ulaşılır.

$$\begin{aligned} \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \dots \pm \cos(\alpha_k) &= \frac{\pi}{4V_d} h_1 \\ \vdots & \\ \cos(n\alpha_1) - \cos(n\alpha_2) + \dots \pm \cos(n\alpha_k) &= \frac{n\pi}{4V_d} h_n \end{aligned} \quad (3.48)$$

Burada n üç fazlı sistemler için üç ve üçün katları dışındaki tek sayılar, α_k anahtarlama açıları, h_n çıkış geriliminin tek sayı harmonik bileşenlerinin genliği, h_1 çıkış geriliminin temel bileşeninin genliği, V_d DC gerilim kaynağının genliğidir. α_1 ile α_k arasındaki anahtarlama açıları aşağıdaki şartı sağlamalıdır:

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_k < \pi/2 \quad (3.49)$$

(3.49) denkleminde k adet bağımsız değişken olduğu için k denklemden oluşan bir denklem sistemi elde edilir. Böylece çıkış gerilimindeki $(k-1)$ adet harmoniğin elimine edilmesi ve çıkış geriliminin kontrolü gerçekleştirilebilir. Nonlineer denklem sistemi, genellikle Newton-Raphson iterasyon metodu (Enjeti ve ark. 1990) veya Walsh fonksiyon metodu (Lang 1997) kullanılarak çözülür ve anahtarlama açıları elde edilir. SHE-PWM metodu, anahtarlama açıları için başvuru tabloları kullanılarak mikro denetleyicilerle gerçekleştirilebilir. Anahtarlama frekansı

inverterin anahtarlama kayıpları göz önüne alınarak belirlenir. Bu metodun en önemli dezavantajı, türe ve bağımlı olmasından dolayı lokal optimumla sonlanabilmesidir. Ayrıca yakınsama için başlangıç değerlerinin seçimi çok önemlidir.

- **Histerezis bandlı PWM metodu**

Histerezis bandlı PWM metodu, genel olarak anlık bir geri besleme akım kontrol metodudur. Bu metotta gerçek akım, referans akımı bir histerezis aralığı içinde sürekli şekilde takip eder. Şekil 3.31(a), histerezis bandlı PWM metodunun gerçekleştirilmesi için basit bir kontrol blok diyagramını ve akımların değişimini Şekil 3.31(b) ise metodun gerçekleştirilmesiyle elde edilen çıkış geriliminin bulunmasını göstermektedir (Bose 2002). Akım kontrol çevrimindeki hata, histerezis aralığına sahip bir karşılaştırıcı girişine uygulanır. Histerezis bandı (HB) için band genişliği (3.50) denklemi ile belirlenir.

$$HB = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.50)$$

burada V_{cc} karşılaştırıcının besleme gerilimidir. Anahtarlama elemanı için iletim şartları, Şekil 3.31(b)'den şu şekilde verilebilir;

$$(i^x - i) > HB \Rightarrow \text{Üst anahtar iletimde}$$

$$(i^x - i) < -HB \Rightarrow \text{Alt anahtar iletimde}$$

Şekil 3.31(b)'de görülen akım kontrolü, üç faz için de benzer şekilde yapılır. Referans akım ve gerçek akım karşılaştırılarak akım değerinin histerezis aralığında tutulması amacıyla inverterdeki her bir kolun anahtarlama durumu belirlenir.

Basit şekilde gerçekleştirilebilmesi, hızlı cevaba sahip olması, anahtarlama elemanının tepe akımının direkt olarak sınırlanabilmesi ve uygulamada DC bara gerilimindeki dalgalılığın problem yaratmaması nedeniyle daha düşük değerli filtre kondansatörüne izin vermesinden dolayı histerezis bandlı PWM metodu çok yaygın şekilde kullanılmıştır. Ancak metodun bazı dezavantajları vardır. PWM frekansı sabit değildir ve sonuçta motor akımında optimum olmayan harmonik dalgalılık ortaya çıkar. Temel akımda yüksek frekanslarda daha da artan bir faz gecikmesi oluşur ve bu durum yüksek performanslı motor kontrolünde problemler yaratır.

3.3.3. Uzay vektör modülasyonu metodu

İlk olarak Holtz ve ark. (1986) ve Van der Broeck ve ark. (1988) tarafından önerilen ve gerilim beslemeli inverttere sahip AC sürücülerdeki kullanımıyla popüler hale gelen UVM metodu, referans sinüzoidal girişe ihtiyaç duymaması, daha düşük harmonik içeriğe sahip olması ve lineer çalışma bölgesinin daha geniş olması gibi özellikleriyle son yıllarda geniş uygulama alanı bulmuştur (Ogasawara ve ark. 1989, Akkaya 1995, Chung ve ark. 1998, Hava ve ark. 1998). UVM metodunda $M=1.15$ değerine herhangi bir kısıtlama olmadan ulaşılabilirken aşırı modülasyon bölgesinde düşük genlikli harmonikler meydana gelir. Bu yüzden sinüzoidal PWM metoduna göre DC giriş gerilimi %15 daha verimli şekilde kullanılır. Çıkış geriliminin artırılması imkanı, kullanılacak yükte aynı güç değeri için daha düşük akıma sahip bir kontrol sistemi kullanılmasını sağlayacağından, gerilim beslemeli inverterdeki iletim kayıpları azaltılabilir. Ayrıca inverter çıkış gerilimi ve akımlarının harmonik içeriği ve anahtarlama kayıpları azaltılır.

Temel olarak UVM metodunda, daha önce açıklanmış olan kare dalga çalışma modu kullanılır ve bazı üst düzey ortalama teknikleri ile bu adımlar harmonik içerik ve anahtarlama kayıpları gibi faktörler göz önüne alınarak daha etkin hale getirilir. UVM metodunun ilk adımı kare dalga çalışma modundaki inverter gerilimlerinin uzay vektörüne dönüştürülmesidir. Eğer üç adet zamanla değişen büyüklüğün toplamı sıfır ve aralarında 120 derece faz farkı varsa, bu büyüklükler tek bir uzay vektörü ile ifade edilebilir. Bu amaçla üç fazlı büyüklükler, sabit eksen ve senkron olarak dönen eksen ve iki fazlı büyüklüklere dönüştürülür. Bu kısımda gerilim uzay vektörünün elde edilmesi üzerinde durulacak, bu vektörün genliği ve açısının sabit referans eksen ve Clark dönüşümü kullanılarak bulunması incelenecektir. Üç fazlı büyüklüklerin uzay vektör gösterimi (3.51) denklemi ile verilir.

$$V_{ref} = V_{\alpha} + jV_{\beta} = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (3.51)$$

V_{ref} referans vektörünün genliği ve açısı (3.52) ile bulunur.

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2}, \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}}\right) \quad (3.52)$$

(3.51) denkleminde $a = e^{j2\pi/3}$ olduğu göz önüne alınırsa (3.53) elde edilir.

$$\begin{aligned} V_\alpha + jV_\beta &= \frac{2}{3} \left(V_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} V_b + e^{-j\frac{2\pi}{3}} V_c \right) \\ &= \frac{2}{3} \left(V_a + \cos \frac{2\pi}{3} V_b + \cos \frac{2\pi}{3} V_c \right) + j \frac{2}{3} \left(\sin \frac{2\pi}{3} V_b - \sin \frac{2\pi}{3} V_c \right) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Burada reel ve imajiner kısımlar birleştirilirse sırasıyla (3.54) ve (3.55) denklemleri elde edilir.

$$V_\alpha = \frac{2}{3} \left(V_a - \frac{1}{2} V_b - \frac{1}{2} V_c \right) \quad (3.54)$$

$$V_\beta = \frac{2}{3} \left(0 + \frac{\sqrt{3}}{2} V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} V_c \right) \quad (3.55)$$

Buradan,

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

olur. Bu özelliğe sahip (V_a , V_b , V_c) inverter faz gerilimleri için sabit referans ekseninde uzay vektör gösterimi için (V_α , V_β) vektör bileşenleri, (3.56) denklemiyle verilen ileri Clarke dönüştürümü kullanılarak bulunur (Pfaff ve ark. 1982).

Yıldız bağlı bir yüke uygulanan dengeli üç fazlı gerilimler, Şekil 3.32’de görüldüğü gibi üç boyutlu uzayda ω açısal hızıyla dönen ve kompleks bir düzlem üzerinde dairesel bir yörünge tanımlayan bir gerilim uzay vektörü ile verilebilir.

$$V_{ref} = V_m e^{j\omega t} \quad (3.57)$$

Üç fazlı gerilim beslemeli inverterin Şekil 3.28’deki sekiz anahtarlama durumuna karşı gelen sekiz farklı gerilim uzay vektörü tanımlanır.

$$V_k = \begin{cases} \frac{2}{3} V_d e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}} & \Rightarrow k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ 0 & \Rightarrow k = 0, 7 \end{cases} \quad (3.58)$$

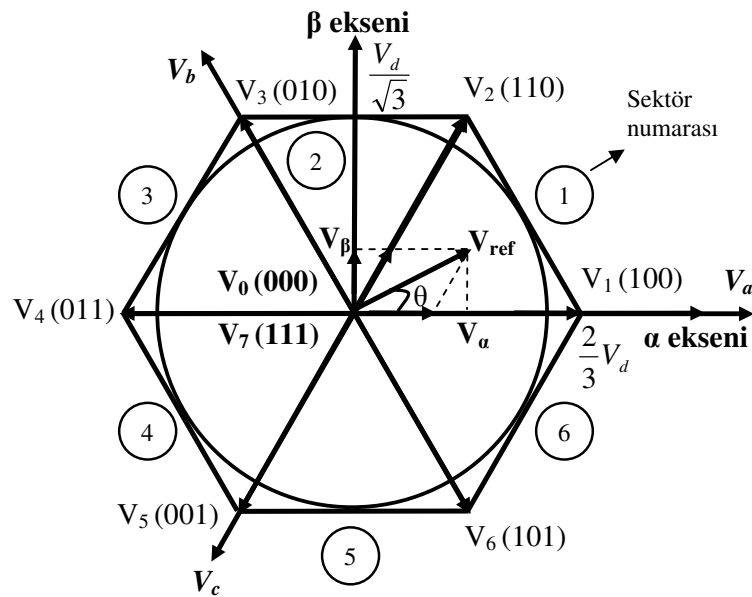
UVM metodunun temel prensibi, üç fazlı gerilim beslemeli bir inverter tarafından üretilen bu sekiz ayrıık gerilim uzay vektörünü kullanarak ideal gerilim

vektörüne (V_{ref}) mümkün olduğu kadar yaklaşan bir ortalama gerilim vektörü meydana getirmektir. Tablo 3.2’de inverterin anahtarlama durumlarına karşı gelen gerilim uzay vektörleri ve bunların α/β bileşenleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Referans vektör V_{ref} ’in sekiz anahtarlama durumu için vektörel bileşenleri

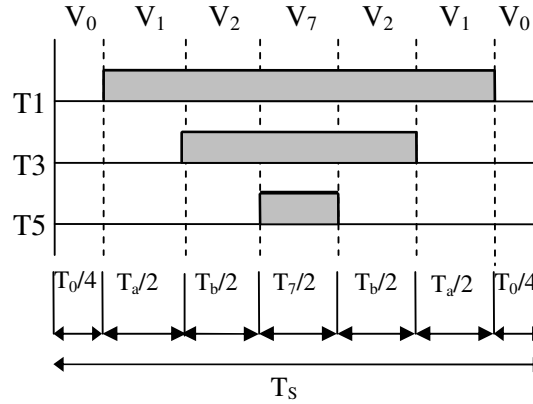
Anahtarlama durumu	Vektör	α/β vektörel bileşenleri	
		V_α	V_β
000	V_0	0	0
100	V_1	$2/3 V_d$	0
110	V_2	$V_d/3$	$V_d / \sqrt{3}$
010	V_3	$-V_d/3$	$V_d / \sqrt{3}$
011	V_4	$-2/3 V_d$	0
001	V_5	$-V_d/3$	$-V_d / \sqrt{3}$
101	V_6	$V_d/3$	$-V_d / \sqrt{3}$
111	V_7	0	0

Altısı aktif durum, ikisi sıfır vektörü olan bu vektörler Şekil 3.32’de görüldüğü gibi bir altıgen oluşturur ve birbirini takip eden sıfırdan farklı gerilimler arasındaki açı her zaman 60° ’dir (Van der Broeck ve ark. 1988, Akkaya 1995).



Şekil 3.32 İnverter durumları ve referans vektörün sabit referans ekseninde gösterimi

UVM metodunda, her bir anahtarlama periyodunda en yakın iki aktif vektör ve sıfır vektörleri arasında güç elemanlarının anahtarlamaıyla dönen referans vektöre yaklaşım sağlanır. Güç anahtarlama elemanlarının etkin şekilde kontrolü için bu vektörlerin değişim sırası Şekil 3.33'teki gibi her adımda sadece tek bir inverter kolu anahtarlacak şekilde belirlenir (Van der Broeck ve ark. 1988).



Şekil 3.33 Güç anahtarlama elemanlarının kontrolü için vektörlerin 1. bölgedeki değişim sırası

Anahtarlama periyodu T_s süresince referans vektöre eşit ortalama bir gerilim uzay vektörü tanımlanabilir. T_s yeterince küçük kabul edilirse ortalama vektör bu aralık içinde yaklaşık sabit kabul edilir. Üç faz çıkış gerilimi sinyali bu referans vektör kullanılarak elde edilir. k değeri ise referans vektörün argümanından bulunur;

$$\alpha = \arg \begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} \quad (3.59)$$

burada α aşağıdaki şartı sağlamalıdır.

$$\frac{(k-1)\pi}{3} \leq \arg \begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} \leq \frac{k\pi}{3} \quad (3.60)$$

i) Anahtarlama sürelerinin hesaplanması

Şekil 3.32'de verilen altıgende, inverter transfer karakteristiklerinin lineer olduğu lineer çalışma bölgesindeki referans vektörü V_{ref} , en yakın iki aktif uzay vektör ve sıfır durum vektörlerinin çeşitli kombinasyonları kullanılarak elde edilir.

V_k ve V_{k+1} gerilim vektörlerinin anahtarlama süreleri V_a ve V_b ile orantılı olarak şu şekilde bulunur.

$$\begin{aligned} T_k &= T_s \frac{V_a}{|V_k|} \\ T_{k+1} &= T_s \frac{V_b}{|V_{k+1}|} \end{aligned} \quad (3.63)$$

Burada $|V_k| = |V_{k+1}| = 2/3V_d$ olduğu göz önüne alınır ve (3.62)'deki ifadeler (3.63) denkleminde yerine yazılırsa anahtarlama süreleri,

$$\begin{aligned} T_k &= \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{V_d} T_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_{k+1} &= \sqrt{3} \frac{|V_{ref}|}{V_d} T_s \sin \theta \\ T_0 = T_7 &= T_s - T_m \end{aligned} \quad (3.64)$$

olarak bulunur. Burada T_0 ve T_7 sıfır vektör süreleri ve $T_m = T_1 + T_2$ olmak üzere aktif modülasyon süresidir. Böylece, inverterin her bir faz kolundaki anahtarların PWM darbe süreleri, vektörün genliği ve faz açısıyla ayarlanabilir ve verilen bir temel anahtarlama frekansında referans vektör, çeşitli anahtarlama süreleri için (3.64) denklemi ile hesaplanır (Ogasawara ve ark. 1989).

UVM metodunda modülasyon faktörü,

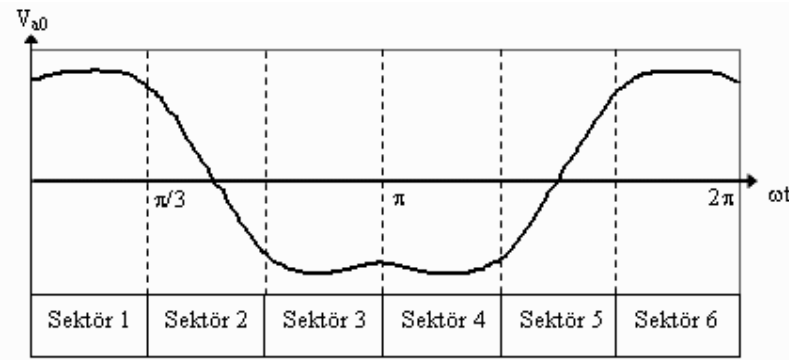
$$M = \frac{2}{V_d} |V_{ref}|_{\max} \quad (3.65)$$

şeklinde verilebilir. Burada sinüzoidal çıkış gerilimi için $|V_{ref}|_{\max} = V_d / \sqrt{3}$ olduğu düşünülürse, $M=1.15$ olarak modülasyon faktörünün alacağı maksimum değer bulunur. Böylece UVM metodunda modülasyon faktörünün referans vektörün genliğine bağlı olarak $0 \leq M \leq 1.15$ arasında değerler alacağı görülür (Akkaya 1995).

Toplam sıfır vektör süresi T_0 , iki sıfır vektör arasında keyfi şekilde paylaşılır. Ancak pratikte daha çok T_0 süresi, V_0 ve V_7 sıfır vektörleri arasında eşit olarak paylaşılır.

$$T_0 = \frac{T_s}{2} - (T_k + T_{k+1}) \quad (3.66)$$

Bu prensibe göre gerçekleştirilen UVM metodunun simülasyonu sonucunda elde edilen $V_{a0}(\omega t)$ faz gerilimi, Şekil 3.35'teki gibi bir değişim gösterir.



Şekil 3.35 UVM metodu için inverter faz geriliminin simülasyon dalga şekli

Lineer çalışma bölgesindeki maksimum fazlar arası gerilim, referans gerilim vektörü V_{ref} , Şekil 3.32'de görülen uzay vektör altıgeninin içine çizilebilen en büyük daire boyunca döndüğünde elde edilebilir. Bu daire içerisinde referans vektörü V_{ref} daima altıgen içerisinde kalır ve üst limiti altıgenin içine çizilmiş bu daire belirler. Üçüncü dereceden harmonikleri içeren bir modülasyon fonksiyonu, sinüzoidal modülasyonlu maksimum faz gerilimini kare dalga çalışmaya göre %78.5'ten %90.7'ye yükseltir. Böylece sinüzoidal PWM ile karşılaştırıldığında yaklaşık yüzde 15'lik artış sağlandığı görülür ve DC kaynak geriliminden faydalanma oranı %100'e ulaşır. Üçün katı harmoniklerin ilavesi, uzay vektör bileşenini etkilemediği için referans uzay vektörü dairesel bir yörünge üzerinde kalır (Holtz ve Beyer 1994, Akkaya 1995). Eğer referans vektör altıgen dışına çıkarsa, $T_k + T_{k+1}$ toplamı T_s 'den daha yüksek olacağı için gerçekleştirilemez. Böylece UVM'de aşırı modülasyon bölgesi altıgenin dışında oluşur (Chung ve ark. 1998).

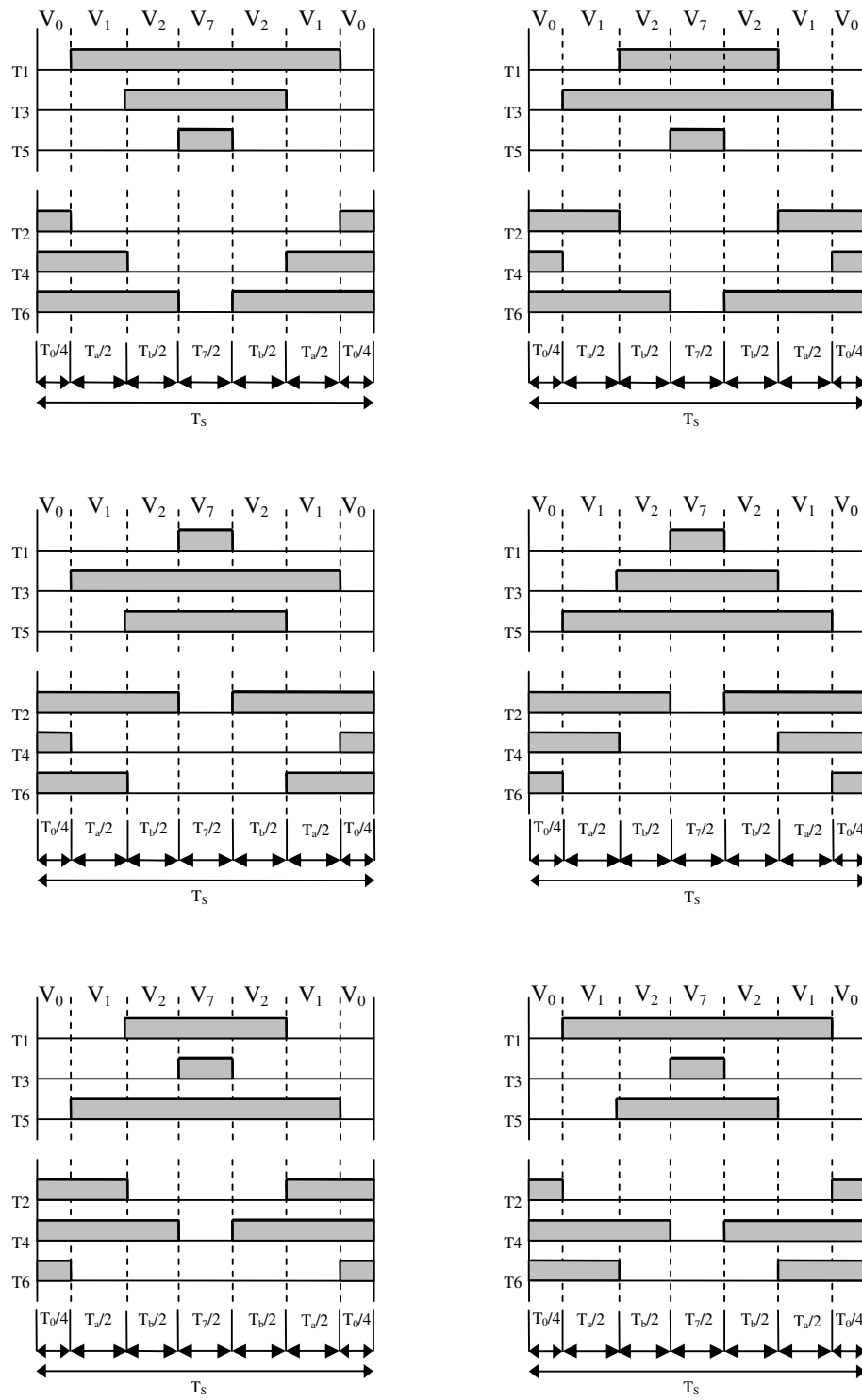
ii) Anahtarlama sinyallerinin sırası

(3.64) denkleminle hesaplanan değerlere göre sadece bir çeşit anahtarlama sırası gerçekleştirilmez. Çeşitli modülasyon fonksiyonlarının kullanıldığı bir çok UVM metodu vardır. Bunlardan literatürde en yaygın olarak kullanılanı olan sürekli modülasyon metodunda toplam sıfır süresi iki sıfır durumu arasında paylaşılır. Bu metotta bir inverter durumundan diğerine geçiş sadece bir inverter kolu anahtarlara yapılar ve minimum inverter anahtarlama frekansı elde edilir.

Şekil 3.36'da tüm bölgeler için oluşan PWM sinyalleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 1. bölgedeki anahtarlama şekli için periyot, 0 durumu (0 0 0) ile başlar ve her bir inverter kutbu 7 durumu [1 1 1] elde edilinceye kadar sırayla durum değiştirir. Bu örnek, modülasyon periyodunun tamamlanması amacıyla ters çevrilir. Çalışmalar, Şekil 3.36'da görülen simetrik darbe örnekleriyle gerçekleştirilen metodun, minimum çıkış harmonikleri ürettiğini göstermiştir (Van der Broeck ve ark. 1988, Bose 2002, Rathnakumar ve ark. 2005).

Diğer bir modülasyon metodu “süreksiz modülasyon” olarak isimlendirilir. Bu metotta her bir darbe yarı periyodunda sadece iki faz kolu anahtarlarken üçüncü kol, DC kaynak geriliminin pozitif veya negatif ucuna bağlanır. Bu anahtarlama düzeninde bir bölgedeki anahtarlama sadece iki inverter kolu kullanılarak yapılır. Kollardan biri DC kaynak geriliminin pozitif veya negatif ucuna bağlanır. Bu, anahtarlama işlemini kolaylaştırır. Üç faza ait PWM periyodu, sürekli modülasyonda altı anahtarlama noktasına göre tanımlanırken süreksiz modülasyonda dört anahtarlama noktasına göre tanımlanır. Anahtarlama sayılarının azaltılması, PWM darbe sürelerinin hesaplanmasını basitleştirir ancak sıfır vektörler darbe yarı periyodunun başında veya sonunda bulunduğundan dolayı harmonik kayıplar artar. Buna karşılık, her faz kolu temel çıkış periyodunun üçte birinde anahtarlama yapılmadığı için sürekli modülasyona göre ortalama anahtarlama kayıpları %33 azalır (Akkaya 1995).

Bu çalışmada UVM için hesaplamalar, Şekil 3.36'da verilen simetrik darbe örnekleriyle gerçekleştirilen metoda uygun şekilde yapılmış ve bu hesaplara göre anahtarlama elemanlarının iletim süreleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Tabloda anahtar numaraları Şekil 3.27'deki devreye uygun şekilde verilmiştir.

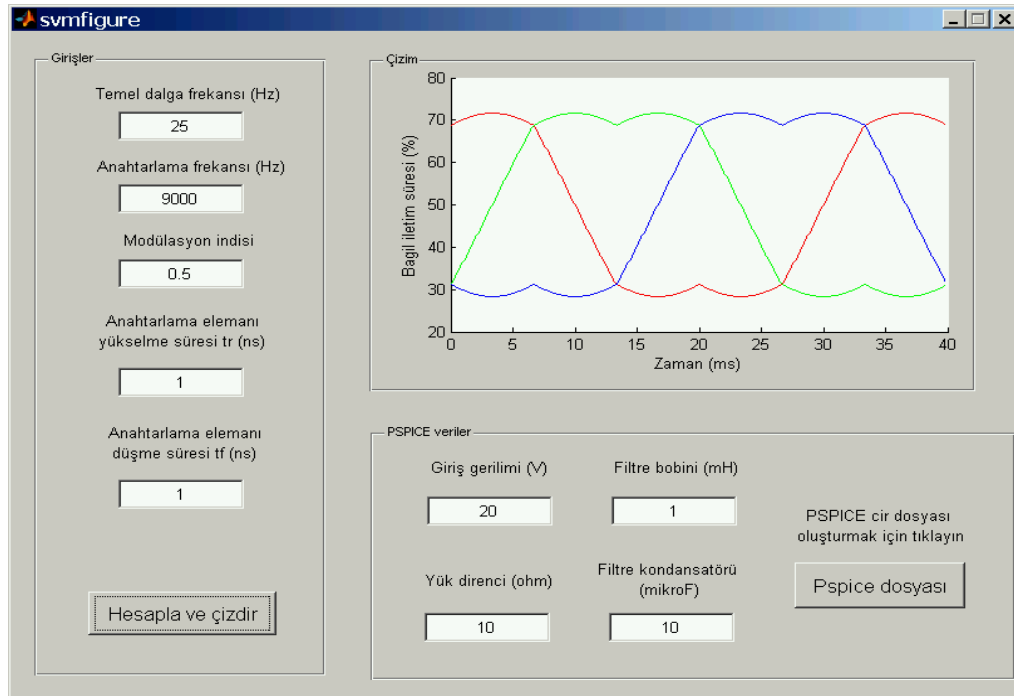


Şekil 3.36 UVM metodunda tüm bölgeler için oluşan anahtarlama sinyalleri

Tablo 3.3 Anahtarlama sırası tablosu

Sektör numarası	Üst koldaki anahtarlar (T_1, T_3, T_5)	Alt koldaki anahtarlar (T_2, T_4, T_6)
1	$T_1 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_3 = T_b + T_0/2$ $T_5 = T_0/2$	$T_2 = T_0/2$ $T_4 = T_a + T_0/2$ $T_6 = T_a + T_b + T_0/2$
2	$T_1 = T_a + T_0/2$ $T_3 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_5 = T_0/2$	$T_2 = T_b + T_0/2$ $T_4 = T_0/2$ $T_6 = T_a + T_b + T_0/2$
3	$T_1 = T_0/2$ $T_3 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_5 = T_b + T_0/2$	$T_2 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_4 = T_0/2$ $T_6 = T_a + T_0/2$
4	$T_1 = T_0/2$ $T_3 = T_a + T_0/2$ $T_5 = T_a + T_b + T_0/2$	$T_2 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_4 = T_b + T_0/2$ $T_6 = T_0/2$
5	$T_1 = T_b + T_0/2$ $T_3 = T_0/2$ $T_5 = T_a + T_b + T_0/2$	$T_2 = T_a + T_0/2$ $T_4 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_6 = T_0/2$
6	$T_1 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_3 = T_0/2$ $T_5 = T_a + T_0/2$	$T_2 = T_0/2$ $T_4 = T_a + T_b + T_0/2$ $T_6 = T_b + T_0/2$

UVM metodu için verilen teorik esaslara uygun şekilde gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarının gözlenebilmesi amacıyla MATLAB’da tasarlanan bir grafik kullanıcı arayüzü Şekil 3.37’de görülmektedir (Program Ek I-2’de verilmiştir).

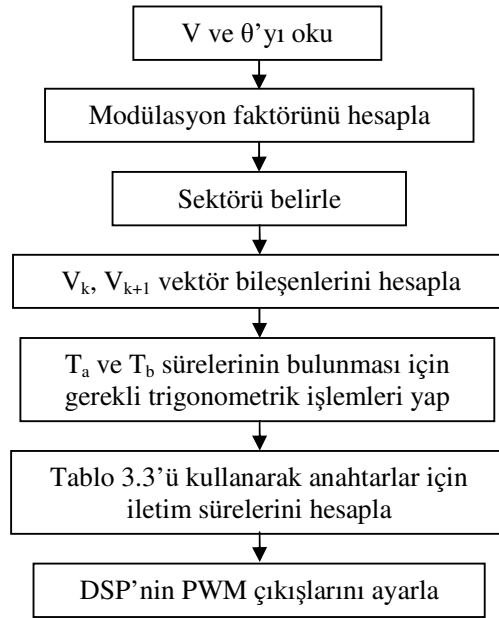


Şekil 3.37 Geleneksel UVM metodu için geliştirilen grafik kullanıcı arayüzü

Şekil 3.37’de görülen GUI’de temel dalga frekansı, anahtarlama frekansı, modülasyon faktörü, anahtarlama elemanı için çeşitli karakteristik değerler girilerek ekranda faz gerilimlerinin gözlenmesi imkanı sağlanmıştır. Ayrıca üç fazlı inverter için DC giriş gerilimi, LC filtre için bobin ve kondansatör değerleri ile yük direnci değeri girilerek PSPICE simülasyon programında çalıştırabilmek üzere “cir” uzantılı bir dosyanın elde edilmesi ve UVM metodu için verilen simülasyonların kolaylıkla gerçekleştirilebilmesi imkanı sağlanmıştır. GUI ile elde edilen örnek bir PSPICE dosyası Ek I-3’te verilmiştir.

3.3.4. UVM metodunun sayısal işaret işlemcide gerçekleştirilmesi

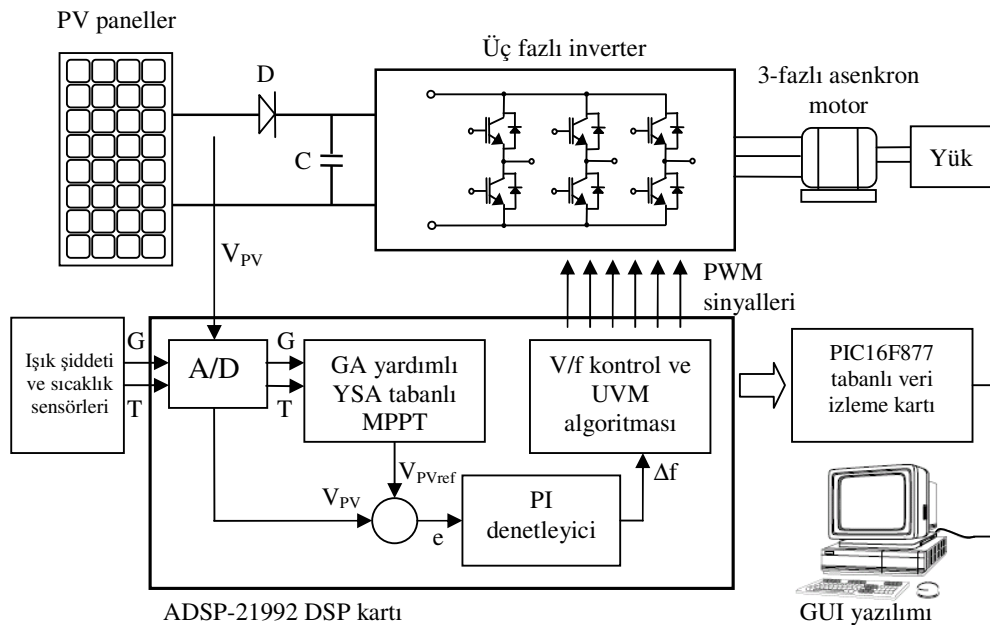
UVM metodunun sayısal işaret işlemci ile gerçekleştirilmesi için kullanılan algoritmaya ilişkin akış diyagramı Şekil 3.38’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, öncelikle gerilim ve açı değerleri okunmakta ve modülasyon faktörü değeri (3.65) denklemine göre hesaplanmaktadır. Daha sonra sektör belirlenmekte ve sektör içinde referans vektöre en yakın iki vektör bileşeni belirlendikten sonra Tablo 3.3 kullanılarak anahtarlama elemanları için iletim süreleri hesaplanmaktadır. Son olarak, karşılık gelen dijital değerler PWM çıkışları kullanılarak DSP’de zaman bileşenlerine dönüştürülür.



Şekil 3.38 UVM metodunun sayısal işaret işlemcide gerçekleştirilmesi adımları

4. FOTOVOLTAİK GÜÇ SİSTEMİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

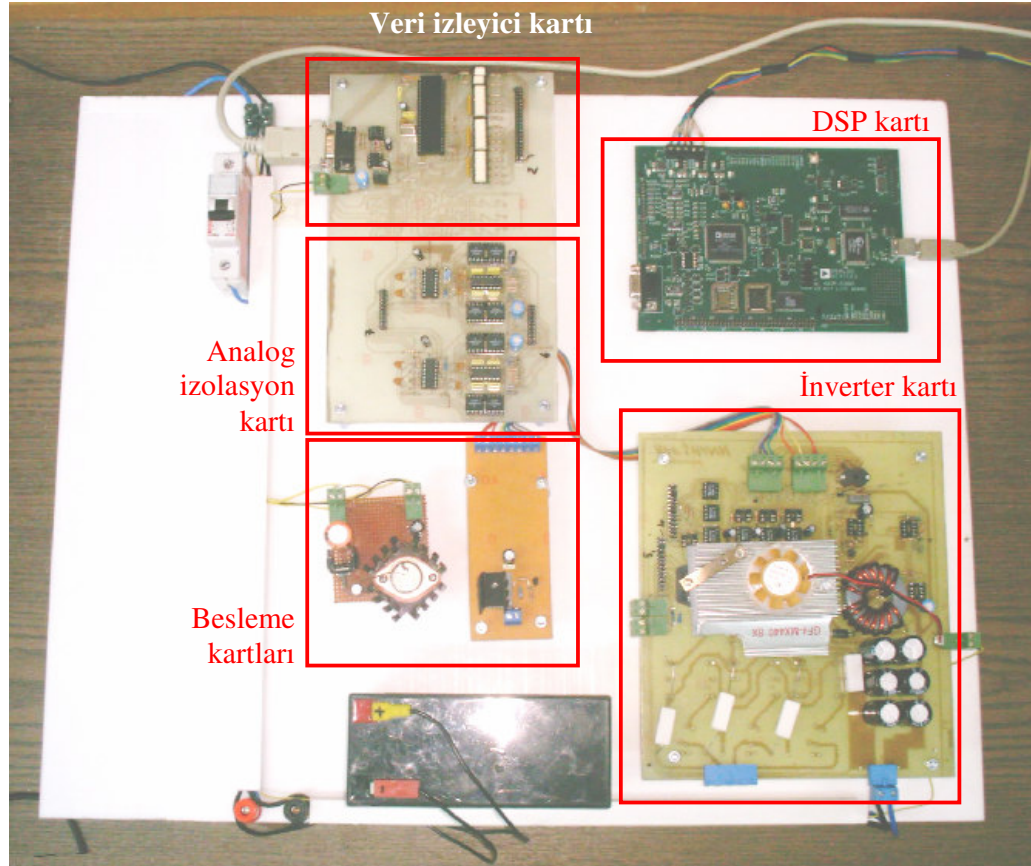
Gerçekleştirilen fotovoltaik (PV) sistem, temel olarak donanım ve yazılım olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Şekil 4.1’de verilen blok diyagramında görüldüğü gibi donanım devresi PV paneller, üç fazlı inverter, yük olarak üç fazlı asenkron motor, sayısal işaret işlemci kartı, sensör ve ölçme devreleri ile bu birimler arasındaki arabirim yapılarını ve bilgisayar ortamına veri aktarmakta kullanılan mikrodenetleyici tabanlı veri izleme kartını içermektedir. Yazılım kısmında, genetik algoritma (GA) yardımcı yapay sinir ağı (YSA) tabanlı maksimum güç noktası izleyici (MPPT) işlemini yerine getiren ve GA yardımcı YSA tabanlı uzay vektör modülasyonu (UVM) metoduyla anahtarlanan invertere sahip PV sisteme ait yazılımların gerçekleştirilmesi açıklanmıştır. Sistemi oluşturan yazılımların gerçekleştirilmesiyle ilgili çeşitli simülasyon sonuçları ve sistemden belli zaman aralıklarında elde edilen verilerin, seri port üzerinden bilgisayara aktarılması amacıyla grafik kullanıcı arayüzü olarak gerçekleştirilen veri izleyici de bu bölümde verilmiştir. Gerçekleştirilen sistemde DC-DC dönüştürücü birimi ve akü kullanılmadığından, bu elemanların oluşturacağı kayıplar elimine edilmiştir.



Şekil 4.1 Gerçekleştirilen PV sistemin blok diyagramı

4.1. Sistem Donanımı

Blok diyagramı Şekil 4.1’de verilen sistem laboratuvar ortamında Şekil 4.2’de görüldüğü gibi pratik olarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistem temel olarak inverter kartı, veri izleyici kartı, analog izolasyon kartı, besleme devreleri ve DSP kartından oluşmaktadır. İnverter kartı, IGBT elemanları içeren PM20CSJ600 model bir akıllı güç modülünden (IPM) oluşmaktadır. DSP kartı, PV sisteme uygulanan kontrol algoritmalarının gerçekleştirilmesinde kullanılan Analog Devices firmasının ADSP-21992 sayısal işaret işlemcisi içermektedir. Veri izleyici kartı, PV sistem hakkında çeşitli değerlendirmelerin yapılabilmesi amacıyla sistemden alınan ölçümlerin bilgisayar ortamına aktarılması için PIC16F877 mikrodenetleyicisi (Microchip 2001) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve bu kart kullanılarak seri port veri haberleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 4.2 Pratik olarak gerçekleştirilen sistemin görünümü

Sistemde, iki adet 60W maksimum güce sahip PV panelden elde edilen DC formdaki gerilim, üç fazlı inverter girişine uygulanmış ve inverter çıkışına ise sırasıyla üç fazlı R-L yük ve üç fazlı asenkron motor bağlanmıştır. Işık şiddeti ve ortam sıcaklığı Si-01TC-T sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Arabirim devreleri, ölçüm sinyallerinin sayısal işaret işlemciye aktarılmasında, üç fazlı invertere anahtarlama sinyallerinin uygulanmasında ve veri izleme birimine veri aktarılmasında güç katı ile dijital sinyallerin yalıtılması amacıyla kullanılmıştır.

4.1.1. Fotovoltaik paneller

Sistemde, karakteristik özellikleri Tablo 4.1’de verilen ve her biri 60 W tepe gücüne sahip seri bağlı iki adet Kyocera KC60 model fotovoltaik panel kullanılmıştır. Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi binasının çatısına yerleştirilen fotovoltaik panellerin görünümü Şekil 4.3’te görülmektedir.

Tablo 4.1 PV panelin STC şartlarındaki (25°C ve 1kW/m²) karakteristik özellikleri

Parametreler	Değer
Maksimum güç, P_{max}	60 W
Nominal akım, I_{MPP}	3.55 A
Nominal gerilim, V_{MPP}	16,9 V
Kısa devre akımı, I_{kd}	3.73 A
Açık devre gerilimi, V_{ad}	21.5 V



Şekil 4.3 Tezde kullanılan fotovoltaik paneller

4.1.2. Işık şiddeti ve sıcaklık sensörü

Işık şiddeti ve sıcaklık ölçümlerinde Şekil 4.4'te görülen “Ingenieurbüro Mencke & Tegtmeyer” firması tarafından üretilen Si-01TC-T tipi ışık şiddeti sensörü kullanılmıştır. Şekilde görüldüğü gibi sensör fotovoltaiik panellerle aynı açıda yerleştirilmiş ve panellere gelen ışık seviyesi ve sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Sensör, aktif sıcaklık kompanzasyonu özelliğine sahiptir ve sıcaklık kompanzasyonu ile ışık şiddeti ölçüm hatası $\pm 6\%$ 'dır. Sıcaklık ölçüm doğruluğu ise 25°C 'de $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ 'dir.

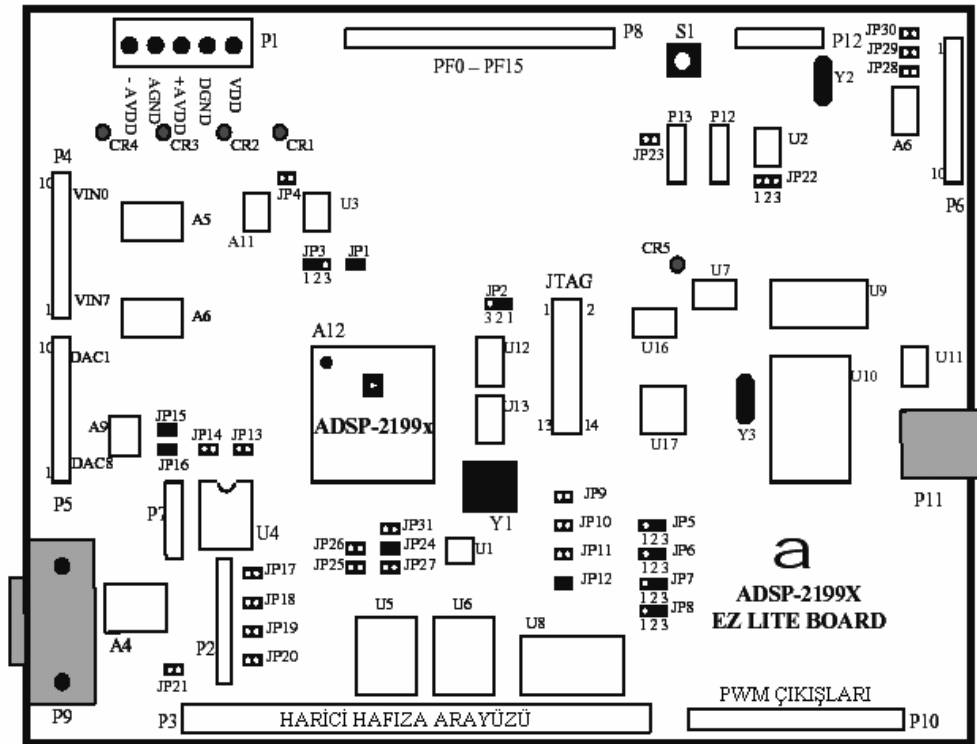


Şekil 4.4 Çalışmada kullanılan ışık şiddeti ve sıcaklık sensörü

4.1.3. ADSP-21992 Ez-kit lite deney kartı

Gerçekleştirilen MPPT algoritmasının uygulanması, asenkron motor hız kontrolünün bu algoritmaya göre sağlanması, UVM sinyallerinin üretilmesi gibi yüksek düzeyde matematiksel hesaplamaların yapılması ve istenen hızda bir cevabın elde edilebilmesi için kontrol sistemleri ve sinyal işleme amaçlı çok yüksek hızda çalışan yüksek performanslı bir DSP'nin kullanılması zorunlu olmuştur. Bu amaçla, yukarıda sıralanan uygulamaları gerçekleştirebilmek ve ADSP-21992 DSP'nin tüm özelliklerinden faydalanabilmek için Analog Devices firması tarafından üretilen ADSP-21992 Ez-Kit Lite deney kartı kullanılmıştır (ADSP 2002). Sistemde DSP kullanımı ile güvenilirlik ve uygulama esnekliği artmış, bir çok işlevi kendi üzerinde gerçekleştirebiliyor olmasından dolayı maliyet de azaltılmıştır.

Genel yapısı Şekil 4.5'te verilen ADSP-21992 Ez-Kit Lite, bir deneysel çalışma ve geliştirme kartıdır. İçerisinde ADSP-21992 sayısal işaret işlemcisini ve belli sayıda çevre birimini içermektedir.



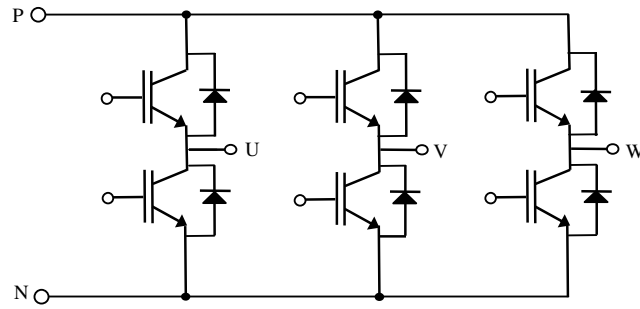
Şekil 4.5 ADSP-21992 Ez-Kit Lite deney kartının görünümü

ADSP-21992 Ez-Kit Lite kartının en önemli özellikleri şunlardır (ADSP 2002);

- 16 bit, sabit nokta 160MIPS DSP çekirdek
- 32K (x24 bit) on-chip program RAM ve 16K (x16 bit) on-chip data RAM
- Harici hafıza: 64K (x16 bit) SRAM ve 512k (x8 bit) Flash hafıza
- 8 kanallı, 14 bit analog-dijital (A/D) dönüştürücü
- 8 kanallı, 12 bit dijital-analog (D/A) dönüştürücü
- 16 adet dijital I/O pinleri
- İki adet 3 fazlı 16-bit PWM üretim birimi
- İki adet yardımcı 16-bit PWM üretim birimi
- RS232, USB, CAN ve SPORT gibi çeşitli haberleşme sistemleri
- DSP osilatör devresi

4.1.4. Akıllı güç modülü

Bu çalışmada kullanılan Mitsubishi firmasına ait PM20CSJ060 akıllı güç modülü (IPM), yüksek hızda, düşük kayıplı IGBT elemanlarına sahip optimize edilmiş kapı sürme ve koruma devrelerini içeren ileri düzey hibrid bir güç elemanıdır (Mitsubishi Electric 2000). Eleman 20kHz'e kadar olan güç anahtarlama uygulamaları için tasarlanmıştır. İleri düzey akım algılama, modül içerisindeki entegre akım sensörü ile aşırı akım ve kısa devre koruma gerçekleştirilerek güç elemanlarının akımlarının sürekli olarak izlenmesi sağlanmaktadır. Sistem güvenilirliği ayrıca IPM'lerde entegre halde bulunan aşırı sıcaklık ve düşük gerilim korumalarıyla geliştirilmiştir. Çalışmada kullanılan akıllı güç modülünün altı adet elemana sahip güç devresi konfigürasyonu Şekil 4.6'da görülmektedir.

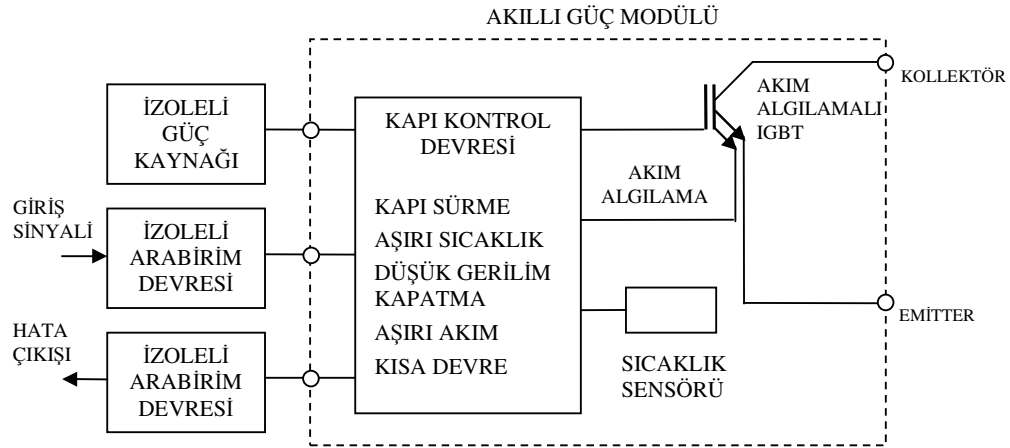


Şekil 4.6 Akıllı güç modülünün güç devresi konfigürasyonu

Şekil 4.7'de IPM'de dahili yapıda bulunan tümleşik fonksiyonları gösteren blok diyagramı verilmiştir. Diyagramda görüldüğü gibi izolasyon için arabirim devreleri ve kontrol güç kaynağı dışarıdan sağlanmaktadır. Dahili kapı kontrol devresi +15V DC kaynağa ihtiyaç duymaktadır. IPM kontrol girişi, minimum harici elemanlara sahip olup optokuplörler ile arabirim devresi gerçekleştirilmiştir.

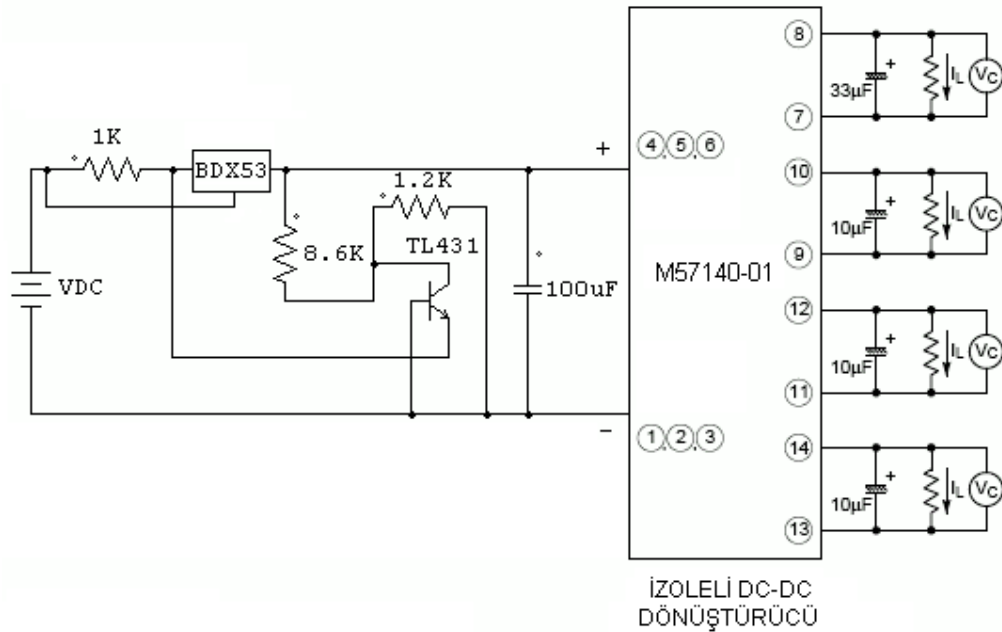
IPM'de bulunan koruma özellikleri şunlardır:

- i) Kontrol beslemesi için düşük gerilim koruma,
- ii) Aşırı sıcaklık koruması,
- iii) Aşırı akım koruması,
- iv) Kısa devre koruması.



Şekil 4.7 IPM'nin tümleşik fonksiyonlarını gösteren blok diyagramı

IPM'nin kontrol devrelerine güç sağlanması amacıyla dört ayrı izoleli 15VDC çıkış sağlayan M57140-01 DC-DC dönüştürücü modülü kullanılmıştır. Modülün çalıştırılması için gerekli 20VDC gerilim ayrıca tasarlanan bir güç kaynağından sağlanmıştır. Şekil 4.8'de çalışmada gerçekleştirilen izoleli güç kaynağı için devre şeması verilmiştir.



Şekil 4.8 IPM'nin kontrol devrelerine güç sağlamakta kullanılan izoleli kaynaklar için gerçekleştirilen devre şeması

4.1.5. Üç fazlı asenkron motor

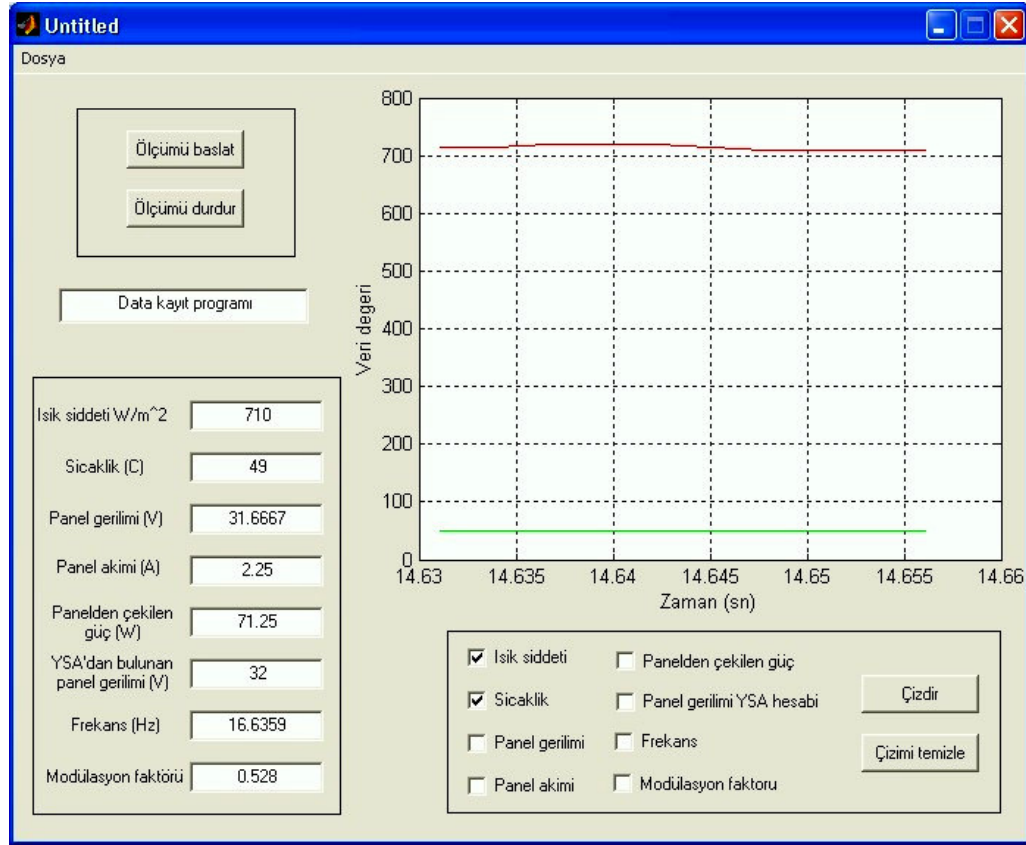
Asenkron motorlar, endüstride yaygın olarak kullanılmakta ve dünyadaki elektrik enerjisinin önemli bir kısmı bu motorlar tarafından tüketilmektedir. Özellikle fan ve pompalarda yaygın olarak kullanılmasından dolayı, bu çalışmada gerçekleştirilen PV sistemde yük olarak üç fazlı kısa devre rotorlu bir asenkron motor kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan motorun karakteristik değerleri Tablo 4.2’de görülmektedir.

Tablo 4.2 Üç fazlı asenkron motor için verilen karakteristik değerler

Parametreler	Değer
Anma gerilimi	40V
Anma hızı	1500d/d
Anma gücü	120W
Çift kutup sayısı	2
Cosφ	0.64

4.1.6. Seri haberleşme kartı

DSP’de elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılması işlemi direkt olarak DSP üzerinden değil, PIC 16F877 mikrodenetleyicisi kullanılarak yapılmıştır. Bundaki amaç DSP’de UART çıkışının kullanılmasının önlenmesiyle işlem yoğunluğunun azaltılmasıdır. DSP ile mikrodenetleyici arasında haberleşme I/O portları üzerinden sağlanmakta, böylece DSP’nin bu işlem için harcadığı zaman büyük ölçüde azaltılmaktadır. Ortam ışık şiddeti ve sıcaklık değerleri, PV panel gerilimi ve akımı, DSP’de hesaplanan referans PV panel gerilimi, inverter için referans modülasyon faktörü ve temel frekans değerleri mikrodenetleyiciye I/O portları üzerinden aktarılmakta, mikrodenetleyiciden de belli zaman aralıklarıyla Şekil 4.9’da verilen grafik kullanıcı arayüzü üzerinden bilgisayara gönderilmektedir. Böylece sistemin performansı hakkında bilgi elde edilerek kaydedilebilmesi ve analiz edilmesi imkanı sağlanmıştır. MATLAB’da gerçekleştirilen grafik kullanıcı arayüz programı Ek I-4’te verilmiştir. Şekilde görülen arayüz programında ölçümü başlat butonuna basılmasıyla 10 sn aralıklarla değer alınmakta ve sistemden ölçülen değerler anlık şekilde ekranda gösterilmektedir. Ölçümü durdur butonuna basıldıktan sonra ise çizdirilecek değişkenler seçilerek ekranda çizdirilebilmektedir.



Şekil 4.9 Seri haberleşme için gerçekleştirilen grafik kullanıcı arayüz programı

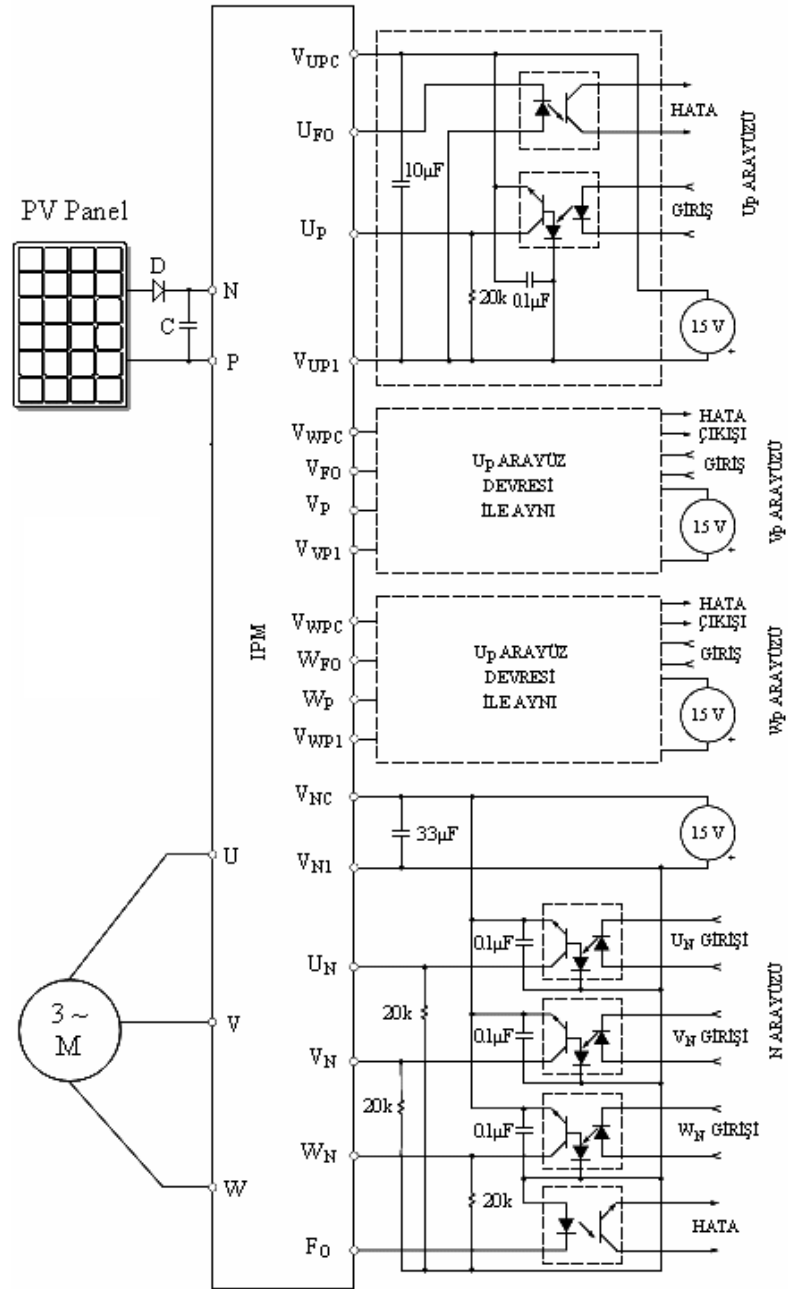
Gerçekleştirilen veri izleme kartı temel olarak DSP ile mikrodenetleyici portları arasında TLP-521 optokuplörleriyle oluşturulan arabirim, PIC16F877 mikrodenetleyicisini ve mikrodenetleyici ile bilgisayar arasında kullanılan arabirim devresini içermektedir.

4.1.7. Arabirim devreleri

Bu çalışmada, sistemde denetleyici olarak kullanılan sayısal işaret işlemci ile güç elemanları arasındaki arabirim devreleri optokuplörler ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen arabirim devreleri aşağıda sıralanmış ve kısaca açıklanmıştır.

i) IPM ile DSP arasında gerçekleştirilen arabirim

IPM, Şekil 4.10'da verilen devre şemasından görüldüğü gibi kontrol girişi ve hata çıkışı için optokuplörlerle gerçekleştirilen arabirime gerek duymaktadır.



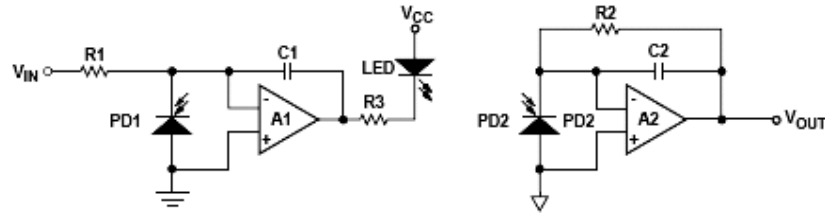
Şekil 4.10 Çalışmada kullanılan IPM için arabirim devresi

DSP'den kontrol girişi için on/off sinyalleri yüksek hızda optotransistörler kullanılarak transfer edilir. Bu amaçla sistemde yüksek hızlı HCPL-4506 optotransistörü kullanılmıştır. Hata çıkışı için ise düşük hızlı TLP-521 optotransistörü kullanılarak hem düşük maliyet hem de yüksek akım transfer oranı avantajlarından faydalanılmıştır.

ii) Sensörler ile DSP'nin ADC girişleri arasında gerçekleştirilen arabirim

Işık şiddeti ve sıcaklık sensörlerinden ve güç katındaki akım ve gerilim ölçümlerinden elde edilen analog sinyallerin DSP'nin ADC girişlerine uygulanması, analog izolasyonun gerçekleştirildiği arabirim üzerinden sağlanmaktadır. Bu amaçla yüksek lineerlikte analog bir eleman olan HCNR200 kullanılmıştır. Yapısında, birbirine yakın tutulan iki fotodiyoda ışık sağlayan yüksek performanslı AlGaAs LED bulunmaktadır. İki fotodiyot LED'den yaklaşık olarak aynı miktarda ışık almaktadır. Giriş fotodiyodu LED'in ışık çıkışını izlemek ve böylece kararlı değerde tutmak amacıyla kullanılır. Çıkış fotodiyodu, LED'in ışık çıkışı ile doğru orantılı bir foto akım üretir.

Çalışmada kullanılan analog izolasyon devresi Şekil 4.11'de görülmektedir. Devreden görüldüğü gibi HCNR200 optokuplörünün yanında iki adet harici opampa ihtiyaç duyulmaktadır.



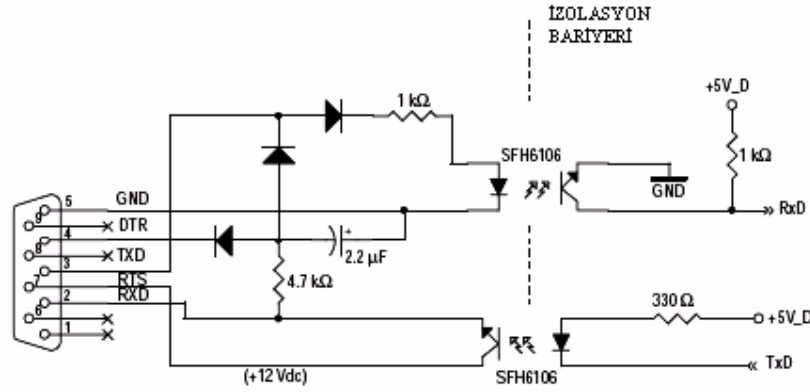
Şekil 4.11 Analog izolasyon devresi

iii) DSP ile mikrodnetleyici arasında gerçekleştirilen arabirim

DSP ile mikrodnetleyici arasında gerçekleştirilen arabirimde düşük hızlı TLP-521 optotransistörleri kullanılarak düşük maliyet ve yüksek akım transfer oranı avantajlarına sahip olunmuştur.

iv) Mikrodnetleyici ile bilgisayar arasında gerçekleştirilen arabirim

PIC16F877 mikrodnetleyicisinin seri port alıcı (RxD) ve verici (TxD) pinleri Şekil 4.12'de verilen RS232 opto izolasyon devresine (Lucas ve Berringer 2000) bağlanarak mikrodnetleyici ile bilgisayar arasında izolasyonu sağlamakta, aynı zamanda da sinyalin terslenmesi ve gerilim seviyesi kaydırma işlemlerini yerine getirmektedir.



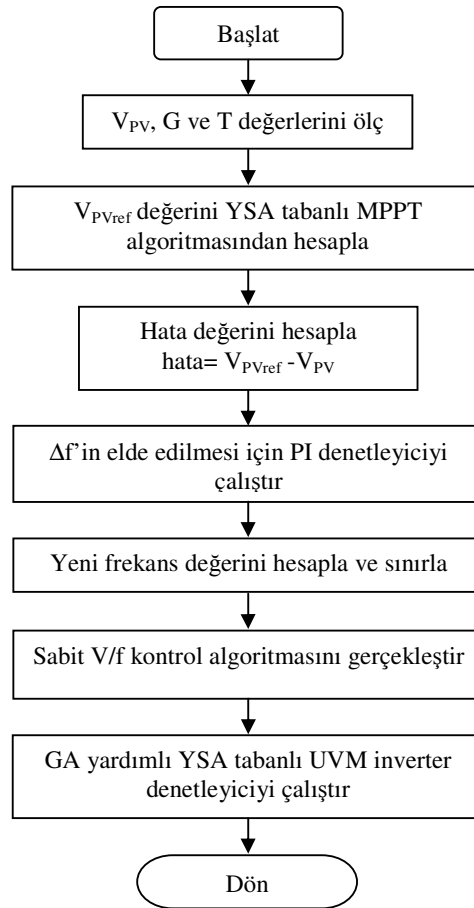
Şekil 4.12 Opto-izoleli RS232 devresi

4.2. Sistem Yazılımı

Yukarıda donanımı detaylı olarak incelenen sistemin yazılımı ADSP-21992 sayısal işaret işlemcisi kullanılarak yürütülmüştür. Şekil 4.1’de blok diyagramı verilmiş olan PV sistemde, DSP üzerinde gerçekleştirilen işlemler Şekil 4.13’teki akış diyagramında görülmektedir. DSP’de, temel olarak GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması, frekanstaki değişme miktarının belirlendiği PI denetleyici algoritması, sabit V/f kontrol algoritması ve GA yardımcı YSA tabanlı UVM inverter denetleyici algoritması yürütülmektedir. PV panellerdeki güç, ışık şiddeti ve sıcaklık ile değişim gösterdiğinden ve sistem akü içermediğinden, mevcut gücün tamamının kullanılabilmesi için sisteme yük olarak bağlanan asenkron motorun da değişken güçte çalıştırılması gerekmektedir. Bu işlem asenkron motorun hızı değiştirilerek mekanik enerji çıkışının ayarlanmasıyla sağlanmıştır.

DSP’de öncelikle PV panel gerilimi değeri, sensörlerden alınan ışık şiddeti ve sıcaklık değerleri ADC’ler vasıtasıyla ölçülmekte, daha sonra GA yardımcı YSA yapısından PV sistemin maksimum güç noktasında çalıştırılması amacıyla gereken referans PV panel gerilimi değeri V_{PVref} hesaplanmaktadır. PV sistemde panellerin çıkış gerilimi bu değere ayarlandığında sistemin maksimum güç noktasında çalıştığı kabul edilmektedir. Ölçüm değeri ile referans değer arasındaki fark ile hata değeri bulunmakta ve bu değer PI denetleyiciye uygulanarak frekanstaki değişme miktarı (Δf) bulunmaktadır. Hatanın polaritesine göre frekans ve böylece de asenkron motorun hızı değiştirilmektedir. Elde edilen yeni frekans değeri, sabit V/f kontrol

algoritması ile modülasyon faktörünün elde edilmesinde kullanılmakta, frekans ve modülasyon faktörü değerlerine göre DSP’de PWM anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Böylece motor hızı kontrol edilerek panellerden çekilen güç optimum noktaya ayarlanmaktadır. Ayrıca, kondansatör ile filtrelenmiş olan DC giriş gerilimi kontrol amaçlı olarak ölçülmekte ve belirli bir seviyenin altına düştüğünde inverterin çalışması durdurulmaktadır. PI denetleyicinin görevi, Δf ’in değiştirilmesiyle PV çıkış geriliminin referans gerilim değerine ayarlanmasıdır. Böylece oransal integral kontrolün kullanılmasıyla sürekli durum hatasının sıfır yapılması ve kararlılığın artırılması amaçlanmıştır. Algoritmada PWM sinyallerinin üretilmesinde UVM çıkış sinyalleri için hesaplamalar kesme servis rutininde gerçekleştirilmektedir. Kesme servis rutini üç fazlı inverterin anahtarlama frekansı olarak seçilen 9kHz’de yürütülmektedir.



Şekil 4.13 Gerçekleştirilen sistem yazılımının akış diyagramı

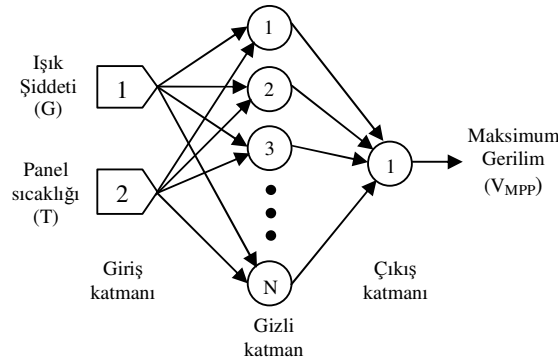
Temel kontrol çevriminde elde edilen frekans ve modülasyon faktörü değerleri, PWM çıkış sinyallerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. ADC işleminin gerçekleştirilmesi de kesme servis rutini içerisinde yapılmakta, elde edilen değerlerin ortalaması temel kontrol çevriminde gerekli olan işlemlerde kullanılmaktadır. GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması, hata değerinin belirlenmesi, PI denetleyici ve V/f kontrol algoritmasının yürütüldüğü temel kontrol çevrimi, 150Hz'lik bir örnekleme frekansında gerçekleştirilmektedir. UVM metodu için 9kHz'lik anahtarlama frekansında gerçekleştirilen hesaplamalar 87,6µsn'de tamamlanmakta, kalan sürede ise sistemin gerçekleştirilmesi için gerekli diğer hesaplamalar yapılmaktadır. GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritmasında kullanılan tek çıkışlı 5 gizli düğüm sayısına sahip sinir ağı hesaplamaları DSP'de 104 µsn'de tamamlanmaktadır.

4.2.1. GA yardımcı YSA tabanlı MPPT sisteminin gerçekleştirilmesi

Gerçekleştirilen PV sistemde kullanılan MPPT, PV panellerden çekilen toplam gücün, gün boyunca değişen ışık şiddeti ve sıcaklığa göre bulunan değeri izlemesini sağlamaktadır. Bunun için PV paneller ile yük herhangi bir hava şartı için uyumlandırılarak maksimum güç üretimi elde edilmektedir. Sistemde kontrol parametresi olarak akımın kullanılmaması sebebiyle, akım ölçümünde ortaya çıkan gürültü gibi olumsuz etkiler ve nispeten yüksek maliyetli akım sensörlerine gerek duyulması önlenmiş ve MPPT gerilim tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. MPPT'de referans gerilim, YSA tarafından belirlenmektedir. Maksimum güç noktasında gerilim değerleri (V_{MPP}), ışık şiddeti (G) ve sıcaklık (T) ile nonlinear değişim gösterdiği için lineer fonksiyon yaklaşımı teknikleri uygun olmamaktadır. Ayrıca V_{MPP} ile G ve T arasında eğri uydurma yöntemleri ile matematiksel bir bağlantı kurulması da mümkün değildir. Sınırlı bir aralıkta bu ilişki kurulabilse bile tüm çalışma alanında gerçek maksimum güç noktaları bulunamamaktadır. Bu nedenle G ve T 'ye bağımlı olan referans gerilimin gerçek zamanlı olarak bulunması için YSA uygun bir çözüm sağlayabilmektedir (Veerachary ve ark 2002).

YSA'nın eğitilmesi amacıyla giriş verisi olarak deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar kullanılmış ve sinir ağında maksimum güç noktasındaki gerilim değerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.14'te verilen çok katlı perseptron

yapısından görüldüğü gibi her bir sinir hücresinin çıkışı sonraki katmana bir ağırlık boyunca bağlanmaktadır. Ayrıca her bir sinir hücresine bir biyas sinyalinin bir ağırlık boyunca bağlanması ile ağırlık öğrenme yeteneğine olumlu şekilde etki edilmektedir. Şekilde biyas sinyali sadelik açısından gösterilmemiştir. Sinir ağına performansı, sinir ağı çıkışı deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve eğitme veri setinde bulunmayan girişler, sinir ağına uygulanarak test işlemi yapılmıştır.

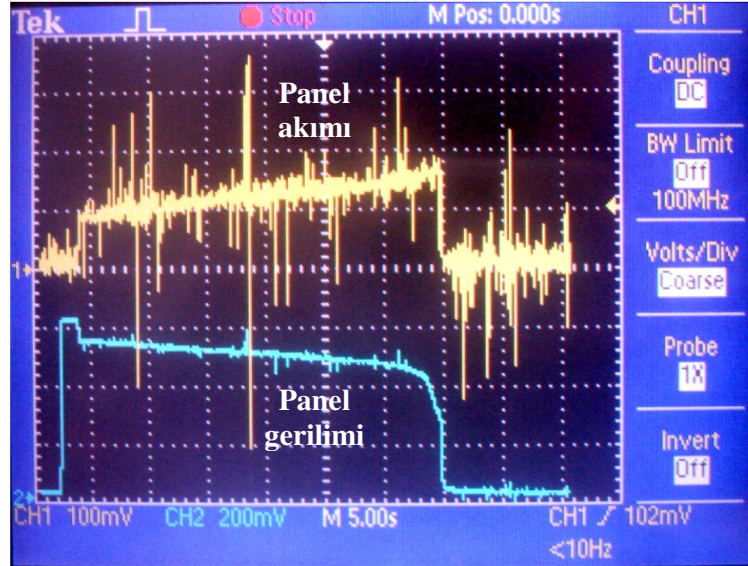


Şekil 4.14 PV panellerin maksimum güç noktasındaki akım değerinin bulunması amacıyla kullanılan sinir ağı konfigürasyonu

Gerçekleştirilen sinir ağında gizli katman ve çıkış katmanında transfer fonksiyonu olarak tanjant hiperbolik fonksiyonu kullanılmıştır. Böylece çıkışların -1 ile +1 arasında elde edilmesi sağlanmıştır. Çıkış, pozitif veya negatif büyük değerler olsa bile, -1 ile +1 arasında sınırlandırılmaktadır. Bu çalışmada belirlenen eğitme iterasyonu sayısı 100, hata hedefi 1.10^{-10} dur. Eğitme sonucunda elde edilen ağırlık ve biyas değerleri DSP’de YSA yapısının gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır.

4.2.1.1. MPPT denetleyici için YSA’da veri setinin elde edilmesi

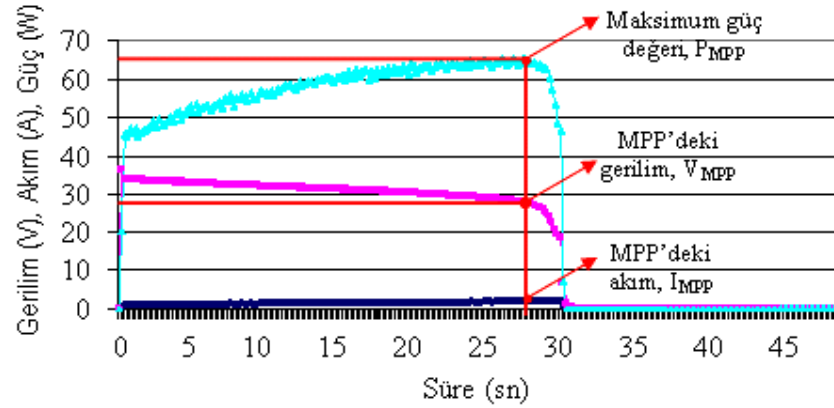
Bu çalışmada veri seti, PV panel simülasyonlarından hesaplanan değerler yerine deneysel ölçümlerle bulunan maksimum güç noktası değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.15’te 700W/m^2 ışık şiddeti ve 44°C PV panel sıcaklığı için deneysel olarak elde edilen PV panel gerilimi ve akımı dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.15 Veri setinin elde edilmesi için yapılan deneysel ölçümlerden bulunan PV panel gerilimi ve akımının değişimi (Volt/Div: CH1-13.3V CH2-1.5A, Time/Div:5s)

PV panel gerilimi ve akımı için ölçümler belli zaman aralıkları ile DSP’de saklanmış, buradan bulunan maksimum güç değerine karşılık gelen maksimum gerilim değeri YSA’da kullanılmak üzere eğitime setine eklenmiştir. Yukarıda verilen ortam şartları için DSP’de saklanan veriler kullanılarak elde edilen maksimum güç noktası değeri Şekil 4.16’da görülmektedir. Gerçekleştirilen sistemde veri setinin elde edilmesi, motorun hızı artırılarak yükün ihtiyacı olan mekanik güç artırılmak suretiyle, maksimum güç noktaları belirlenerek yapılmıştır. Her bir dış ortam şartı için her örnekleme periyodunda akım ve gerilim değerleri elde edilmiş, DSP’de kaydedilen bu değerlerden en yüksek güç değerine karşılık gelen gerilim değerleri giriş verisi olarak kaydedilmiştir.

Maksimum güç noktası izleyicinin geniş bir aralıktaki ortam şartları için doğru şekilde çalışabilmesinde, eğitime verisinin geniş bir aralığı kapsamı büyük önem taşır. Bu amaçla ışık şiddeti için $91-1105 \text{ W/m}^2$, PV panel sıcaklığı için $11-72.2^\circ\text{C}$ aralığını kapsayan değerler için sinir ağının eğitilmesinde kullanılmak üzere 500 adet veri elde edilmiştir. Bu verinin 350 adedi (toplam verinin %70’i) eğitime için, 100 adedi (toplam verinin %20’si) doğrulama veri seti, 50 adedi ise (toplam verinin %10’u) test seti olarak kullanılmıştır.

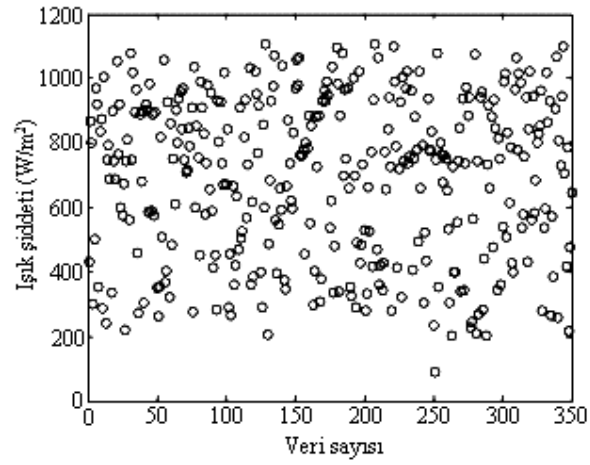


Şekil 4.16 Maksimum güç noktasının bulunması amacıyla DSP'de saklanan veriler ve maksimum güç noktasındaki gerilim değerinin bulunması

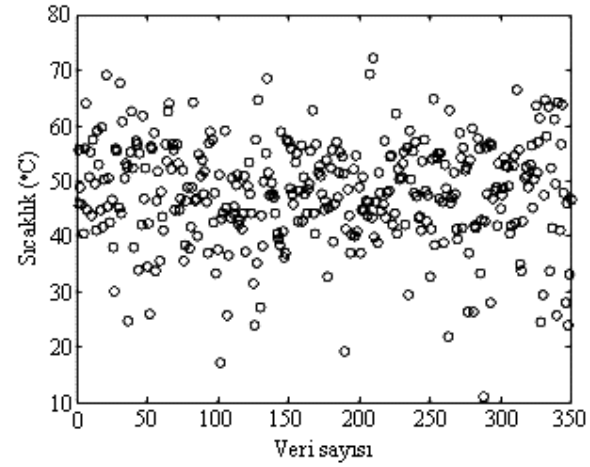
YSA'da eğitime için verilerin elde edildiği ışık şiddeti ve sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 4.17(a) ve (b)'de, bu giriş değerleri için deneysel olarak elde edilen ve eğitmede kullanılan maksimum gerilim (V_{MPP}) değerleri ise Şekil 4.17(c)'de verilmiştir. Giriş verisi elde edildikten sonra değişkenlerin değerlerinin -0.9 ile +0.9 arasında tutulması için normalize işlemi yapılmıştır. Böylece sinir hücrelerinin çıkışlarının doyuma uğraması ve giriş değerlerindeki değişimin çıkışta görünmemesi ihtimali önlenmiştir.

4.2.1.2. MPPT denetleyici için YSA mimarisinin GA optimizasyonu ile belirlenmesi

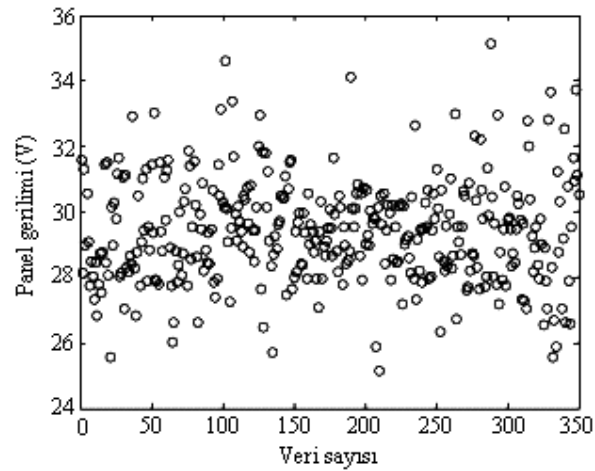
YSA için gizli katmanların ve sinir hücrelerinin optimum sayısının belirlenmesinde belirli bir kural yoktur. Teorik olarak üç katmanlı bir YSA, lineer olmayan fonksiyonların tümüne doğru bir yaklaşım sağlayabilmektedir (Hecht-Nielsen 1990, Basheer 2000). Tezde seçilen mimari bir giriş katmanı, bir gizli katman ve bir çıkış katmanına sahip üç katmanlı ileri beslemeli bir ağ yapısıdır. Bu çalışmada genetik optimizasyon kullanımının sağladığı avantajın incelenebilmesi için, gizli düğüm sayılarının bulunması amacıyla öncelikle geleneksel deneme yanılma yöntemi gerçekleştirilmiş, eğitime ve doğrulama için Şekil 4.18'de gösterilen ortalama karesel hata (MSE) değerleri elde edilmiştir. Bu yöntemde YSA, 1-31 arasında düğüm sayıları için eğitilerek performans sonuçları elde edilmiştir.



(a)

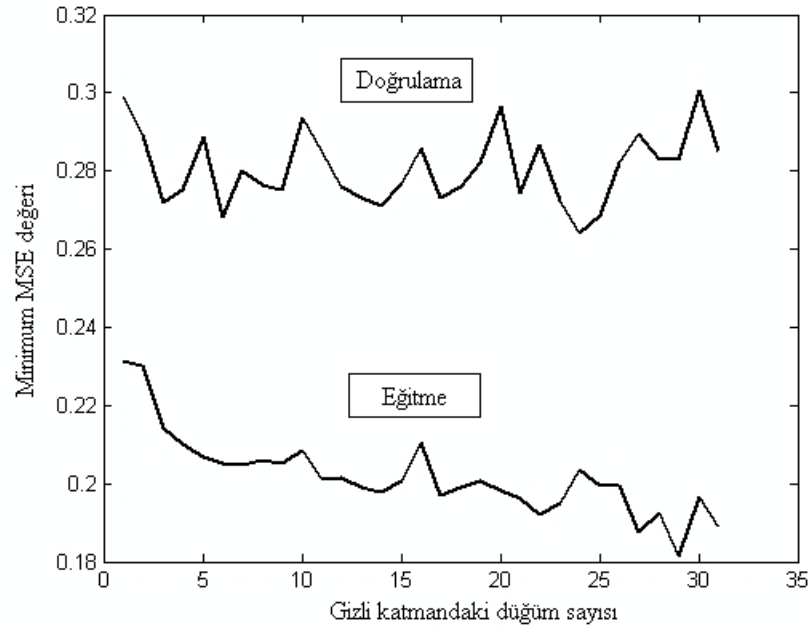


(b)



(c)

Şekil 4.17 MPPT denetleyici için gerçekleştirilen YSA'nın eğitilmesinde kullanılan (a) ışık şiddeti (G), (b) PV panel sıcaklığı (T) ve (c) maksimum gerilim (V_{MPP}) verileri



Şekil 4.18 Geleneksel deneme yanılma yönteminde düğüm sayısına 1-31 arası değerler verildiğinde elde edilen minimum MSE değerleri

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi yaklaşık beş düğümden sonra MSE’ler oldukça yakın değerlerde değişmektedir. Tablo 4.3’te verilen MSE değerlerine bakıldığında deneme yanılma yönteminde en iyi ağ, eğitime için 29 düğüm sayısında, doğrulama için ise 24 gizli düğüm sayısında bulunmuştur. Düğüm sayıları, karmaşıklığı, bilgisayar hafızasını ve işlem zamanını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu amaçla özellikle bu çalışmada YSA yapısı DSP üzerinde gerçekleştirildiğinden, sinir hücresi sayısı büyük öneme sahiptir. Deneme yanılma yönteminde bulunan gizli katmandaki sinir hücresi sayılarının yüksek olması, eğitime verisinin ezberlenerek aşırı öğrenme durumunun ortaya çıkmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, gizli katmandaki sinir hücresi sayılarının belirlenmesinde GA optimizasyonu kullanılmıştır.

Tablo 4.3 Geleneksel deneme yanılma yönteminde düğüm sayısına 1-31 arası değerler verildiğinde elde edilen ağ performansı

En iyi ağ	Eğitime	Doğrulama
Gizli düğüm sayısı	29	24
Epok sayısı	87	70
Minimum MSE	0.1814	0.2643

Kromozomların kodlanmasında dolaylı kodlama yöntemi kullanıldığından sadece gizli katmandaki sinir hücresi sayıları hakkındaki bilgi, kromozomlara dahil edilmiştir. Parametreler, 5-bit uzunluğunda ikili kromozomlara kodlanmıştır. İkili kodlama ve kullanılan bitlerin sayısına bağlı olarak gizli katmandaki sinir hücresi sayıları [0,31] aralığındadır. Bu nedenle, çalışmada kullanılan yaklaşımda çözüm uzayı, gizli katmandaki gizli düğüm sayıları için 0 ile 31 arasındaki değerlere sahip sinir ağı mimarilerinin tümünü kapsamaktadır. Bu kısımda gerçekleştirilen algoritma için GA, Bölüm 3.2.3'te verildiği gibi uygulanmıştır.

GA yapısında popülasyon sayısı 4 olarak seçilmiş, GA 50 nesil için yürütülmüş, her bir nesildeki yeni nesil sayısı %75 olarak belirlenmiştir. Böylece, her bir nesilde 3 yeni birey oluşturulmuştur. Doğal seçim genetik operatörü olarak rulet metodu, yeni nesillerin oluşturulması için ise tek nokta çaprazlama metodu kullanılmıştır. Bu metotta, L kromozom uzunluğu olmak üzere [1,L-1] aralığında bir tamsayı rasgele şekilde belirlenmiş, iki ebeveyn kromozomu, bu sayının belirlediği pozisyon etrafında sayı dizilerini değiştirmiştir. Ayrıca elitizm metodu kullanılarak her bir nesilde elde edilen en iyi birey saklanmıştır. Eğitimde kullanılan GA parametreleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4 Gizli katmandaki sinir hücresi sayısının belirlenmesinde kullanılan GA parametreleri

Mutasyon operatörü, P_m	0.05
Çaprazlama operatörü, P_c	1
Popülasyon büyüklüğü	4
Maksimum nesil sayısı	50
Doğal seçim tipi	Rulet
Doğal seçim tabanı	Rank
Çaprazlama	Tek nokta

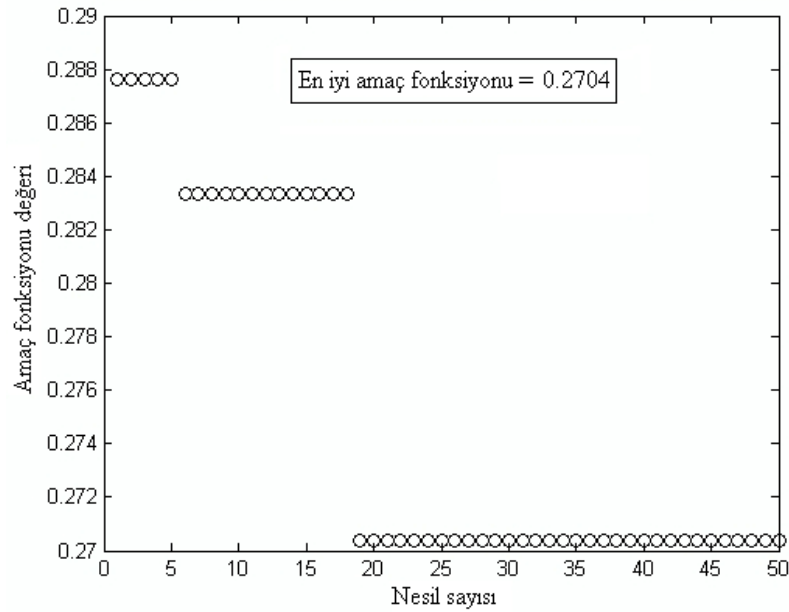
GA'da amaç fonksiyonuna bir ceza (penalty) terimi eklenmesi ile düğüm sayısının gereğinden fazla sayıda olmasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle amaç fonksiyonu için Benardos ve Vosniakos (2007) tarafından verilen $\alpha e^{f(x)}$ genel ifadesine benzer şekilde (4.1) denkleminde görülen ifade kullanılmış, böylece sinir ağı mimarisi genetik optimizasyon ile belirlenmiştir.

$$\text{Amaç fonksiyonu} = E_g e^{f(x)} \quad (4.1)$$

Burada $f(x)$ ağırlıkların ve biyasların toplamı için bir fonksiyon, E_g sinir ağında doğrulama için elde edilen MSE değeridir. Gerçekleştirilen MPPT uygulamasında çıkış değerinin doğru şekilde bulunabilmesi için, eğitme hatası yerine doğrulama hatasının kullanılması ile ağıdaki genelleştirme yeteneğine katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

GA'larda verilen bir problem için elde edilen sonucun başarılı şekilde bulunduğu gösterilebilmesi için genellikle birden çok sayıda bağımsız olarak çalıştırılması gerekir. Bu nedenle farklı katsayıların etkisinin incelenmesi amacıyla üç farklı denklem için sinir ağında beşer adet GA optimizasyonlu eğitme gerçekleştirilmiştir.

- 1. durum: Amaç fonksiyonunun ($E_g e^{0.001x}$) olarak alındığı durum için gerçekleştirilen 5 ayrı GA optimizasyonlu eğitme için elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir. Verilen sonuçlardan, en iyi amaç fonksiyonu değerine ulaşanlar içinde en düşük genelleştirme hatasına sahip olanı, 1_5 nolu eğitme için bulunmuştur. Bu eğitimde amaç fonksiyonunun nesil sayısına göre değişimi Şekil 4.19'da verilmiştir. Sonuç olarak bu durum için optimum YSA mimarisi 2x12x1 olarak bulunmuştur.

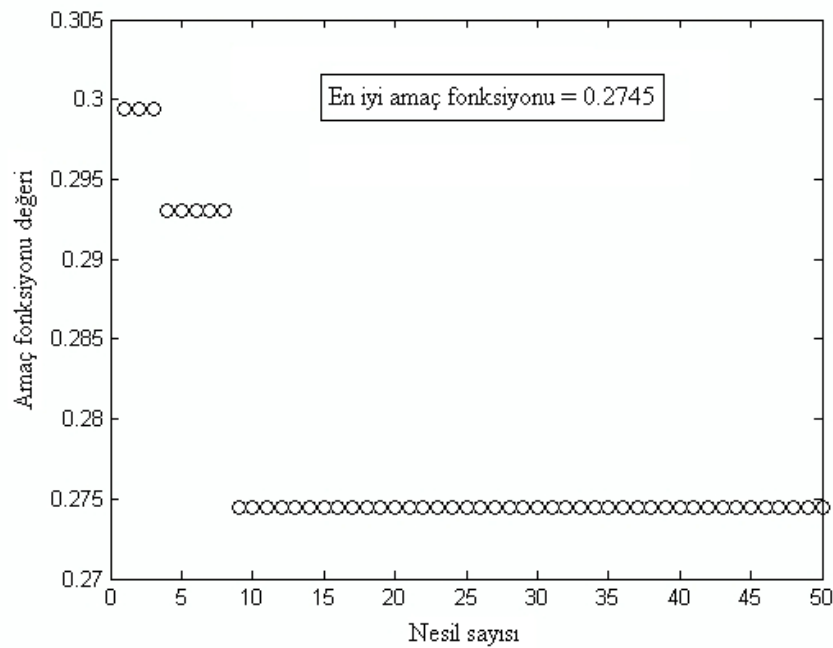


Şekil 4.19 1. durum için gerçekleştirilen genetik algoritma optimizasyonunda elde edilen amaç fonksiyonu değerinin nesil sayısına göre değişimi

Tablo 4.5 Amaç fonksiyonu = $E_g e^{0.001x}$ olarak alındığı durumda elde edilen eğitim sonuçları

Eğitme no	YSA mimarisi	Toplam ağırlık ve biyas sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Genelleştirme hatası (MSE)
1_1	2x6x1	25	0.2775	0.2706
1_2	2x10x1	41	0.2799	0.2687
1_3	2x9x1	37	0.2731	0.2632
1_4	2x7x1	29	0.2733	0.2654
1_5	2x12x1	49	0.2704	0.2574

• 2. durum: Amaç fonksiyonunun ($E_g e^{0.0025x}$) olarak alınması durumunda ağırlık ve biyasların toplam sayısına göre uygulanan ceza terimi daha büyük değerler almakta, böylece önceki duruma göre daha kompleks mimariler daha fazla oranda cezalandırılmaktadır. GA optimizasyonu kullanılarak gerçekleştirilen 5 farklı genetik optimizasyonlu eğitimde Tablo 4.6’da verilen sonuçlar elde edilmiş ve en iyi amaç fonksiyonu değerine ulaşanlar içinde en düşük genelleştirme hatasına sahip olanı, 2_5 nolu eğitim için bulunmuştur. Bu eğitimde amaç fonksiyonunun nesil sayısına göre değişimi Şekil 4.20’de verilmiştir. Buna göre bu durum için optimum YSA mimarisi 2x5x1 olarak bulunmuştur.

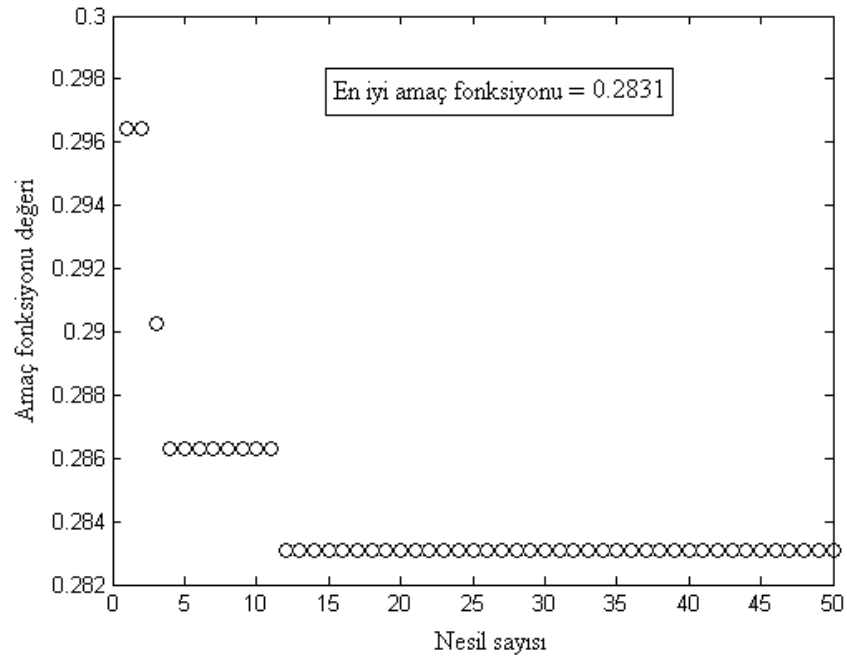


Şekil 4.20 2. durum için gerçekleştirilen genetik algoritma optimizasyonunda elde edilen amaç fonksiyonu değerinin nesil sayısına göre değişimi

Tablo 4.6 Amaç fonksiyonu = $E_g e^{0.0025x}$ olarak alındığı durumda elde edilen eğitim sonuçları

Eğitme no	YSA mimarisi	Toplam ağırlık ve biyas sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Genelleştirme hatası (MSE)
2_1	2x6x1	25	0.2796	0.2626
2_2	2x4x1	17	0.2821	0.2703
2_3	2x4x1	17	0.2780	0.2664
2_4	2x2x1	9	0.2855	0.2792
2_5	2x5x1	21	0.2745	0.2553

• 3. durum: Amaç fonksiyonunun ($E_g e^{0.0001x^2}$) olarak alındığı bu durumun önceki iki duruma göre farkı, toplam ağırlık ve biyasların karesinin eksponensiyel değerinin alınmasıdır. Bu durumda mimarideki ceza teriminin etkisi daha büyük değerlerde daha çok ortaya çıkmakta ve kompleks mimariler önceki iki duruma göre daha çok cezalandırılmaktadır. Tablo 4.7’de verilen 5 farklı genetik optimizasyonlu eğitimde, en iyi amaç fonksiyonu değerine ulaşanlar içinden en düşük genelleştirme hatasına sahip olanı, 3_5 nolu eğitim için bulunmuş ve bu eğitimde amaç fonksiyonunun nesil sayısına göre değişimi Şekil 4.21’de verilmiştir. Böylece bu durum için optimum mimari 2x4x1 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.21 3. durum için gerçekleştirilen genetik algoritma optimizasyonunda elde edilen amaç fonksiyonu değerinin nesil sayısına göre değişimi

Tablo 4.7 Amaç fonksiyonu = $E_g e^{0.0001x^2}$ olarak alındığı durumda elde edilen eğitime sonuçları

Eğitime no	YSA mimarisi	Toplam ağırlık ve biyas sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Genelleştirme hatası (MSE)
3_1	2x3x1	13	0.2796	0.2749
3_2	2x2x1	9	0.2812	0.2789
3_3	2x3x1	13	0.2854	0.2806
3_4	2x5x1	21	0.2831	0.2709
3_5	2x4x1	17	0.2854	0.2772

Üç farklı denklemin kullanıldığı üç durum içerisinde elde edilen optimum ağ mimarilerine bakıldığında, en düşük genelleştirme hatasına sahip olanı 2_5 nolu eğitime için elde edilen 2x5x1 topolojisi olduğundan, bu çalışmada gizli düğüm sayısı 5 olarak alınmış, böylece DSP’de gerçekleştirmek için ideal büyüklükte bir YSA yapısı elde edilmiştir.

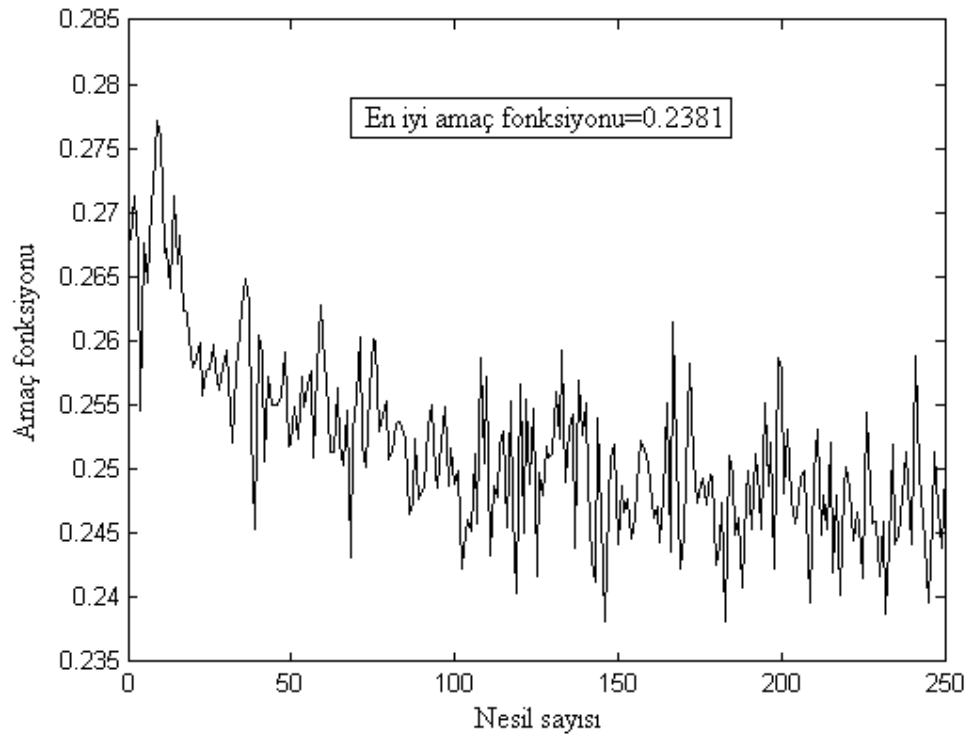
4.2.1.3. MPPT’de YSA’nın giriş veri seti optimizasyonu için GA’nın kullanımı

Gerçekleştirilen sinir ağı Levenberg-Marquardt (LM) algoritması ile eğitilmiştir. YSA’da GA yardımının kullanılmasıyla giriş veri setinin optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve GA’nın kullanılmaması durumuna göre daha iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Giriş veri seti optimizasyonunda GA yardımı Bölüm 3.2.3’te verilen teoriye uygun şekilde gerçekleştirilmiş ve Tablo 4.8’de verilen GA parametreleri kullanılmıştır.

Tablo 4.8 Giriş veri seti optimizasyonunda kullanılan GA parametreleri

Mutasyon operatörü, P_m	0.02
Çaprazlama operatörü, P_c	0.9
Popülasyon büyüklüğü	20
Maksimum nesil sayısı	250
Doğal seçim tipi	Rulet
Çaprazlama	Tek nokta

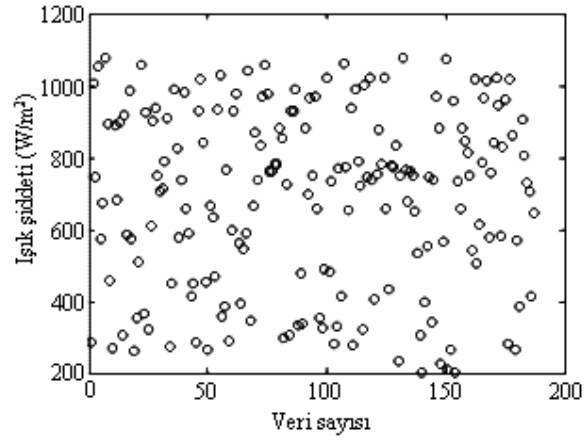
Giriş veri seti optimizasyonunda GA yardımının uygulanmasında en iyi amaç fonksiyonu değerinin nesile göre değişim grafiği Şekil 4.22’de, GA optimizasyonu kullanılarak elde edilen ve her değişken için toplam 187 elemandan oluşan yeni veri seti ise Şekil 4.23’te görülmektedir.



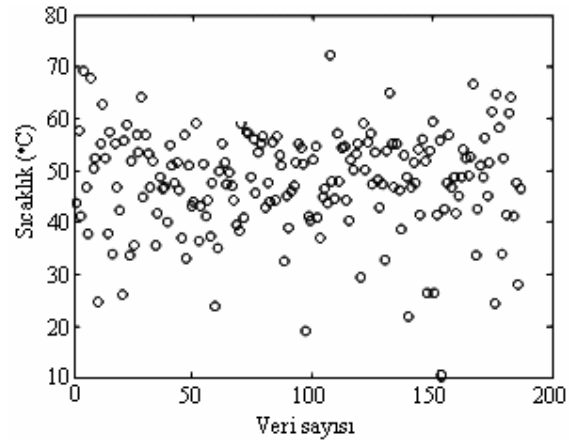
Şekil 4.22 En iyi amaç fonksiyonu değerlerinin nesile göre değişimi

Sinir ağı öncelikle GA optimizasyonu kullanılmadan önce LM algoritması ile eğitilmiş ve eğitim hatası 0.2137, doğrulama hatası ise 0.2802 olarak bulunmuştur. GA optimizasyonu ile elde edilen yeni veri seti kullanılarak eğitilen sinir ağında ise eğitim hatası 0.1806, doğrulama hatası ise 0.2381 olarak bulunmuştur. Burada her iki durum için eğitim, erken sonlandırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde sinir ağının aşırı öğrenmeye başladığı anda doğrulama hatasının artma eğilimi gösterdiği dikkate alınarak, bu artış belirli sayıda devam ettiği durumda eğitim süreci sonlandırılmıştır. Bu noktada ağın minimum doğrulama hatası üreten ağ parametreleri saklanmıştır.

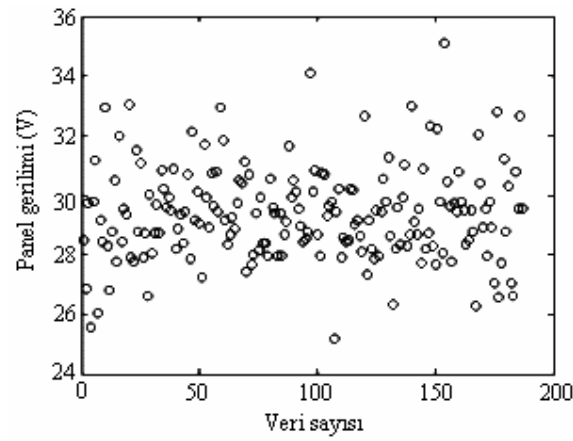
Sinir ağından elde edilen sonuçların doğruluğunun gösterilmesi amacıyla eğitim verisi içerisinde bulunmayan 50 adet rasgele giriş-çıkış veri noktası kullanılarak test işlemi gerçekleştirilmiştir. LM algoritması ile eğitilen sinir ağında test verisi için, istenen çıkış ile YSA çıkışı arasındaki farkı gösteren bağıl hata Şekil 4.24'te, giriş seti optimizasyonu için GA kullanılarak eğitilen sinir ağının testiyle elde edilen bağıl hata değerleri ise Şekil 4.25'teki gibi bulunmuştur.



(a)



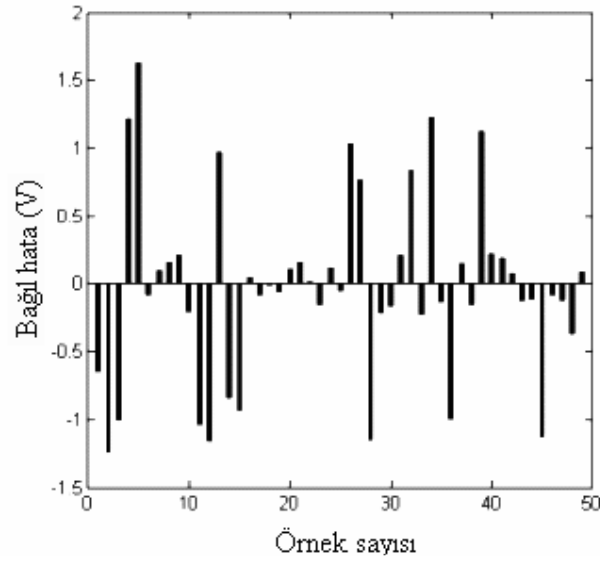
(b)



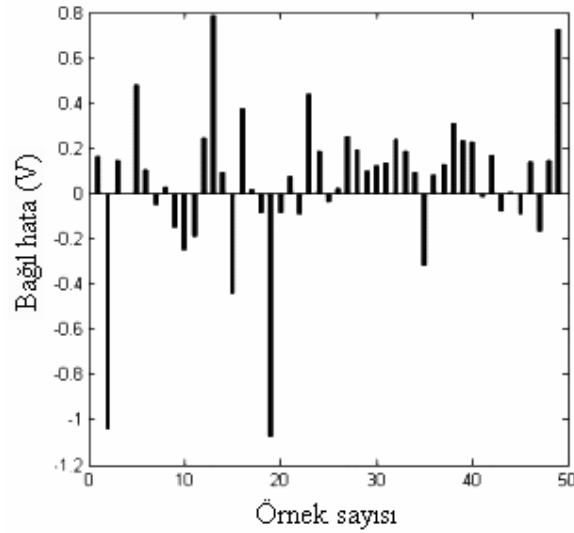
(c)

Şekil 4.23 GA optimizasyonu kullanılarak elde edilen (a) ışık şiddeti (G), (b) sıcaklık (T) ve (c) PV panel gerilimi (V_{MPP}) verisi

Geliştirilen sistemde YSA'nın GA yardımı da kullanılarak eğitilmesi işlemi en karmaşık ve en çok zaman harcanan kısım olmasına karşın, eğitime işleminin daha önceden bir defa yapılması yeterli olmaktadır. Bu nedenle DSP'de gerçekleştirilen yazılım için bu durum bir dezavantaj teşkil etmemektedir. Eğitmeden sonra YSA'daki bağlantı ağırlıkları ve biyas değerleri DSP'de kullanılmak üzere saklanmakta ve YSA yapısı, DSP üzerinde off-line olarak yürütülmektedir.



Şekil 4.24 LM algoritması ile eğitilen sinir ağının test edilmesiyle bulunan bağıl hata



Şekil 4.25 GA optimizasyonu kullanılarak eğitilen sinir ağının test edilmesiyle bulunan bağıl hata

4.2.2. PI denetleyicinin gerçekleştirilmesi

PI kontrol, oransal ve integral olarak denetleyicide iki terimi içermektedir. Oransal terim, hata sinyalinin oransal kazanç (K_p) olarak adlandırılan bir sabitle çarpımına eşittir ve denetleyicinin özellikle geçici durumdaki davranışını belirler. İntegral terim ise denetleyicinin sürekli durum cevabını etkiler. Bu terim, önceki hata değerleri toplamının integral kazanç (K_I) olarak adlandırılan bir sabitle çarpımıdır.

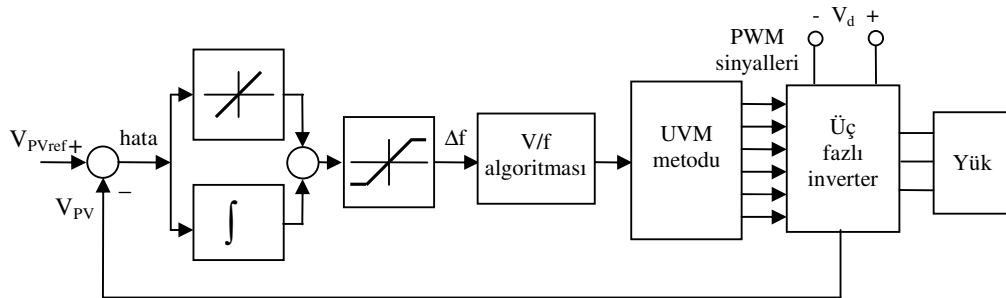
Şekil 4.26'da verilen blok diyagramında görüldüğü gibi PI kontrol çevriminde, ölçülen PV panel gerilimi V_{PV} , sinir ağı tabanlı MPPT algoritması tarafından hesaplanan referans gerilim (V_{PVref}) değeriyle karşılaştırılarak (4.2) denkleminde hata sinyali üretilir.

$$hata = V_{PVref} - V_{PV} \quad (4.2)$$

Hata sinyalinin genliği ve polaritesi PV panel geriliminin ölçüm ve referans değerleriyle belirlenir. Bu hata değerine göre PI denetleyicide, temel frekans için düzeltme bilgisini içeren frekanstaki değişme miktarı (Δf) değeri (4.3) denkleminde göre hesaplanır.

$$\Delta f = (K_p \cdot hata) + K_I \cdot \int (hata) dt \quad (4.3)$$

Önceki frekans değeriyle toplanan ve sınırlandırıcı ile belirli alt ve üst sınırlar arasında tutulan bu değer sonucunda inverter tarafından üretilecek sinüs dalganın temel frekansı belirlenir. UVM sinyallerinin üretilmesinde kullanılacak modülasyon faktörü değeri ise sonraki kısımda açıklanan sabit V/f kontrol yönteminden bulunmaktadır.



Şekil 4.26 PI denetleyicili sistemin blok diyagramı

4.2.3. Sabit V/f kontrollü asenkron motor sürücüsünün gerçekleştirilmesi

Verimli güç anahtarlama elemanları ve hızlı işlemcilere sahip olunması, asenkron motor sürücülerinin geliştirilmesini ve PV sistem uygulamasında kullanılmasını kolaylaştırmıştır. Asenkron motor sürücüsünde inverter birimi, PV panellerden sağlanan DC gerilimin, motorun çalıştırılması için uygun formda üç fazlı AC gerilime dönüştürülmesini sağlamaktadır. İnverterin çıkış karakteristikleri kontrol edilerek asenkron motor için ayarlanabilir genlik ve frekansta çıkış gerilimi elde edilmektedir. Bu yöntemde, inverter çıkış frekansı istenen hıza göre belirlenmekte ve motor hızının senkron hızı takip ettiği ve kaymadan dolayı hızda meydana gelen hataların ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilmektedir. Değişken hızlı AC sürücülerin çoğunluğuna uygulanan açık çevrim sabit V/f yönteminde iç akım denetleyici çevrimi bulunmaz. Bu kontrol yönteminin avantajları, programlanmasının kolay, hesaplama gereksinimlerinin az olmasıdır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen sistem, havalandırma, su pompalama gibi hassas hız ayarı gerektirmeyen uygulamalar için tasarlandığından, asenkron motor sürücü için açık çevrim V/f kontrolü kullanılmıştır. Sabit V/f kontrol yöntemi ile açık çevrim skaler motor kontrolü, önceki kısımda açıklanan PI denetleyici yardımıyla bulunan frekans değerine uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Üç fazlı inverterde YSA tabanlı UVM metodu için gerekli olan modülasyon faktörü değeri de $V/f = \text{sbt}$ olacak şekilde frekansa bağlı olarak belirlenmektedir.

Asenkron motorun statoruna uygulanan gerilim, frekansla orantılı olarak değiştirilerek hava aralığı akısı sabit tutulur. Uygulamada genellikle genlik ve frekans arasındaki oran, bu değişkenler için verilen motor anma değerlerinden belirlenir. Bu durum aşağıdaki denklemlerle verilir.

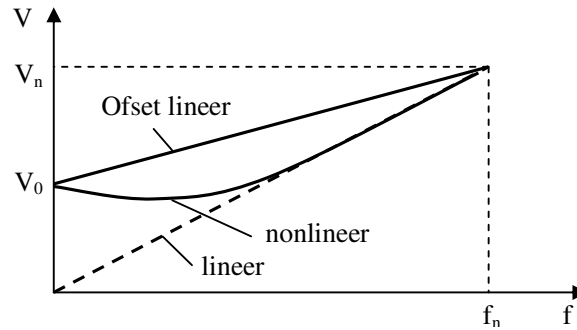
$$\phi \propto V / f = \text{sabit} \quad (4.4)$$

Bu durum, motorun normal frekansına yakın yerlerde iyi şekilde sağlanır. Ancak, normal motor akımında ortaya çıkan statordaki IR gerilim düşümü, frekans azaldıkça sabit kalır ve böylece düşük frekanslarda bu gerilim düşümü uç gerilimine göre yüksek değerler alır. Statordaki IR gerilim düşümünün kompanse edilmesi için düşük frekanslarda gerilim, frekansla orantılı olarak değiştiği değerlerin üzerine çıkartılır. Şekil 4.27’de iki farklı karakteristik görülmektedir. Nonlineer

karakteristikte V ve f yüksek frekanslarda birbiriyle orantılı olarak değişmekte, ancak frekans sıfıra yaklaştıkça bir gerilim artışı uygulanmaktadır. Ofset lineer karakteristiğinde ise frekansla orantılı olan bileşen $k.f$ 'e sabit bir V_0 gerilim artışı yapılmış ve böylece stator gerilimi (4.5) denklemi ile belirlenmiştir.

$$V = V_0 + k.f \quad (4.5)$$

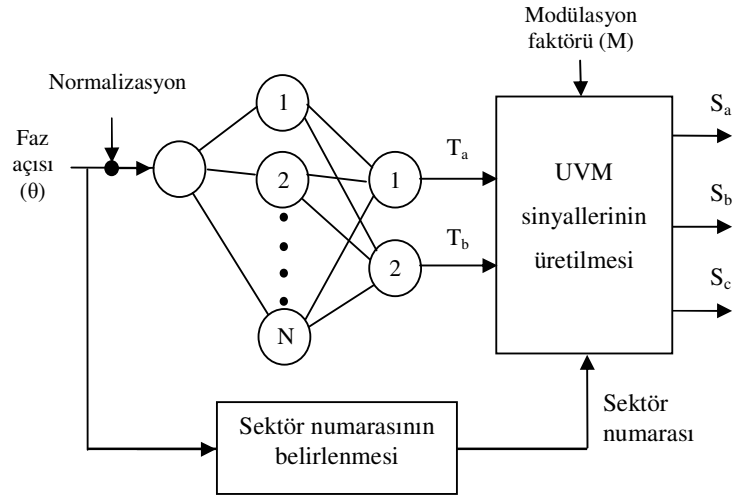
Bu çalışmada, düşük frekanslardaki stator direncine bağlı olarak oluşan gerilim düşümünü kompanze etmek için Şekil 4.27'de görülen ofset lineer karakteristiği kullanılmıştır.



Şekil 4.27 Açık çevrim asenkron motor sürücüsünde sabit V/f kontrol karakteristikleri

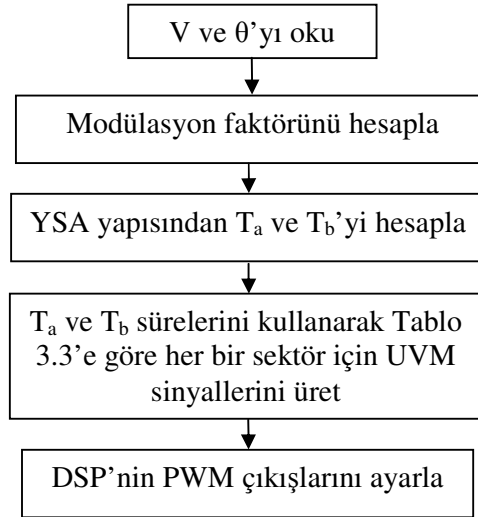
4.2.4. GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunun gerçekleştirilmesi

Sabit V/f yönteminde kontrol parametreleri olan modülasyon faktörü ve frekans, UVM metodunda direkt olarak kullanılabilir. Tezde gerçekleştirilen GA yardımcı YSA tabanlı UVM yapısı Şekil 4.28'de görülmektedir. Faz açısı (θ) öncelikle normalize edilmekte ve sinir ağına giriş olarak verilmektedir. T_a ve T_b değerleri sinir ağına hesaplanmakta ve bu değerler üç fazlı gerilim beslemeli inverterde üst kollardaki anahtarlama elemanlarının anahtarlama sürelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Sinyaller terslenerek ve bir ölü zaman değeri eklenerek alt koldaki üç anahtarlama elemanına uygulanmaktadır. Anahtarlama süresi hesaplama bloğunda, sinir ağından elde edilen T_a ve T_b değerleri, modülasyon faktörü (M) ve açılardan elde edilen sektör numarası kullanılarak Tablo 3.3 ile verilen bazı hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. S_a , S_b , S_c ile tanımlanan anahtarlama sinyalleri, her anahtarlama periyodunda DSP'nin üç fazlı PWM çıkış yazmaçlarına yüklenmektedir.



Şekil 4.28 Gerçekleştirilen UVM metodunun GA yardımcı YSA yapısı

Gerçekleştirilen metod için akış diyagramı Şekil 4.29’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi M ve θ değerleri okunmakta, sadece θ değeri kullanılarak yapay sinir ağı yapısında T_a ve T_b değerleri belirlenmektedir. Burada en yakın vektör bileşenlerinin ayrıca belirlenmesine gerek duyulmamaktadır. Sinir ağı çıkışında Tablo 3.3’teki basit işlemler, sektör numarası ve modülasyon faktörü kullanılarak anahtarlama elemanları için anahtarlama süreleri hesaplanmaktadır.

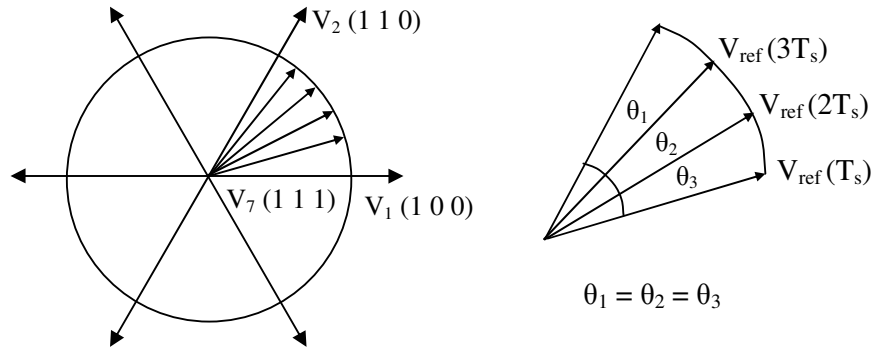


Şekil 4.29 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunun sayısal işaret işlemcide gerçekleştirilmesi

UVM inverterin DSP tabanlı gerçekleştirilmesinde kullanılan GA yardımcı YSA yapısı için öncelikle veri seti elde edilmiş, GA optimizasyonu kullanılarak düşük boyutlu optimal bir sinir ağı mimarisi belirlenmiştir. Daha sonra eğitme algoritmasının seçiminin ardından sinir ağı eğitilmiş ve test edilmiştir. Sonraki kısımlarda sinir ağı mimarisinin gerçekleştirilmesinde ve eğitilmesinde kullanılan adımlar, eğitme ve test ile ilgili simülasyon sonuçları verilmiştir.

4.2.4.1. UVM metodu için YSA’da veri setinin elde edilmesi

YSA, UVM algoritmasının hesaplanmasından üretilen veri kullanılarak eğitilmiştir. Algoritmadaki hesaplamalarda, örnekleme frekansı $f_s=9\text{kHz}$ 'tir. Şekil 4.30'da görüldüğü gibi referans vektör, faz açısına bağlı olarak sabit bir genlikle dairesel yörünge üzerinde hareket etmektedir. Anahtarlama frekansı, sabit olduğu ve bir PWM periyodu 2π radyan boyunca tarandığı için θ , çıkış frekansına bağlı olarak sabit değerlerde artırılmıştır.



Şekil 4.30 Referans vektörün faz açısına bağlı olarak dairesel yörünge üzerinde hareketi

UVM algoritmasında sadece lineer bölge ele alındığı için, örnekleme verisi modülasyon faktörü değerini içermemekte ve oldukça iyi bir hata değerine sahip küçük boyutlu bir ağ yapısının elde edilebilmesi mümkün olmaktadır.

4.2.4.2. UVM metodu için YSA mimarisinin GA optimizasyonu ile belirlenmesi

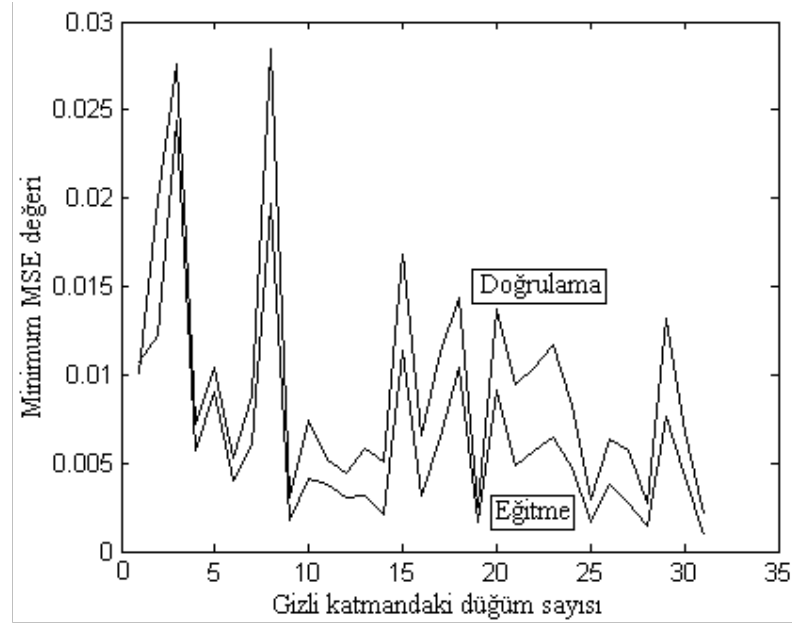
Bu çalışmada YSA, DSP üzerinde yürütüldüğünden sinir hücresi sayısı büyük öneme sahiptir. Gerçekleştirilen sinir ağında GA optimizasyonu, gizli katmandaki sinir hücresi sayılarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Kromozomların kodlanmasında, dolaylı kodlama yöntemi kullanılmış ve sadece gizli katmandaki sinir hücresi sayıları hakkındaki bilgi kromozomlara dahil edilmiştir. Parametreler 5-bit uzunluğunda ikili kromozomlara kodlanmıştır. İkili kodlama ve kullanılan bitlerin sayısına bağlı olarak gizli katmandaki sinir hücresi sayıları [0,31] aralığındadır. Böylece, çalışmada kullanılan yaklaşımda çözüm uzayı, gizli katmandaki gizli düğüm sayıları için 0 ile 31 arasındaki değerlere sahip sinir ağı mimarilerinin tümünü içermektedir.

GA yapısında popülasyon büyüklüğü, 4 kromozom sayısına sahip olacak şekilde sabit olarak seçilmiş, GA 50 nesil için yürütülmüş ve her bir popülasyondaki yeni nesil sayısı %75 olarak belirlenmiştir. Doğal seçim genetik operatörü olarak rulet metodu, yeni nesillerin oluşturulması için ise tek nokta çaprazlama metodu kullanılmıştır. Eğitimde kullanılan GA parametreleri Tablo 4.9’da görülmektedir.

Tablo 4.9 Gizli katmandaki sinir hücresi sayısının belirlenmesinde kullanılan GA parametreleri

Mutasyon operatörü, P_m	0.05
Çaprazlama operatörü, P_c	1
Popülasyon büyüklüğü	4
Maksimum nesil sayısı	50
Doğal seçim tipi	Rulet
Doğal seçim tabanı	Rank
Çaprazlama	Tek nokta

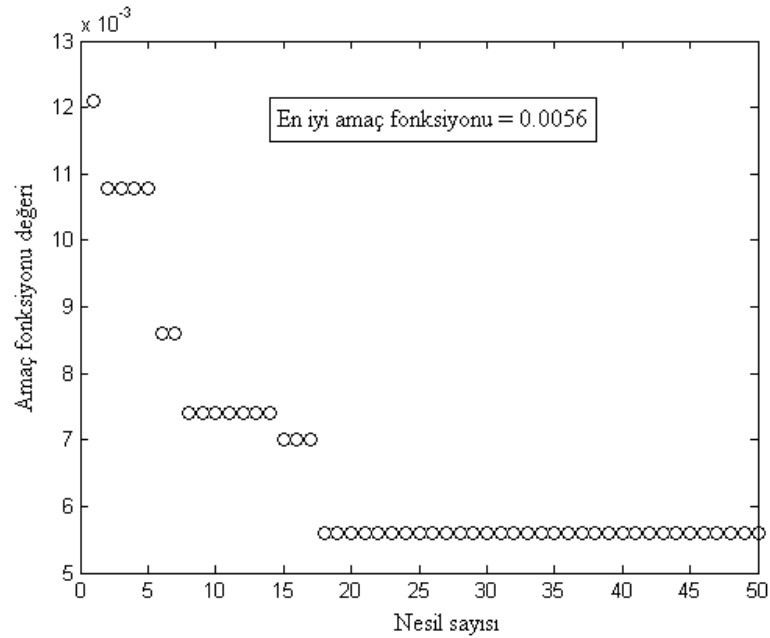
UVM’nin gerçekleştirilmesinde kullanılan sinir ağında gizli düğüm sayılarının bulunması amacıyla öncelikle geleneksel deneme yanılma yöntemi uygulanmıştır. Eğitim ve doğrulama seti için elde edilen MSE değerlerinin değişimi Şekil 4.31’de gösterilmektedir. Sinir ağının 1-31 arasındaki düğüm sayıları için eğitilmesiyle bulunan ağ performansı sonuçlarından, MSE değerine bakıldığında en iyi ağ eğitimde 31 düğüm sayısı, doğrulamada ise 19 gizli düğüm sayısı için bulunmuştur.



Şekil 4.31 Geleneksel deneme yanılma yönteminde düğüm sayısına 1-31 arası değerler verildiğinde elde edilen minimum MSE değerleri

Deneme yanılma yöntemiyle bulunan ağ mimarisi, DSP’de programlanabilecek boyutta olmadığından, GA optimizasyonunda amaç fonksiyonuna bir ceza terimi eklenmesi ile düğüm sayısının gereğinden fazla sayıda olmasının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle amaç fonksiyonu için $\alpha e^{f(x)}$ genel ifadesi ve genelleştirme hatasının çarpımından oluşan daha önceden (4.1) ile verilen denklem kullanılmış, böylece sinir ağı mimarisi GA optimizasyonu ile belirlenmiştir. (4.1) denkleminde farklı katsayıların etkisinin incelenmesi amacıyla iki farklı durum için sinir ağına beşer adet GA optimizasyonlu eğitim gerçekleştirilmiştir.

- 1. durum: Amaç fonksiyonu = $E_g e^{0.025x}$ olarak alındığında, Tablo 4.10’da görüldüğü gibi, gerçekleştirilen 5 ayrı eğitimden en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olanlar içinde en düşük genelleştirme hatasına sahip olanı 1_3 nolu eğitim için elde edilmiştir. Bu eğitimde amaç fonksiyonunun nesil sayısına göre değişimi Şekil 4.32’de verilmiştir. Buna göre bu durum için optimum YSA mimarisi 1x6x2 olarak bulunmuştur.

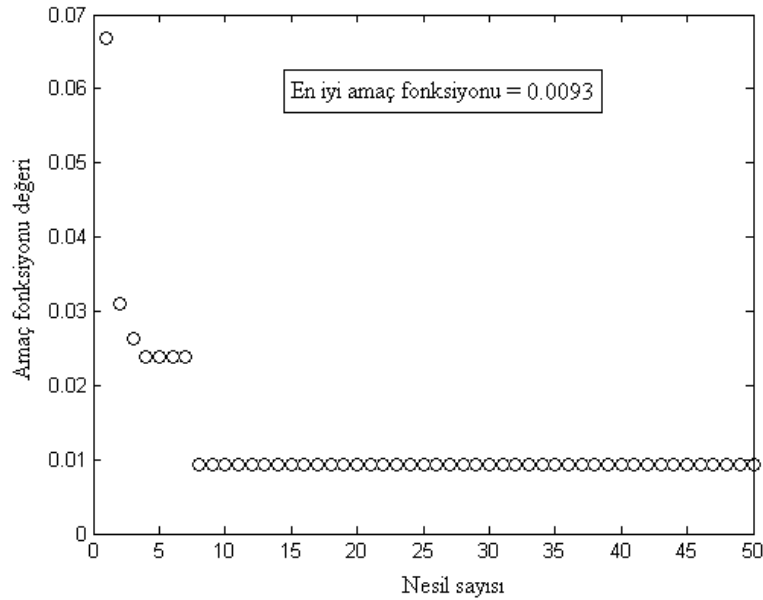


Şekil 4.32 1. durum için gerçekleştirilen genetik algoritma optimizasyonunda elde edilen amaç fonksiyonu değerinin nesil sayısına göre değişimi

Tablo 4.10 Amaç fonksiyonu = $E_g e^{0.025x}$ olarak alındığı durumda elde edilen eğitim sonuçları

Eğitme no	YSA mimarisi	Toplam ağırlık ve biyas sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Genelleştirme hatası (MSE)
1_1	1x9x2	38	0.0083	0.0032
1_2	1x4x2	18	0.0061	0.0039
1_3	1x6x2	26	0.0056	0.0029
1_4	1x6x2	26	0.0069	0.0036
1_5	1x9x2	38	0.0080	0.0031

• 2. durum: Amaç fonksiyonu = $E_g e^{0.05x}$ olarak alındığında, ağırlık ve biyasların toplam sayısına göre uygulanan ceza terimi daha büyük olmakta, böylece önceki durumda uygulanana göre daha kompleks mimariler için amaç fonksiyonu daha düşük değerler almaktadır. Tablo 4.11’de görüldüğü gibi gerçekleştirilen 5 ayrı eğitimden, en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip olanlar içinde en düşük genelleştirme hatasına sahip olanı 2_5 nolu eğitim için elde edilmiştir. Bu eğitimde amaç fonksiyonunun nesil sayısına göre değişimi Şekil 4.33’te görülmektedir. Buna göre bu durum için optimum YSA mimarisi 1x5x2 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.33 2. durum için gerçekleştirilen genetik algoritma optimizasyonunda elde edilen amaç fonksiyonu değerinin nesil sayısına göre değişimi

Tablo 4.11 Amaç fonksiyonu = $E_g e^{0.05x}$ olarak alındığı durumda elde edilen eğitme sonuçları

Eğitme no	YSA mimarisi	Toplam ağırlık ve biyas sayısı	Amaç fonksiyonu değeri	Genelleştirme hatası (MSE)
2_1	1x4x2	18	0.0106	0.0043
2_2	1x3x2	14	0.0089	0.0044
2_3	1x5x2	22	0.0102	0.0034
2_4	1x3x2	14	0.0081	0.0040
2_5	1x5x2	22	0.0093	0.0031

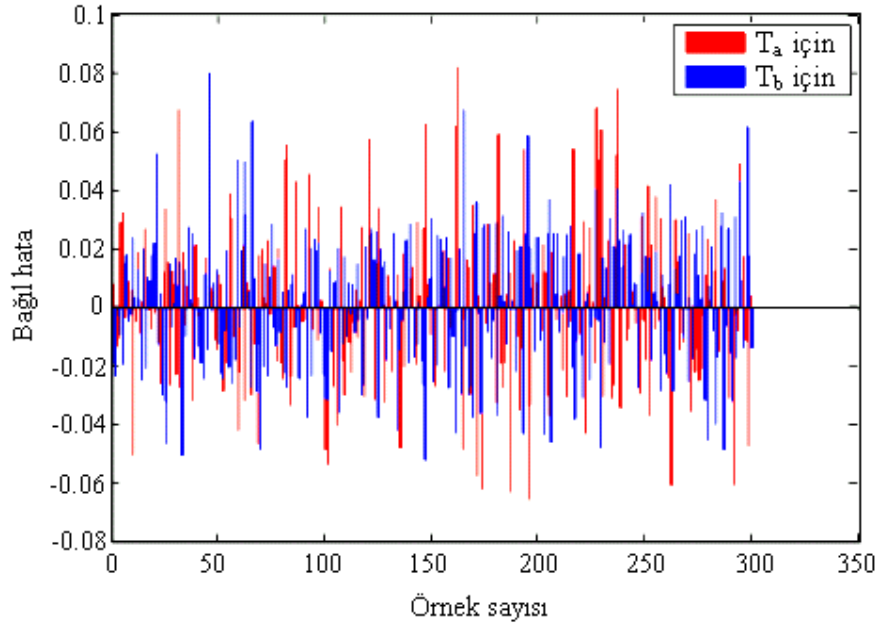
İki durum için en iyi amaç fonksiyonu değerine ulaşılan sinir ağları içinden genelleştirme hatasına bakıldığında, elde edilen en düşük değer 1x6x2 YSA mimarisine sahip olan için bulunmuştur. Bu nedenle bu çalışmada UVM metodunun YSA tabanlı gerçekleştirilmesinde 6 gizli düğüm kullanılarak DSP ile gerçekleştirme için uygun büyüklükte bir yapı elde edilmiştir.

4.2.4.3. UVM metodu için YSA'nın eğitilmesi ve testi

Gerçekleştirilen sinir ağında gizli katman ve çıkış katmanında transfer fonksiyonu olarak tanjant hiperbolik fonksiyonu, sinir ağının eğitilmesinde ise Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmıştır. Eğitme iterasyonu sayısı 100, hata

hedefi 1.10^{-10} 'dur. YSA'nın off-line olarak eğitilmesinden elde edilen ağırlık ve biyas değerleri tezde geliştirilen UVM metodunun DSP'de yürütülmesi amacıyla kullanılmıştır. Erken sonlandırma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen eğitime sonunda eğitime hatası için MSE değeri 0.0033, doğrulama hatası için 0.0971, test hatası için ise 0.1451 olarak bulunmuştur.

Sinir ağından elde edilen sonuçların doğruluğunun gösterilmesi amacıyla eğitime verisi içerisinde bulunmayan 300 adet rasgele giriş-çıkış verisi kullanılarak test işlemi gerçekleştirilmiştir. LM algoritması ile eğitilen sinir ağı için test verisi kullanılarak elde edilen çıkışlar ile istenen çıkış değerleri arasındaki farkı gösteren bağıl hata değerleri Şekil 4.34'te görülmektedir.



Şekil 4.34 Eğitilen sinir ağında anahtarlama süreleri T_a ve T_b için, istenen ve sinir ağından elde edilen çıkış değerleri arasındaki farkı gösteren bağıl hata değerleri

5. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN SONUÇLARI

Tasarlanan PV sistemin çıkışına, sırasıyla üç fazlı yıldız bağlı R-L yük ($R=4\Omega$, $L=7.5\text{mH}$) ve üç fazlı yıldız bağlı bir asenkron motor bağlanarak çeşitli simülasyon çalışmaları yapılmış ve pratik olarak gerçekleştirilen sistemden bazı deneysel sonuçlar alınmıştır. Bu bölümde öncelikle geliştirilen GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması her iki yük değeri için simüle edilmiş, geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritması ile karşılaştırılarak tasarımın geçerliliği gösterilmiştir. Daha sonra GA yardımcı YSA tabanlı UVM inverter için simülasyon sonuçları her iki yük için de elde edilmiş, gerçekleştirilen geleneksel yapıdaki UVM metoduyla karşılaştırılmıştır. Pratik olarak gerçekleştirilen sistemden çeşitli deneysel sonuçlar elde edilmiş, böylece geliştirilen algoritmaların geçerliliği simülasyon ve deneysel sonuçlarla detaylı olarak incelenmiştir.

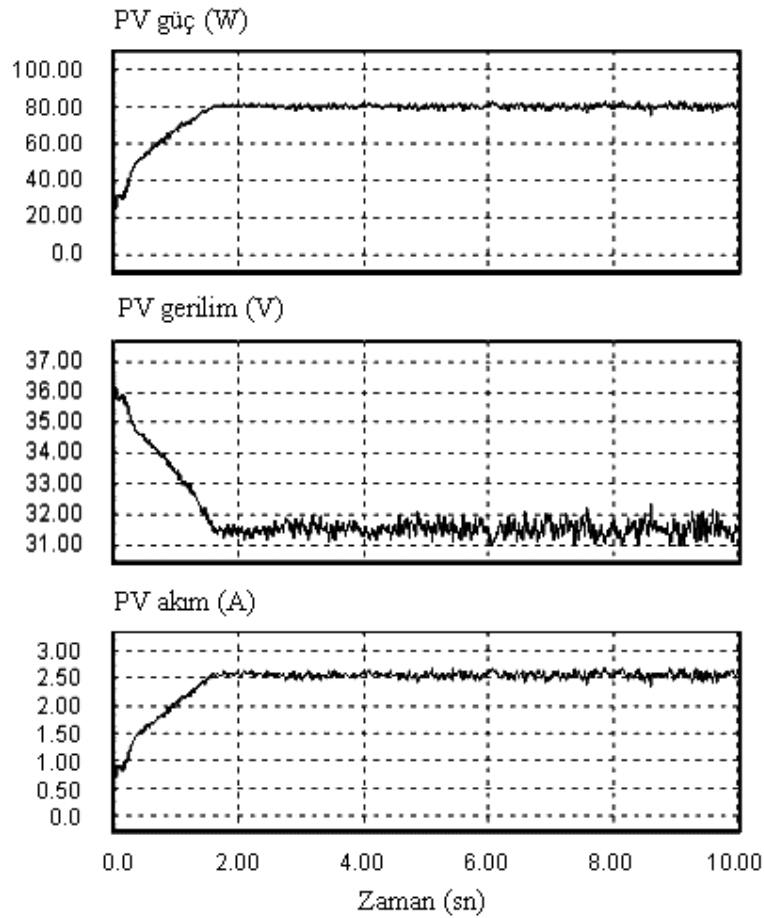
5.1. Geleneksel YSA Tabanlı ve GA Yardımlı YSA Tabanlı MPPT Sistemleri

5.1.1. Simülasyon sonuçları

Gerçekleştirilen maksimum güç noktası izleyicinin etkinliğinin görülebilmesi amacıyla PSIM simülasyon programı (Powersimtech 2004) kullanılarak çeşitli simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritmasının etkinliğinin gösterilmesi amacıyla, frekanstaki değişme miktarının sabit tutulduğu geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritması, tasarlanan sistem üzerinde uygulanmıştır. Her iki algoritma için de kontrol edilen parametreler gerçekleştirilen sisteme uygun şekilde üç fazlı inverterdeki frekans (f) ve modülasyon faktörü (M) parametreleridir. MPPT algoritmasına göre, frekansta artış ya da azalış olacağı belirlendikten sonra frekans için bulunan değişme miktarına (Δf) göre çıkış frekansı kontrol edilmekte, bu frekans değeri kullanılarak $\frac{V}{f} = sbt$ olacak şekilde modülasyon faktörü hesaplanmaktadır.

pvmmodel.dll dinamik link kütüphanesi oluşturularak simülasyona eklenmiştir. Şekil 5.1’de verilen devre şemasında görülen, Bölüm 4.2.3’te açıklanan V/f kontrol yöntemi de Visual C++’da programlanmış (Ek II-3’te verilmiştir) ve V_fkontrol.dll kütüphanesi oluşturularak simülasyonlara eklenmiştir.

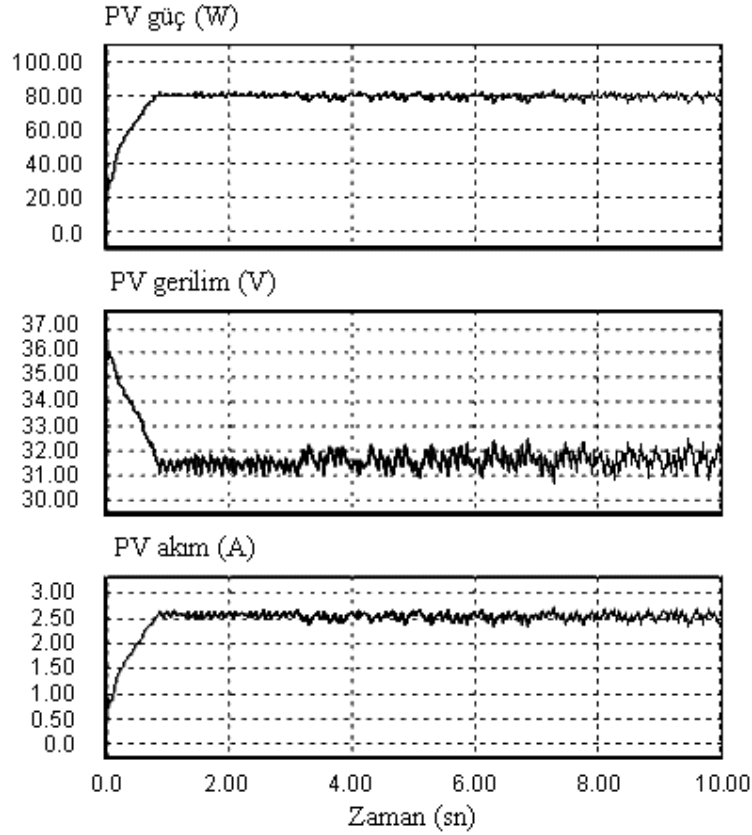
$\Delta f=0.25$ ve $\Delta f=0.5$ için üç fazlı yıldız bağlı R-L yükte elde edilen PV panel çıkış eğrileri sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’te verilmiştir. Bu şekillerde, PV panellerin çıkışından elde edilen güç, gerilim ve akım değişimleri görülmektedir. Simülasyonlar, 820W/m^2 ışık şiddeti ve 35°C ’lik PV panel sıcaklığı için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 Geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritması için ($\Delta f=0.25$) üç fazlı R-L yükte elde edilen simülasyon sonuçları

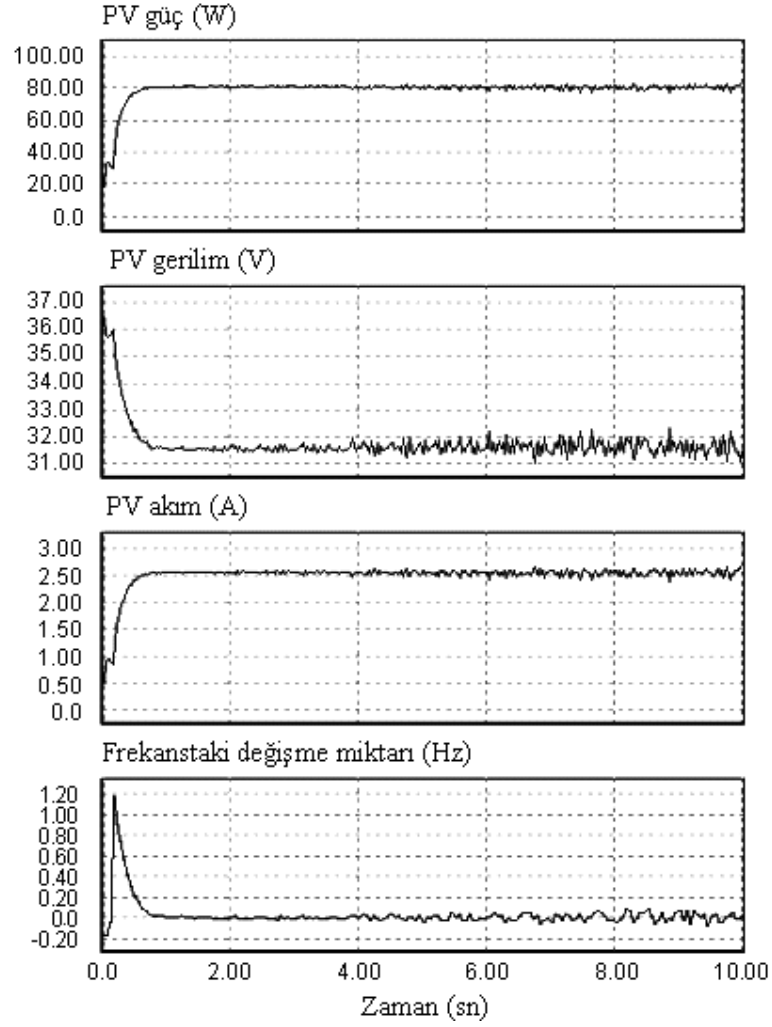
Tezde gerçekleştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için, Şekil 5.1’deki devre şeması ile yapılan simülasyon çalışmalarında üç fazlı R-L yükte PV panel çıkış eğrileri elde edilmiştir (MPPT

algoritması için geliştirilen program Ek II-4'te verilmiştir). Şekil 5.4'te PV panellerin çıkışında elde edilen güç, gerilim, akım ve inverter frekansındaki değişme miktarı verilmiştir.



Şekil 5.3 Geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritması için ($\Delta f=0.5$) üç fazlı R-L yükte elde edilen simülasyon sonuçları

Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te görüldüğü gibi, geliştirilen YSA tabanlı MPPT algoritmasıyla elde edilen sonuçlardan, maksimum güce erişme hızı açısından geleneksel yöntemle göre üstünlük sağlandığı görülmektedir. PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritmasında, maksimum güce yaklaşık 0.8 saniye sonra ulaşılırken, geleneksel algoritmada $\Delta f=0.25$ için 1.8 saniyede, $\Delta f=0.5$ için ise 0.9 saniyede maksimum güce ulaşıldığı görülmektedir. Tezde geliştirilen algoritma ile $\Delta f=0.5$ olarak alındığı geleneksel algoritma arasında güç izleme hızı açısından çok fazla fark olmamasına rağmen, sürekli durumda maksimum güç noktası etrafındaki salınımlar bakımından geliştirilen algoritmanın daha üstün olduğu görülmektedir.

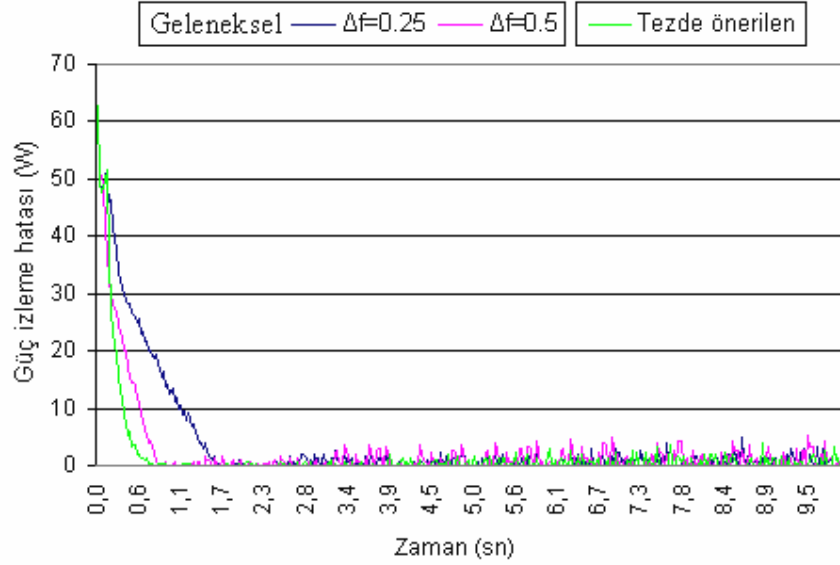


Şekil 5.4 Tezde geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için üç fazlı R-L yükte elde edilen simülasyon sonuçları

Şekil 5.5'te, geleneksel ve tezde geliştirilen algoritmalar için R-L yükte Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilen eğriler kullanılarak hesaplanan güç izleme hataları, Tablo 5.1'de ise üç farklı durumda, her bir saniye için ortalaması hesaplanan güç izleme hataları görülmektedir. Ortalama güç izleme hata değerleri (5.1) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır (Hua ve Shen 1998).

$$\eta_i = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{\max} dt} \quad (5.1)$$

Burada t_1 sistemin açılma zamanı, t_2 sistemin kapanma zamanı, P PV panelin çıkış gücü ve $P_{\max}$ ise teorik olarak hesaplanan maksimum PV panel gücüdür.



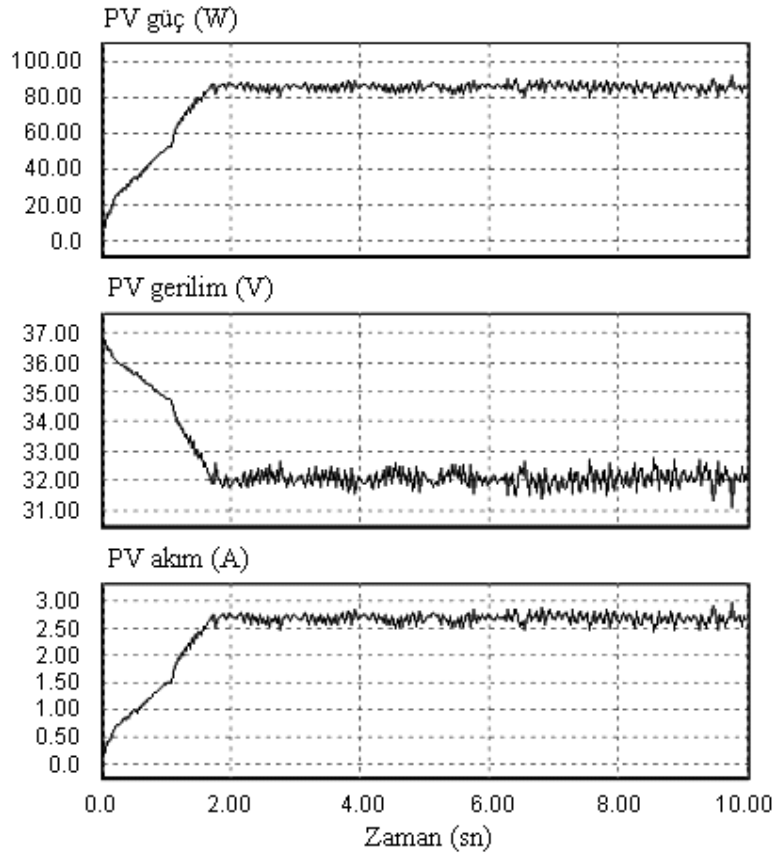
Şekil 5.5 Üç fazlı R-L yükte iki farklı durum için elde edilen maksimum güç izleme hataları

Tablo 5.1 R-L yükte elde edilen simülasyonlardan, geleneksel ve önerilen algoritma için hesaplanan güç izleme hataları

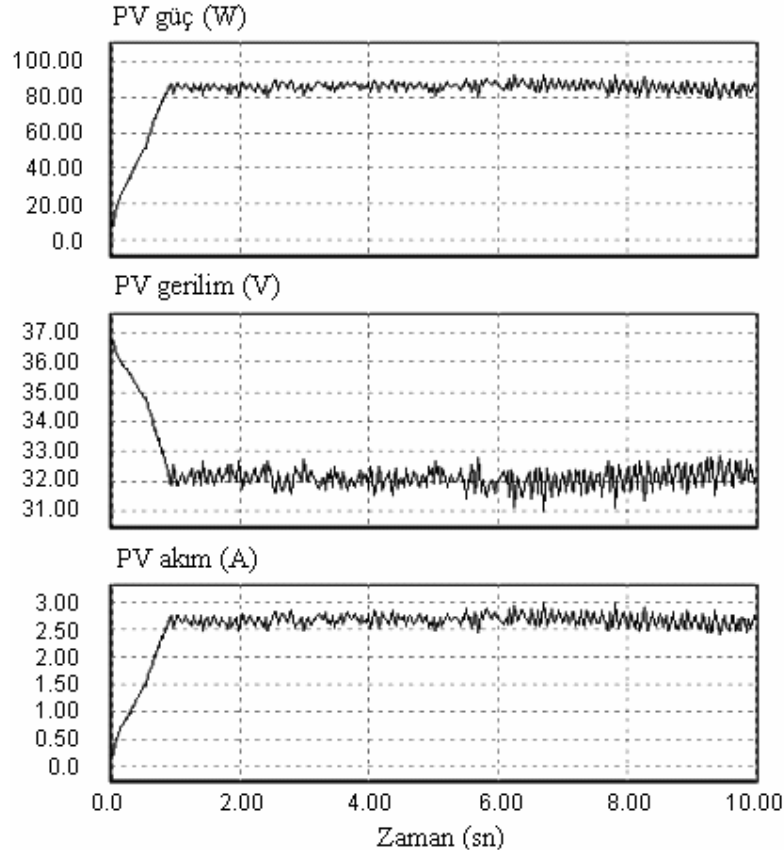
Algoritma		Zaman (sn)										Ortalama hata (W)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Geleneksel	$\Delta f=0.25$	29.4	4.3	0.45	0.63	0.53	0.59	0.47	0.48	0.60	0.55	3.81
	$\Delta f=0.5$	17.8	0.03	0.03	0.86	0.47	0.82	1.04	0.75	0.77	0.99	2.35
Önerilen		13.9	0.02	0.02	0.1	0.21	0.35	0.39	0.49	0.53	0.32	1.64

Sisteme üç fazlı R-L yük bağlandığında, Şekil 5.5'te geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritmasında ortalama güç izleme hatası $\Delta f=0.25$ için 3.81W, $\Delta f=0.5$ için ise 2.35W olarak ve geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için ise 1.64W olarak hesaplanmıştır. Sistemin kararlı durumda çalışma periyodunun daha uzun olduğu göz önüne alındığında, güç noktası etrafındaki dalgalanmalardan dolayı ortaya çıkan güç izleme hatalarının verime büyük ölçüde etki edeceği görülmektedir.

Benzer simülasyon eğrileri, üç fazlı asenkron motor yükünde de elde edilerek sistemin etkinliği gösterilmeye çalışılmıştır. Geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritmasında $\Delta f=0.25$ ve $\Delta f=0.5$ için elde edilen PV panel çıkış eğrileri sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir. Bu şekillerde 10 saniye süresince panellerin çıkışında elde edilen güç, gerilim ve akım değişimleri görülmektedir. Burada simülasyonlar 915W/m^2 ışık şiddeti ve 37°C ’lik PV panel sıcaklığında elde edilmiştir.



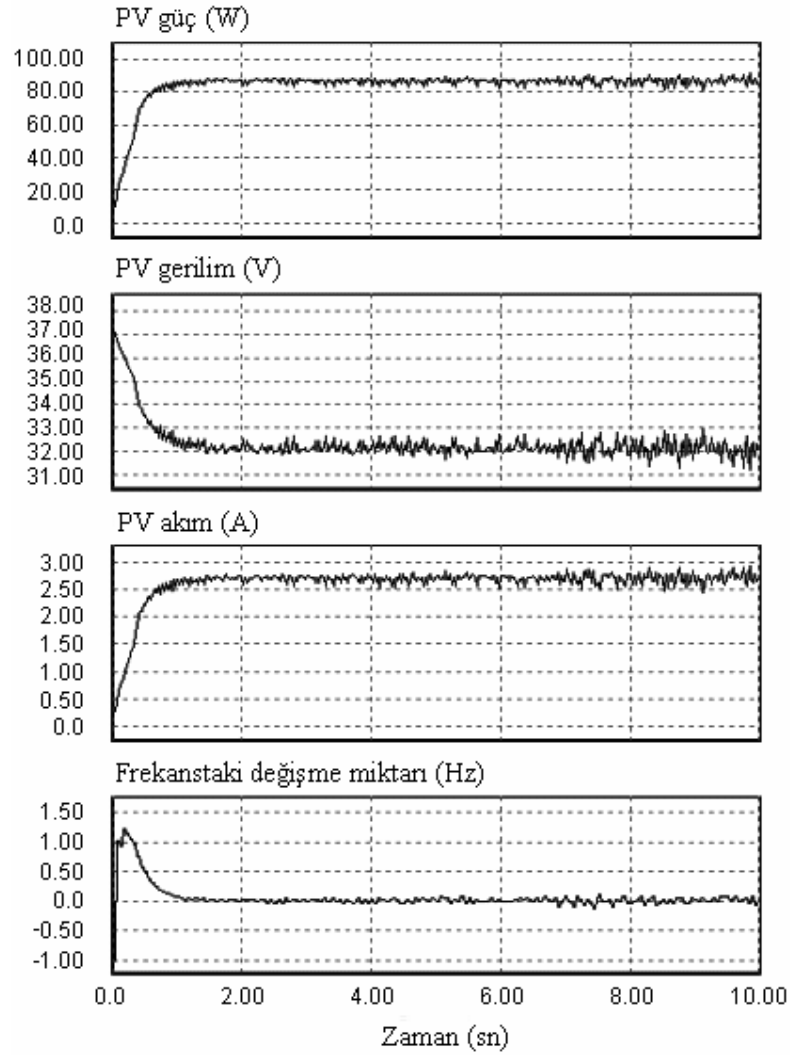
Şekil 5.6 Geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritması için asenkron motor yükünde elde edilen simülasyon sonuçları ($\Delta f=0.25$)



Şekil 5.7 Geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritması için asenkron motor yükünde elde edilen simülasyon sonuçları ($\Delta f=0.5$)

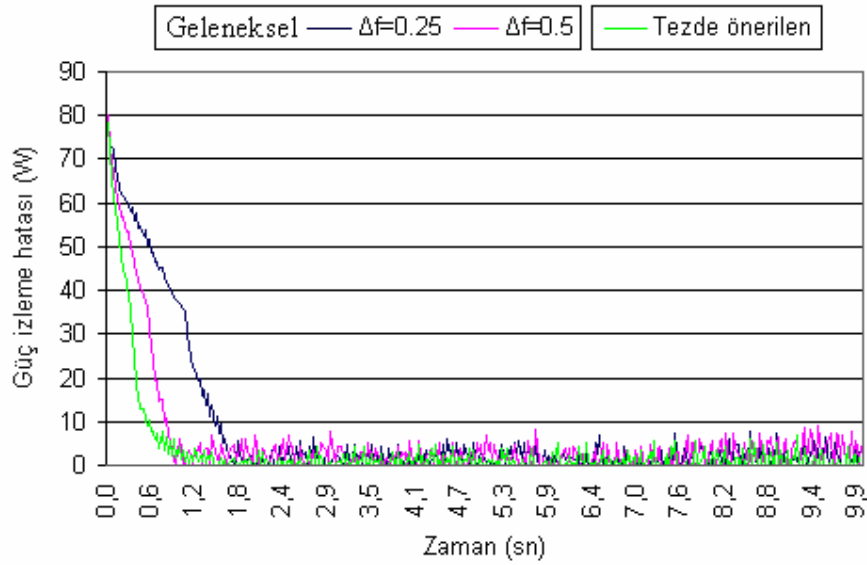
Tezde geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritmasının kullanıldığı durum için yapılan simülasyonlardan elde edilen PV panel çıkış eğrileri, üç fazlı asenkron motor yükü için Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekilde, 10 saniye süresince PV panellerin çıkışında elde edilen güç, gerilim, akım ve frekanstaki değişme miktarı verilmiştir.

Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de görüldüğü gibi, tezde geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritmasında maksimum güce erişme hızı açısından geleneksel yöntemle göre üstünlük sağlandığı görülmektedir. Geliştirilen algorithmada, maksimum güce yaklaşık 0.85 saniye sonra ulaşılırken, sabit Δf değerine sahip MPPT algoritmasında $\Delta f=0.5$ için yaklaşık 0.86 saniye, $\Delta f=1$ için ise yaklaşık 1.72 saniyede maksimum güce ulaşıldığı görülmektedir.



Şekil 5.8 Tezde geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için asenkron motor yükünde elde edilen simülasyon sonuçları

Şekil 5.9’da maksimum güç izleme hataları için Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilen iki farklı algorithmadan elde edilen değişimler, Tablo 5.2’de ise her bir saniye için ortalaması hesaplanan güç izleme hataları görülmektedir. Ortalama güç izleme hata değerleri (5.1) denklemini kullanılarak hesaplanmış, geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritmasında ortalama güç izleme hatası $\Delta f=0.25$ için 7.88W, $\Delta f=0.5$ için 5.66W ve geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için ise 3.27W olarak bulunmuştur.



Şekil 5.9 Üç fazlı asenkron motor yükünde iki farklı algoritma için hesaplanan güç izleme hatalarının değişimi

Tablo 5.2 Asenkron motor yükünde elde edilen simülasyon sonuçlarından, geleneksel ve önerilen algoritma için hesaplanan güç izleme hataları

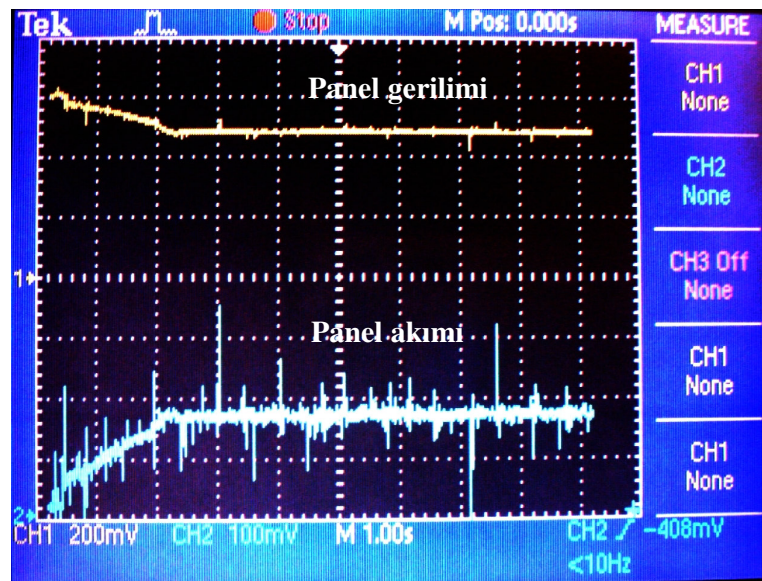
Algoritma		Zaman (sn)										Ortalama hata (W)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Geleneksel	$\Delta f=0.25$	52.4	12.0	1.86	1.68	1.98	1.77	1.21	1.47	2.24	2.16	7.88
	$\Delta f=0.5$	35.4	3.02	2.41	1.89	1.88	1.8	1.16	1.93	3.07	3.96	5.66
Önerilen		24.1	1.15	0.8	0.92	1.3	0.71	0.96	0.79	1.08	0.79	3.27

5.1.2. Deneysel sonuçlar

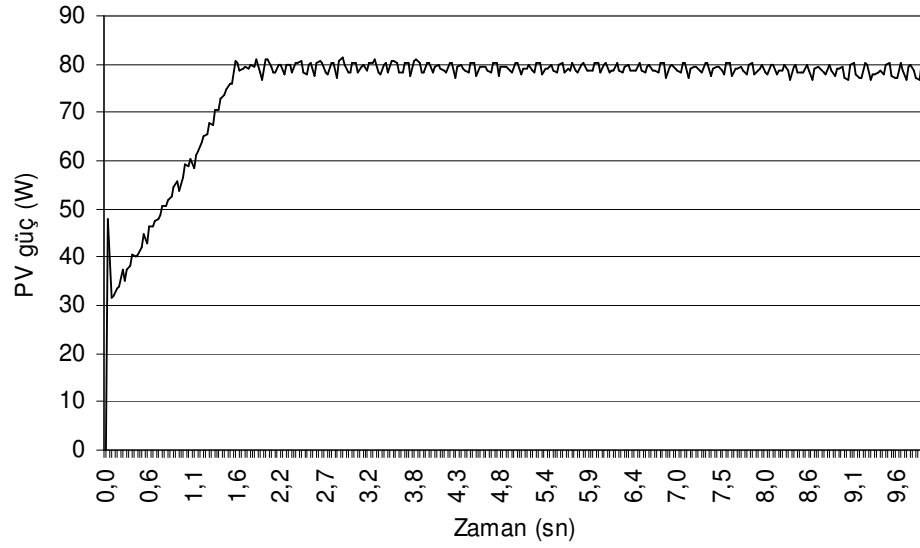
Pratik olarak gerçekleştirilen sistemin değerlendirilebilmesi amacıyla PV sistemden çeşitli deneysel sonuçlar alınmıştır. İlk olarak geleneksel yapıdaki, sabit Δf değerine sahip YSA tabanlı MPPT algoritması DSP’de programlanmış ve tasarlanan sistemde test edilmiştir. DSP’de gerçekleştirilen algoritmada GA optimizasyonu kullanılarak daha önceden eğitilen YSA için elde edilen ağırlık ve biyas değerleri, YSA’nın off-line şekilde yürütülmesinde kullanılmıştır. Burada sinir ağı PV sistemdeki optimal çalışma geriliminin belirlenmesinde kullanılmaktadır. MPPT algoritmasında sinir ağı her örnekleme adımında hesaplanmakta, maksimum güç

noktası izleme işlemi Bölüm 4.2’de açıklanan algoritmaya uygun şekilde inverterde frekans (f) ve modülasyon faktörü (M) olmak üzere iki kontrol parametresinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Sistemin benzer çalışmalara göre bir avantajı, PV panellerle ilgili tek bir parametrenin (PV gerilim) ölçülmesinin yeterli olmasıdır. Sistemin bir diğer avantajı ise MPPT’nin inverter katında gerçekleştirilmesiyle DC-DC dönüştürücü kullanımının elimine edilmesi, böylece de sistemin veriminin artırılmasıdır. Ayrıca sistemde hız ölçümüne gerek duyulmaması hız sensörü gereksinimini ortadan kaldırmaktadır.

Sistem çıkışına yük olarak üç fazlı yıldız bağlı R-L yük ve yıldız bağlı asenkron motor bağlanmış ve her bir yük için PV panel gerilim ve akımlarının değişimleri Tektronix TDS 2014 model bir osiloskoptan alınmıştır. Çalışmalar yaklaşık olarak 820W/m^2 ışık şiddeti ve 35°C PV panel sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Sistem çıkışına üç fazlı R-L yük bağlandığında $\Delta f=0.25$ için sistemden elde edilen PV panel çıkış akım ve gerilim eğrileri Şekil 5.10’da, DSP’de kaydedilerek hesaplanan güç eğrisi ise Şekil 5.11’de verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi Δf ’in düşük bir değerde seçilmesi, maksimum güç noktasına erişme hızının yavaş olmasına neden olmakta ancak maksimum güç noktası etrafındaki salınımları azaltmaktadır.

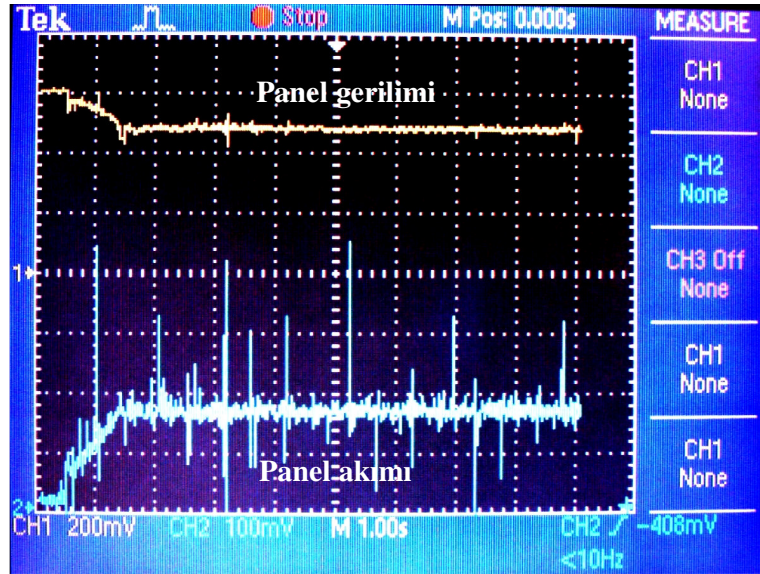


Şekil 5.10 $\Delta f=0.25$ için geleneksel algoritmada R-L yükte elde edilen PV panel çıkış gerilimi ve akımı dalga şekilleri (Volt/Div: CH1-13.3V CH2-1.5A, Time/Div:1s)

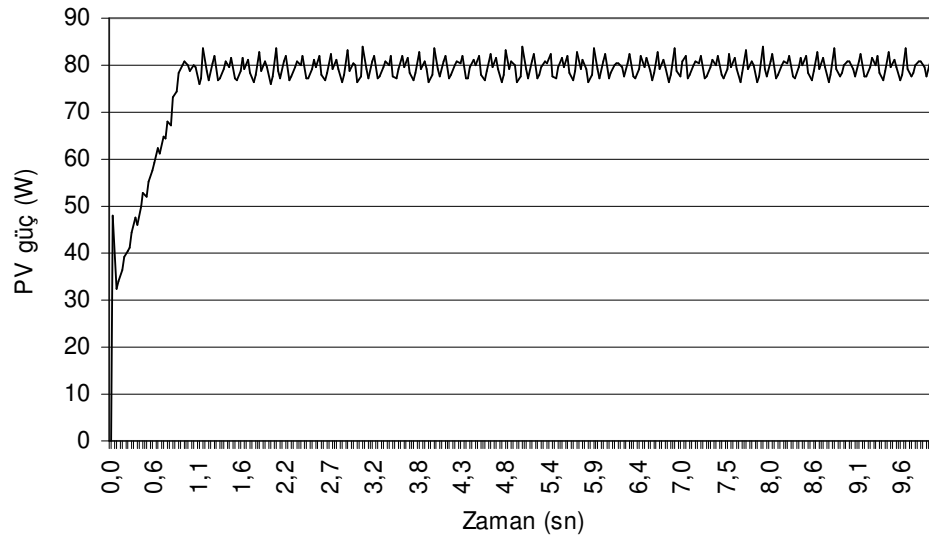


Şekil 5.11 $\Delta f=0.25$ için geleneksel algoritmada R-L yükte elde edilen PV panel çıkış gücü

Aynı algoritma için $\Delta f=0.5$ olarak seçilmesi durumunda elde edilen PV panel çıkış gerilimi ve akımı eğrileri Şekil 5.12’de, güç değişim eğrisi ise Şekil 5.13’te verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi Δf ’in nispeten büyük değerlerde seçilmesi maksimum güç noktasına daha kısa sürede ulaşılmasını sağlamakla birlikte, maksimum güç noktası etrafındaki salınımlar daha büyük olmaktadır.

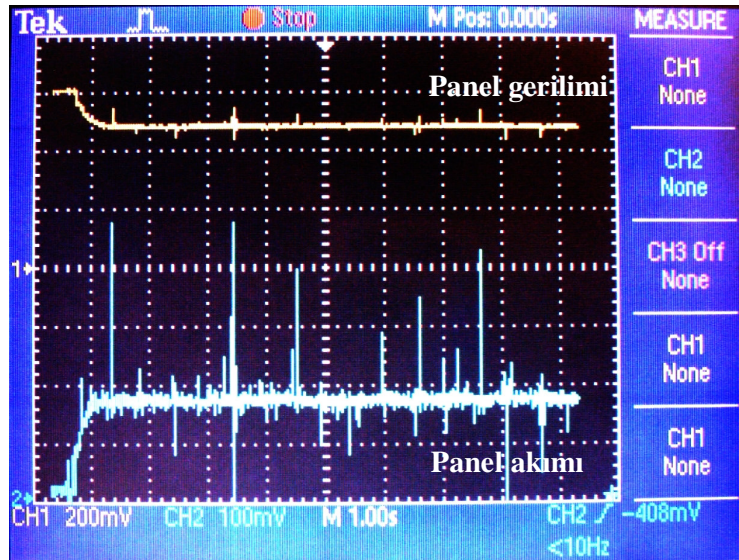


Şekil 5.12 $\Delta f=0.5$ için geleneksel algoritmada R-L yükte elde edilen PV panel çıkış gerilimi ve akımı dalga şekilleri (Volt/Div: CH1-13.3V CH2-1.5A, Time/Div:1s)

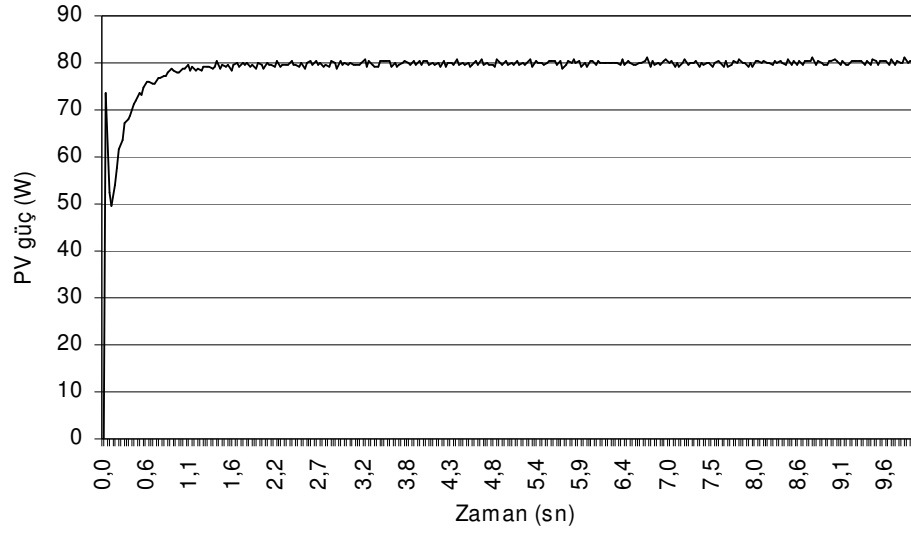


Şekil 5.13 $\Delta f=0.5$ için geleneksel algoritmada R-L yükte elde edilen PV panel çıkış gücü

Tezde geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için üç fazlı R-L yükte PV panel çıkış gerilimi ve akımının değişimleri elde edilmiş, bu değişimler Şekil 5.14'te, buradan bulunan güç değişimi ise Şekil 5.15'te verilmiştir.

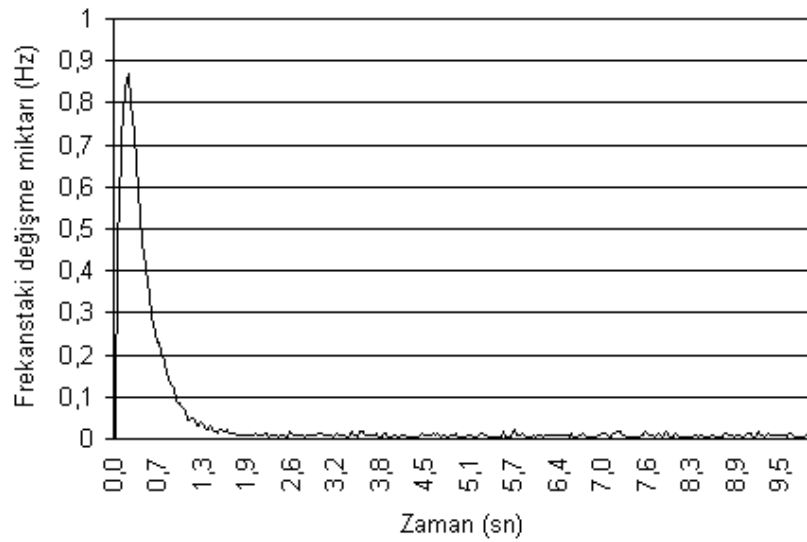


Şekil 5.14 PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için R-L yükte elde edilen PV panel çıkış gerilim ve akımı dalga şekilleri (Volt/Div: CH1-13.3V CH2-1.5A, Time/Div:1s)



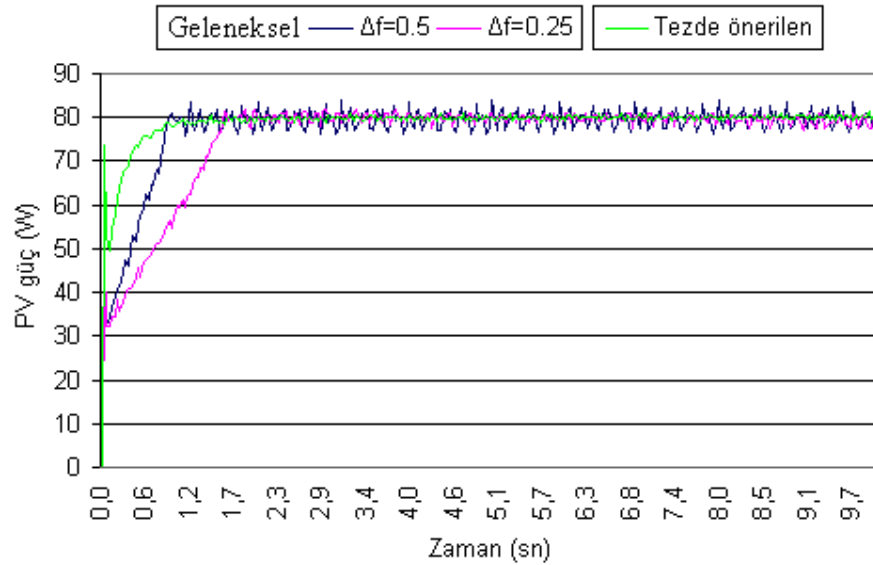
Şekil 5.15 PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için R-L yükte elde edilen PV panel çıkış gücü

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'ten görüldüğü gibi, PI denetleyicinin kullanılmasıyla frekansın değişme miktarının (Δf) sabit olmaması maksimum güç noktasına erişme hızını artırmış, maksimum güç noktası etrafındaki salınımları azaltmış ve böylece sistem veriminde artış sağlanmıştır. Şekil 5.16'da görüldüğü gibi geliştirilen algorithmada frekanstaki değişme miktarı, maksimum güç noktasına kadar nispeten yüksek değerler alırken, maksimum güç noktasına ulaşılmasının ardından düşük değerler almakta ve bu da salınımların azalmasına yol açmaktadır.



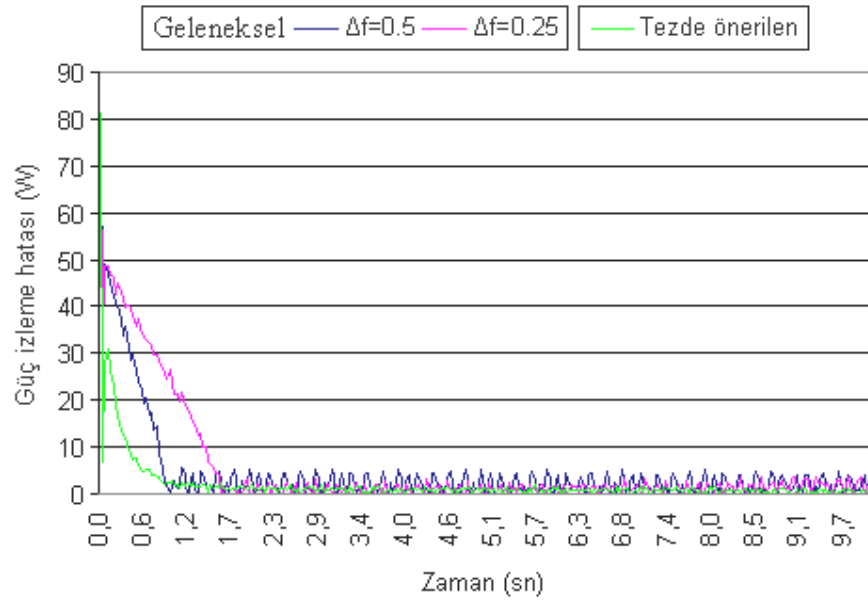
Şekil 5.16 PI denetleyiciye sahip YSA tabanlı MPPT algoritmasında R-L yükteki inverter frekansındaki değişme miktarı eğrisi

Güç değerlerinin elde edilmesi amacıyla deneysel olarak yapılan gerilim ve akım ölçümleri aynı anda DSP hafızasında kaydedilmiş ve bu durum gerçekleştirilen algoritmalar için karşılaştırma yapılması imkanını sağlamıştır. Şekil 5.17’de, geleneksel YSA tabanlı MPPT algoritmasında frekanstaki değişme miktarlarının sırasıyla $\Delta f=0.25$ ve $\Delta f=0.5$ olarak alınması durumu için ve geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için elde edilen güç değişimleri aynı grafik üzerinde verilmiştir. Elde edilen değişimler, maksimum güç izleme hızı açısından geliştirilen yöntemin, geleneksel yöntemle göre daha üstün olduğunu göstermektedir. Geliştirilen algortmada maksimum güce 0.8 saniye sonra ulaşılırken, geleneksel algortmada $\Delta f=0.25$ için 1.66 saniye, $\Delta f=0.5$ için ise 0.86 saniyede maksimum güce ulaşıldığı görülmektedir. Buradan, maksimum güç izleme performansı açısından algoritmanın oldukça iyi sonuçlar verdiği ve sistem cevabındaki gecikmeyi azaltması sebebiyle de özellikle hızlı değişen ortam şartlarında verime olumlu etki ettiği görülmektedir.



Şekil 5.17 İki farklı algoritma kullanılarak R-L yükte elde edilen PV panel güçlerinin değişim eğrileri

Şekil 5.18’de maksimum güç izleme hataları için iki farklı algortmada elde edilen hata değerleri, Tablo 5.3’te ise her bir saniye için ortalaması hesaplanan güç izleme hataları görülmektedir. Tabloda verildiği gibi, geliştirilen algortmada ortalama güç izleme hatası 1.99W olurken, geleneksel algortmada $\Delta f=0.25$ için 5.42W, $\Delta f=0.5$ için ise 4.35W olarak hesaplanmıştır.

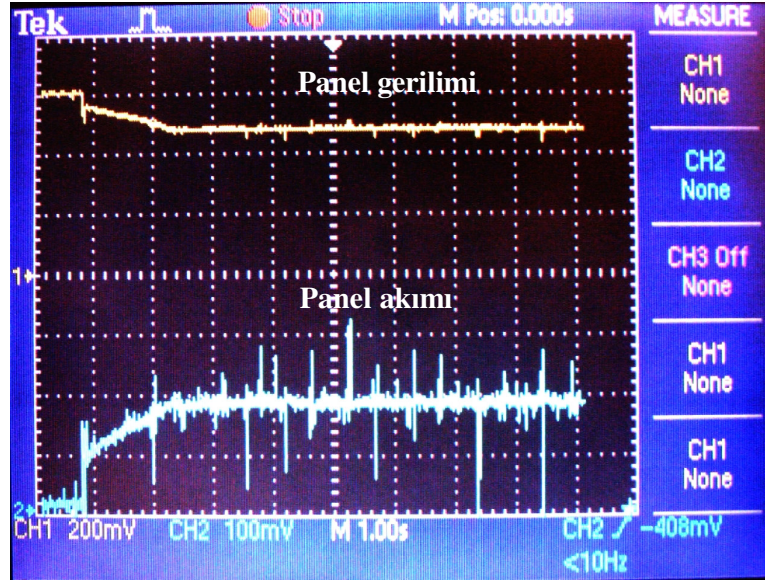


Şekil 5.18 İki farklı algoritma için R-L yükte elde edilen maksimum güç izleme hatalarının değişimi

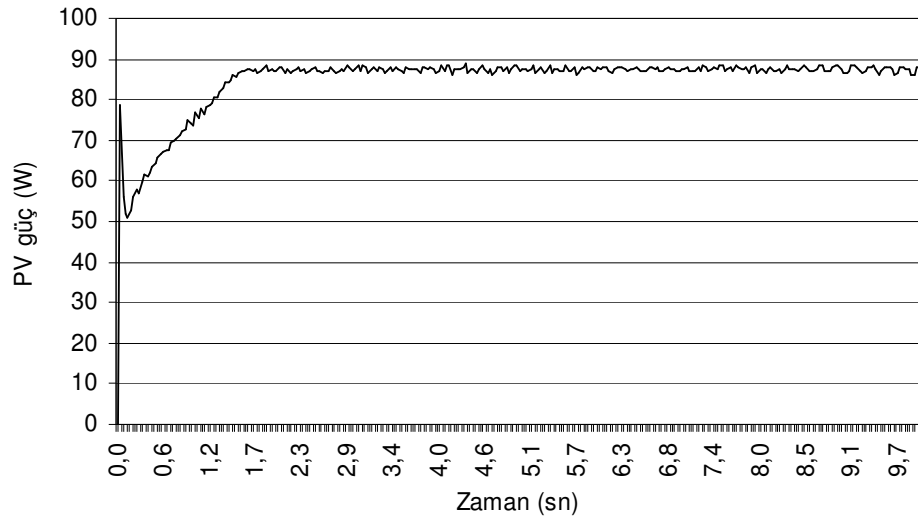
Tablo 5.3 R-L yükte elde edilen deneysel sonuçlardan, geleneksel ve önerilen algoritma için hesaplanan güç izleme hataları

Algoritma		Zaman (sn)										Ortalama hata (W)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Geleneksel	$\Delta f=0.25$	36.9	7.63	0.94	0.73	1.17	1.05	1.14	1.26	1.47	1.84	5.42
	$\Delta f=0.5$	25.8	2.41	1.92	2.00	2.03	1.90	1.87	1.80	1.91	1.85	4.35
Önerilen		12.0	1.51	1.04	0.85	0.92	0.86	0.67	0.83	0.65	0.56	1.99

Tezde geliştirilen sistem, havalandırma ve tarımsal alanda su pompalama uygulamaları için düşünüldüğünden, bu uygulamalarda yaygın olarak kullanılan üç fazlı asenkron motor, sistem çıkışına bağlanarak çeşitli deneysel sonuçlar elde edilmiş ve sistemin başarılı bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Geleneksel yapıdaki algoritmada $\Delta f=0.25$ olarak seçilmesi durumunda PV panellerin çıkışından elde edilen gerilim ve akımın değişimleri Şekil 5.19'da, DSP'de kaydedilen değerler kullanılarak hesaplanan güç eğrisi ise Şekil 5.20'de verilmiştir. Eğriler 915W/m^2 ışık şiddeti ve 37°C PV panel sıcaklığında elde edilmiştir.

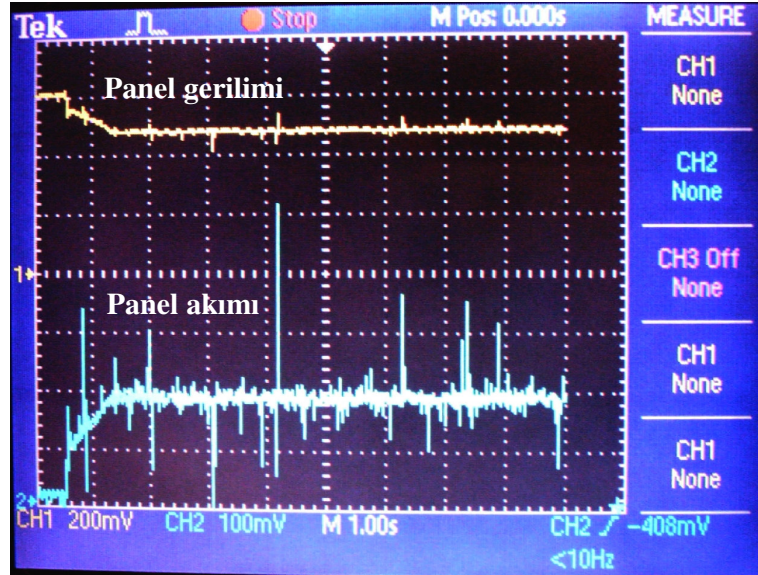


Şekil 5.19 $\Delta f=0.25$ için geleneksel algoritmada asenkron motor yükünde elde edilen PV panel çıkış gerilimi ve akımı dalga şekilleri (Volt/Div: CH1-13.3V CH2-1.5A, Time/Div:1s)

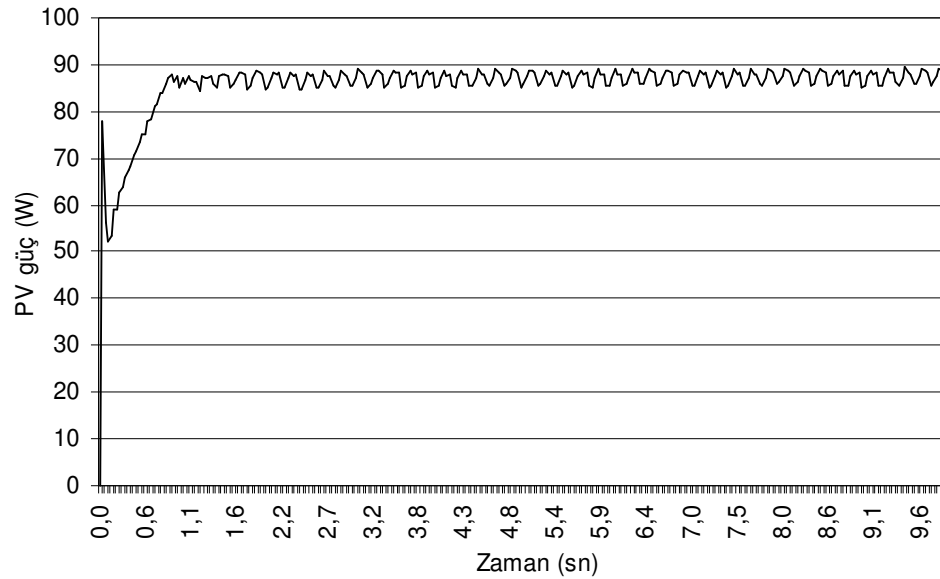


Şekil 5.20 $\Delta f=0.25$ için geleneksel algoritmada asenkron motor yükünde elde edilen PV panel gücünün değişim eğrisi

Şekil 5.21’de aynı algoritma için $\Delta f=0.5$ olarak seçilmesi durumunda elde edilen PV panel çıkış gerilimi ve akımı eğrileri, Şekil 5.22’de ise DSP’de kaydedilen değerlerle hesaplanan güç eğrisi görülmektedir.

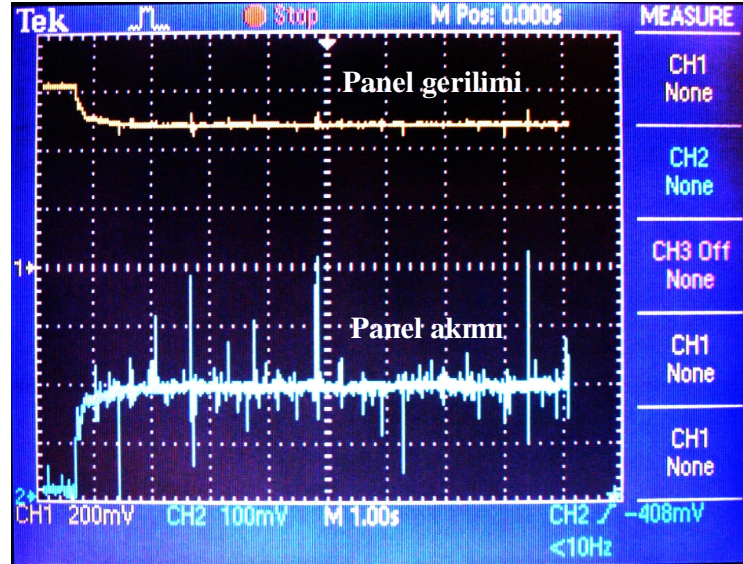


Şekil 5.21 $\Delta f=0.5$ için geleneksel algoritmada asenkron motor yükünde elde edilen PV panel çıkış gerilimi ve akımı dalga şekilleri (Volt/Div: CH1-13.3V CH2-1.5A, Time/Div:1s)

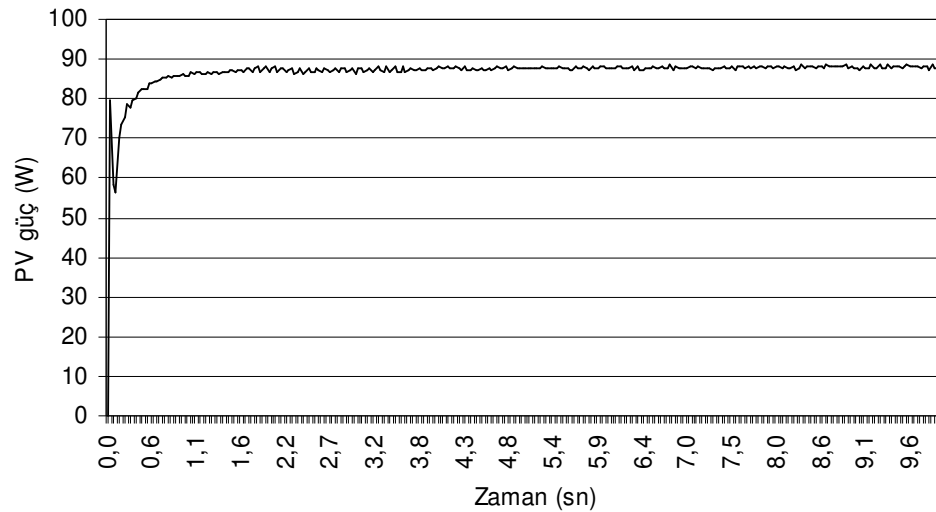


Şekil 5.22 $\Delta f=0.5$ için geleneksel algoritmada asenkron motor yükünde elde edilen PV panel gücünün değişim eğrisi

Tezde geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için üç fazlı asenkron motor yükünde PV panel çıkış gerilimi ve akımı eğrileri elde edilmiş, bu eğriler Şekil 5.23'te, güç eğrisi ise Şekil 5.24'te verilmiştir.

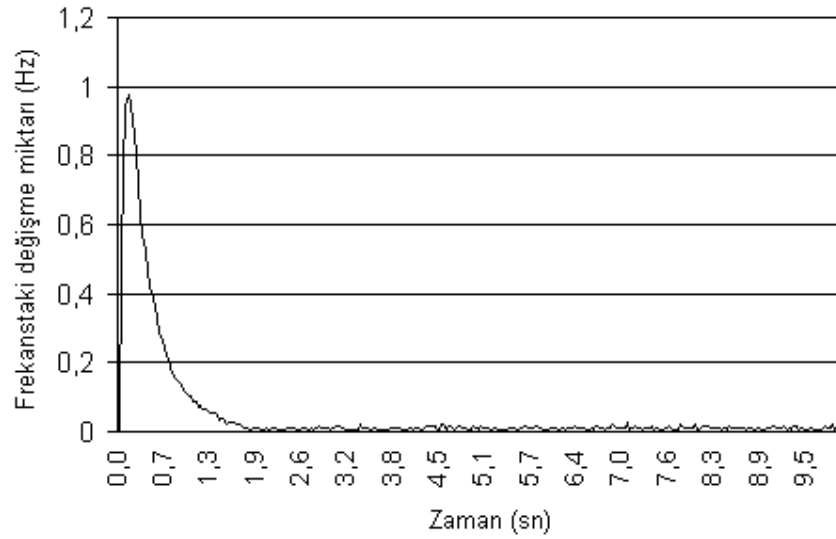


Şekil 5.23 PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için asenkron motor yükünde elde edilen PV panel çıkış gerilimi ve akımı dalga şekilleri (Volt/Div: CH1-13.3V CH2-1.5A, Time/Div:1s)



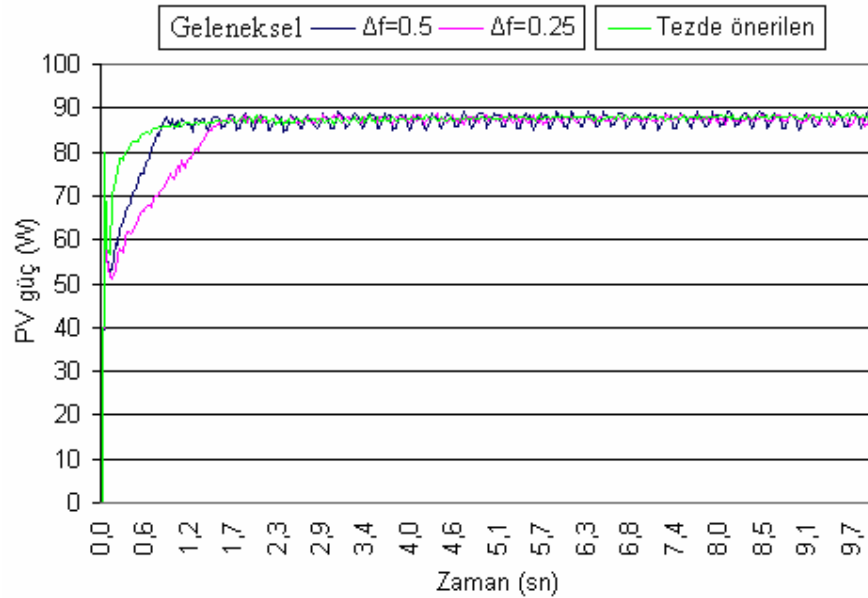
Şekil 5.24 PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması için asenkron motor yükünde elde edilen PV panel gücünün değişim eğrisi

Geliştirilen MPPT algoritmasında frekanstaki değişme miktarı Şekil 5.25'te görüldüğü gibi maksimum güç noktasına kadar nispeten yüksek değerler olarak maksimum güç noktasına hızlı bir şekilde ulaşılmasını sağlamakta, daha sonra ise düşük değerler olarak, salınımların azalmasına yol açmaktadır.



Şekil 5.25 Geliştirilen MPPT algoritmasında frekanstaki değişme miktarı eğrisi

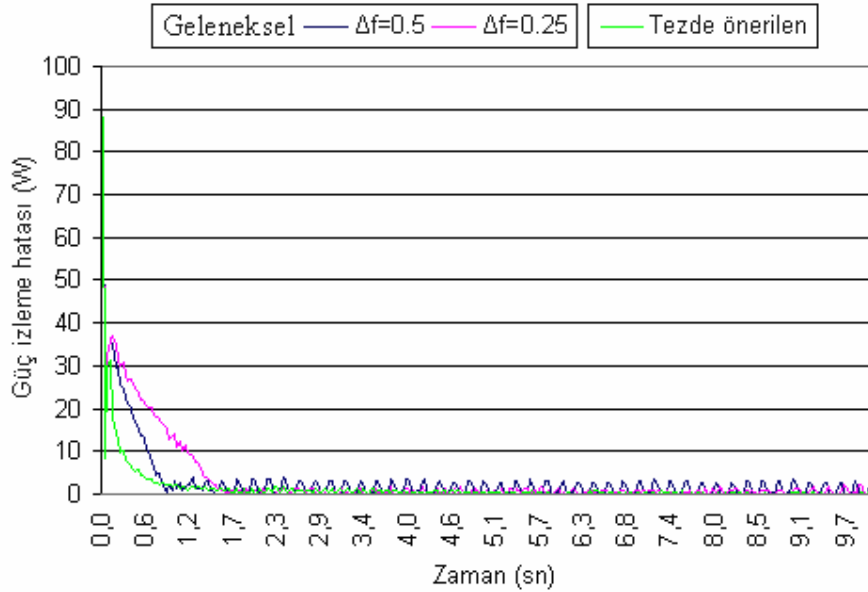
Güç değerlerinin elde edilmesi amacıyla DSP hafızasında kaydedilen ölçüm değerleri kullanılarak çizdirilen grafik Şekil 5.26’da görülmektedir. Şekilde geleneksel YSA tabanlı MPPT algoritmasında (sırasıyla $\Delta f=0.25$ ve $\Delta f=0.5$ olarak alınması durumu için) ve geliştirilen PI denetleyiciye sahip YSA tabanlı MPPT algoritması için elde edilen güç değişimleri verilmiştir..



Şekil 5.26 Devreye enerji verildiği anda iki farklı algoritma kullanılarak asenkron motor yükünde elde edilen PV panel güçlerinin değişimleri

Şekil 5.26’da görüldüğü gibi PI denetleyicinin kullanılmasıyla frekanstaki değişme miktarının sabit tutulmaması maksimum güç noktasına erişme hızını artırmış, ayrıca maksimum güç noktası etrafındaki salınımlar da azaltılarak sistem veriminde artış sağlanması mümkün olmuştur. Şekilde görüldüğü gibi, geliştirilen algoritmada maksimum güce yaklaşık 0.8 saniye sonra ulaşılırken, geleneksel MPPT algoritmasında $\Delta f=0.25$ için 1.73 saniyede, $\Delta f=0.5$ için ise 0.86 saniyede ulaşılmaktadır.

Şekil 5.27’de maksimum güç izleme hataları için asenkron motor yükünde iki farklı algoritmada elde edilen değişimler, Tablo 5.4’te ise her bir saniye için ortalaması hesaplanan güç izleme hataları görülmektedir. Tabloda görüldüğü gibi, geliştirilen algoritmada ortalama güç izleme hatası 1.22W olurken, geleneksel MPPT algoritmasında $\Delta f=0.25$ için 3.22W, $\Delta f=0.5$ için ise 3.11W olarak bulunmuştur.



Şekil 5.27 İki farklı algoritmada asenkron motor yükünde elde edilen maksimum güç izleme hatalarının değişimi

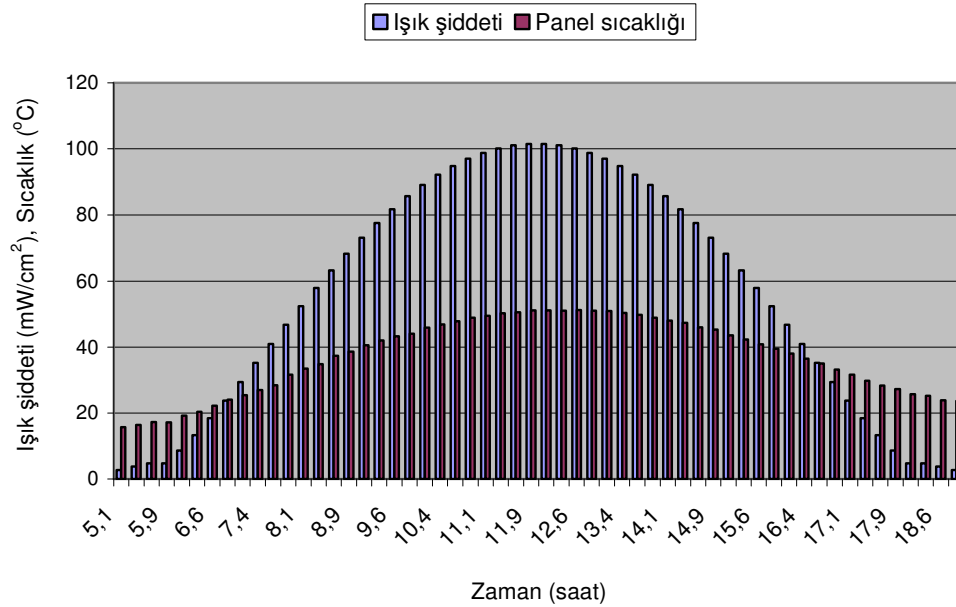
Yapılan çalışmalardan görüldüğü gibi, tezde geliştirilen PI denetleyiciye sahip GA yardımcı YSA algoritması, geleneksel algoritmaya göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu, hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarda açıkça görülmektedir. Ayrıca, simülasyon programındaki adım büyüklüğü, ölçüm elemanlarındaki hatalar, gerçek zamanlı güç izleme algoritmasının

gerçekleştirilmesinde kullanılan örnek sayısı ve örnekleme süresinden dolayı, deneysel olarak elde edilen sonuçlarla simülasyon sonuçları arasında küçük farklılıklar olduğu görülmüştür.

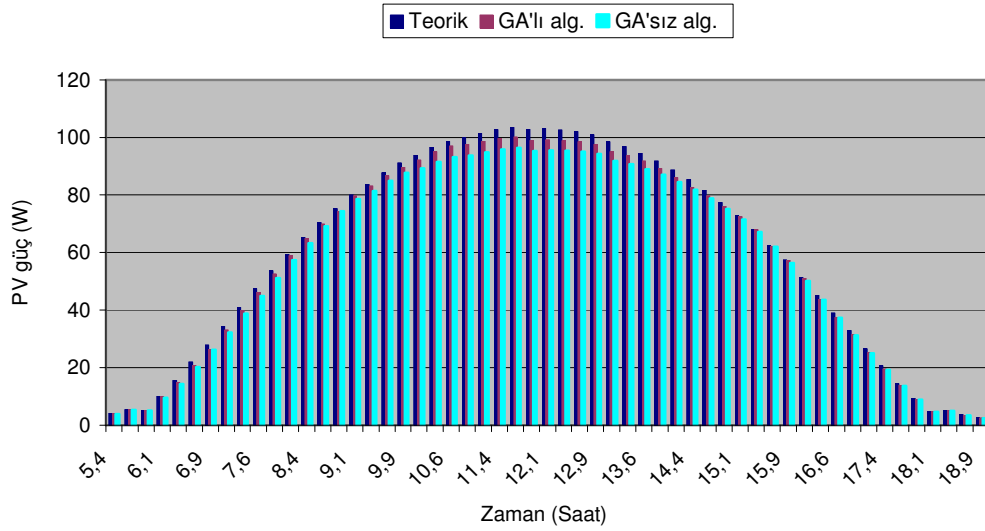
Tablo 5.4 Asenkron motor yükünde elde edilen deneysel sonuçlardan, geleneksel ve önerilen algoritma için hesaplanan güç izleme hataları

Algoritma		Zaman (sn)										Ortalama hata (W)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Geleneksel	$\Delta f=0.25$	23.1	4.1	0.72	0.57	0.48	0.57	0.50	0.59	0.73	0.82	3.22
	$\Delta f=0.5$	15.7	2.25	1.99	1.67	1.6	1.61	1.55	1.68	1.64	1.48	3.11
Önerilen		10.9	0.51	0.18	0.2	0.13	0.14	0.16	0.11	0.01	0.06	1.22

Tezde geliştirilen MPPT algoritması için farklı hava şartlarında çeşitli ölçümler yapılmıştır. Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’da güneşli açık bir gün için (26/05/2007 tarihinde Konya’da) yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.28 Geliştirilen MPPT algoritması için güneşli açık bir günde elde edilen PV panel çıkış gücü (W), ışık şiddeti (mW/cm^2) ve sıcaklığın ($^{\circ}\text{C}$) gün boyu değişimi



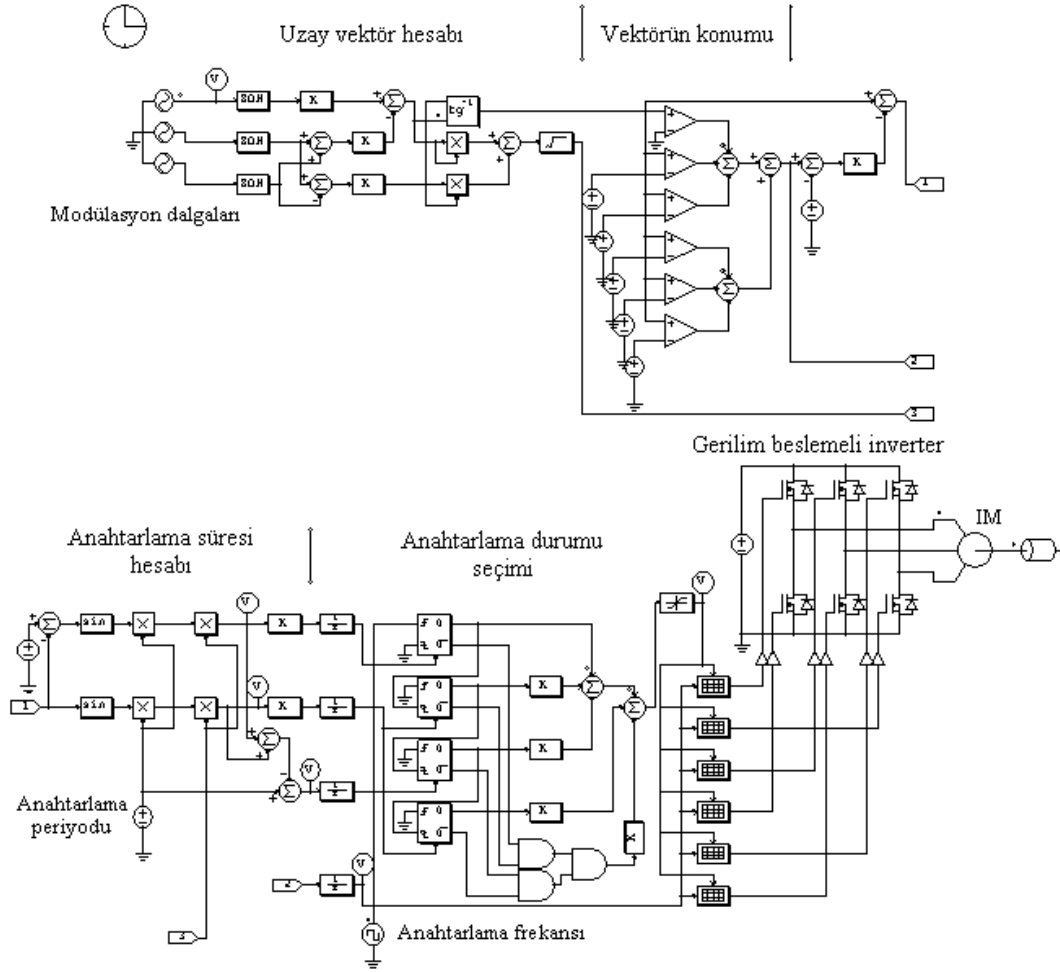
Şekil 5.29 Geliştirilen MPPT algoritması için güneşli açık bir günde GA kullanılarak ve kullanılmadan elde edilen ve teorik olarak hesaplanan güç değerlerinin değişimi

Şekil 5.28’de, gün boyunca alınan veriler için 15 dakika aralıklarla elde edilen değerlerin ortalaması hesaplanmış, ışık şiddeti, sıcaklık değerleri aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 5.29’da ise bu ortam şartları için elde edilen maksimum güç değerleri ile teorik olarak hesaplanan değerler grafiksel olarak verilmiştir. Gün içinde ölçülen değerlerden, teorik olarak hesaplanan PV panel gücünün GA optimizasyonu kullanılmadan elde edilen model için ortalama olarak %95.14’ü kullanılabilirken, GA optimizasyonu ile elde edilen model kullanılarak gerçekleştirilen MPPT algoritmasında PV panel gücünün ortalama %97.58’inin kullanılabildiği görülmüştür.

5.2. Geleneksel UVM ve GA Yardımlı YSA Tabanlı UVM Metotları

5.2.1. Simülasyon sonuçları

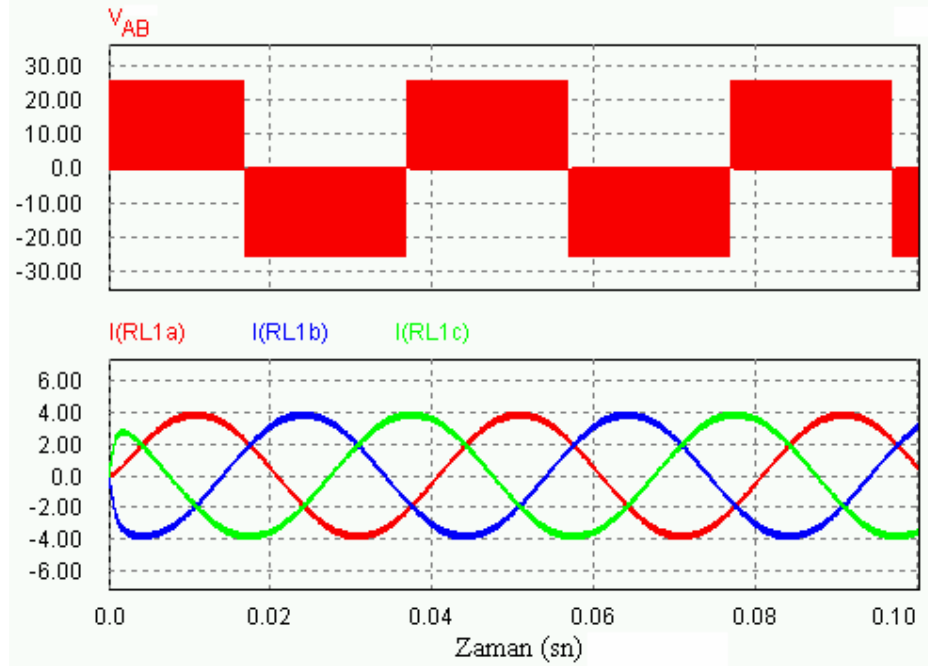
GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunun performansının değerlendirilebilmesi amacıyla geleneksel yapıdaki UVM metodu ve geliştirilen UVM metodunun simülasyonu için PSIM programı kullanılmıştır. Bu kısımda öncelikle geleneksel yapıdaki UVM metodu için simülasyon sonuçlarının gözlenebilmesi amacıyla PSIM programında Şekil 5.30’da verilen devre gerçekleştirilmiştir.



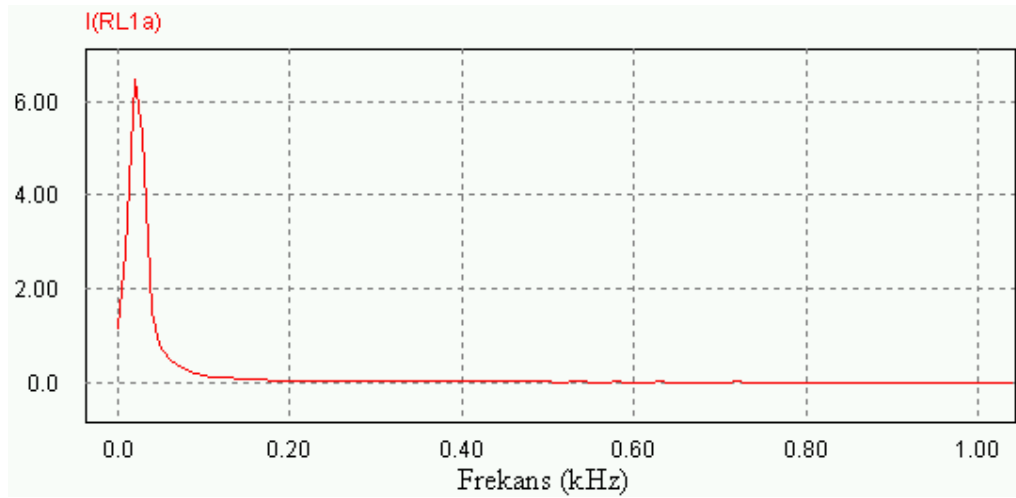
Şekil 5.30 Geleneksel yapıdaki UVM metodu için PSIM programıyla gerçekleştirilen devre şeması

Şekil 5.30’da verilen devre şemasında UVM metodunun gerçekleştirilmesi temel olarak, her örnekleme aralığındaki aktif vektörler için darbe genişliklerinin bulunmasıyla yapılmaktadır. Böylece her bir örnekleme aralığında volt-saniye değerleri elde edilmektedir. Devrede öncelikle modülasyon dalgaları kullanılarak uzay vektörünün büyüklüğü ve açısı bulunmakta, açı değeri kullanılarak da vektörün hangi sektörde olduğu belirlenmektedir. Bu değerler, anahtarlama süresinin çeşitli trigonometrik işlemler ile hesaplanmasında kullanılmakta ve anahtarlama frekansına uygun olarak anahtarlama durumlarının da seçilmesiyle, üç fazlı inverterdeki anahtarlama elemanlarına elde edilen PWM sinyalleri uygulanmaktadır.

Simülasyonlar öncelikle geleneksel yapıdaki UVM metodu için üç fazlı R-L yükte gerçekleştirilmiştir. Buna göre 25 Hz temel frekansta elde edilen fazlar arası çıkış gerilimi (V_{AB}) ve faz akımları (IRL1a,IRL1b,IRL1c) dalga şekilleri Şekil 5.31’de, faz akımının frekans spektrumu ise Şekil 5.32’de verilmiştir.

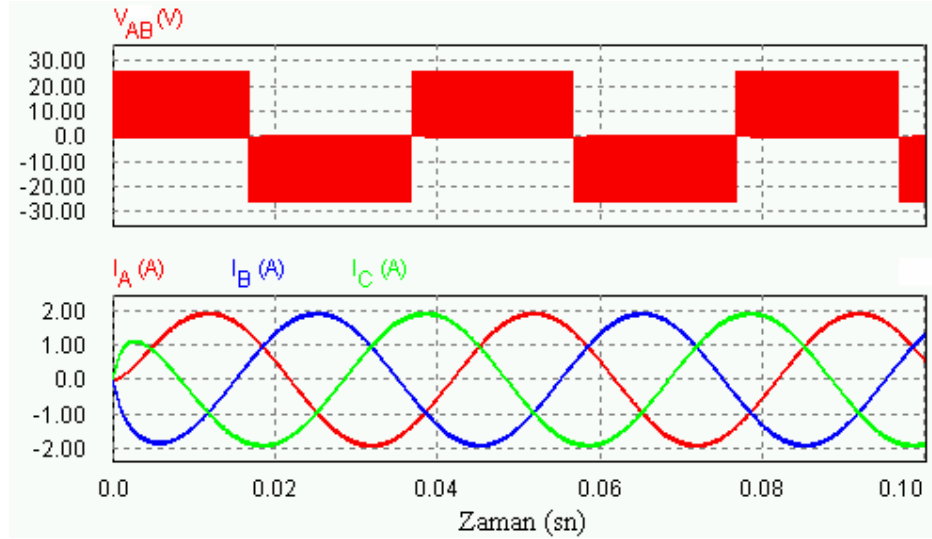


Şekil 5.31 Geleneksel yapıdaki UVM metodunda üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekans için elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımlarının (IRL1a,IRL1b,IRL1c) simülasyon sonuçları

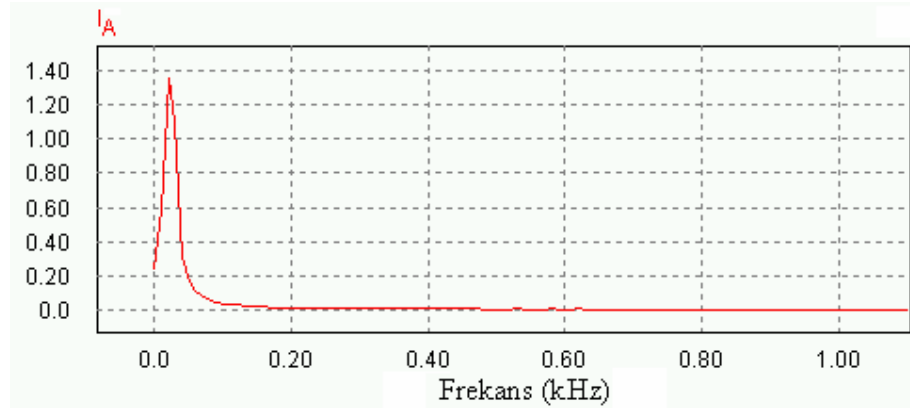


Şekil 5.32 Geleneksel yapıdaki UVM metodunda üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekans için elde edilen faz akımının frekans spektrumu

Geleneksel yapıdaki UVM metodunda üç fazlı asenkron motor için 25 Hz temel frekansta elde edilen fazlar arası çıkış gerilimi (V_{AB}) ve faz akımları (I_A, I_B, I_C) dalga şekilleri Şekil 5.33'te, faz akımının frekans spektrumu ise Şekil 5.34'te verilmiştir.

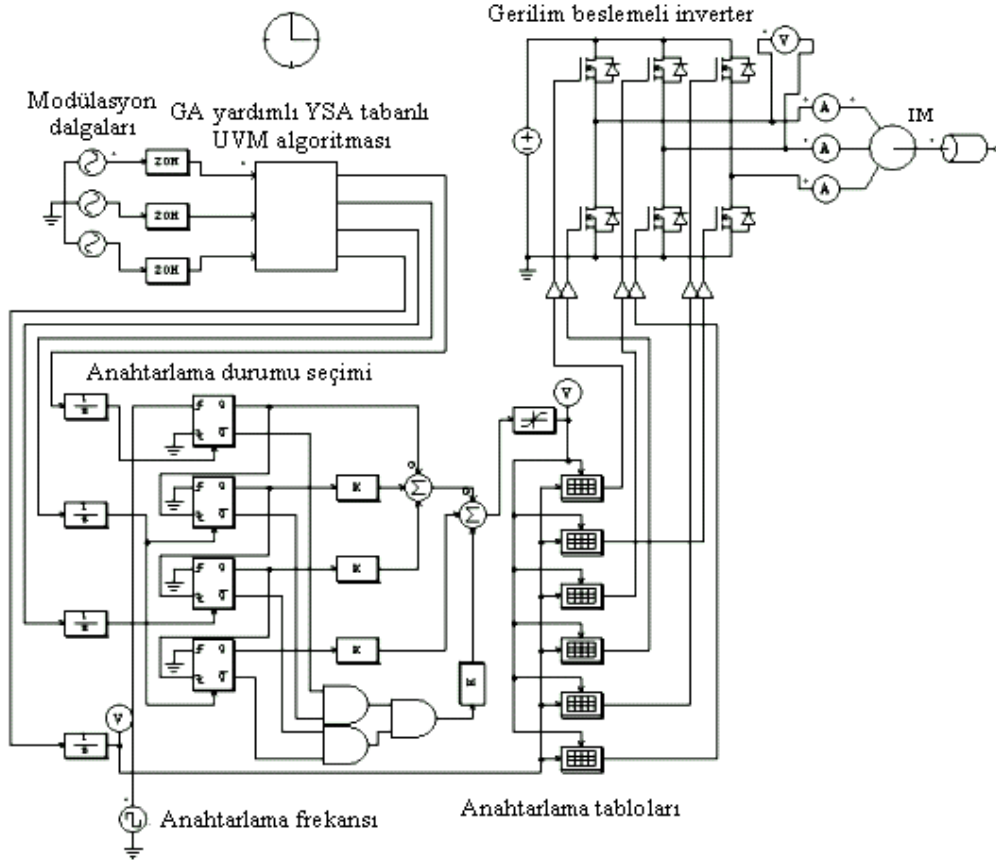


Şekil 5.33 Geleneksel yapıdaki UVM metodunda asenkron motor yükünde 25 Hz temel frekans için elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımlarının (I_A, I_B, I_C) simülasyon sonuçları



Şekil 5.34 Geleneksel yapıdaki UVM metodunda asenkron motor yükünde 25 Hz temel frekans için elde edilen faz akımının frekans spektrumu

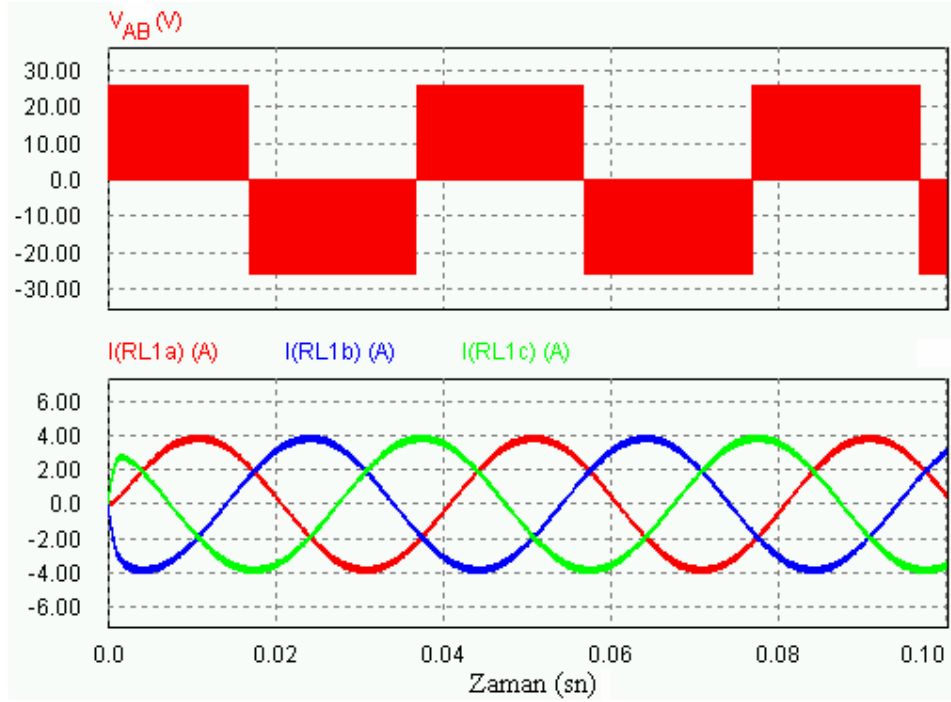
Geliştirilen GA yardımcı YSA tabanlı UVM metoduna ilişkin simülasyon çalışmaları, Şekil 5.35'te verilen devre kullanılarak yürütülmüştür. YSA tabanlı yapı, devrede C programlama dili ile gerçekleştirilen DLL bloğu kullanılarak programlanmıştır. Program Ek II-5'te verilmiştir.



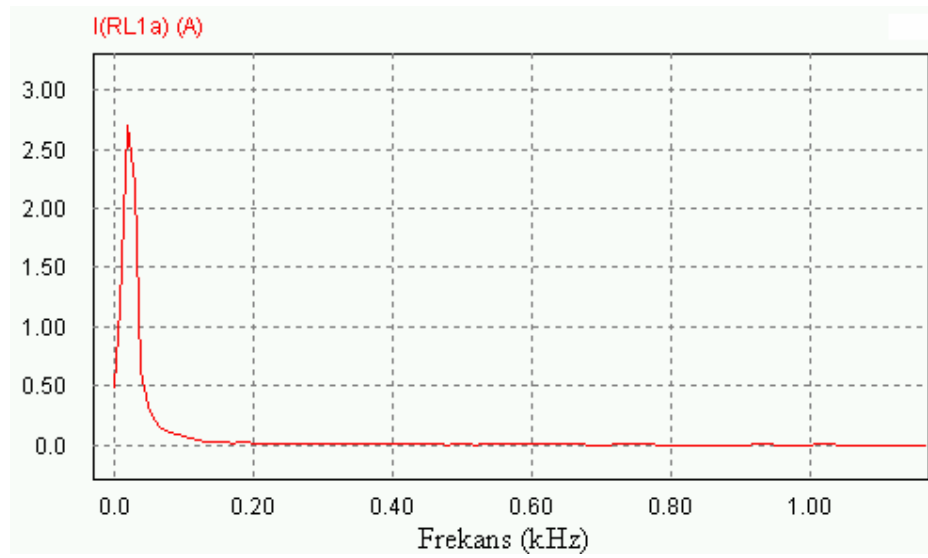
Şekil 5.35 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodu için PSIM programıyla gerçekleştirilen devre şeması

Şekil 5.35'te verilen devre şemasında, geleneksel UVM metodundakinden farklı olarak anahtarlama süresi, GA yardımcı YSA tabanlı UVM algoritması bloğunda hesaplanmaktadır. Bu kısımdan sonra kullanılan anahtarlama durumu seçimi kısmı ve anahtarlama tabloları, UVM metodu için gerekli PWM sinyallerinin, üç fazlı inverterin anahtarlama elemanlarına uygulanabilmesi için minimum anahtarlama kayıplı simetrik dalga şekillerine dönüştürülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Geliştirilen metodun DSP'de gerçekleştirilmesinde, hesaplanan anahtarlama süreleri direkt olarak DSP'nin PWM çıkış yazmaçlarına aktarıldığı için bu kısımlar her hangi bir kompleksliğe yol açmamaktadır.

Üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekansta GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodu için elde edilen fazlar arası çıkış gerilimi (V_{AB}) ve faz akımları (IRL1a, IRL1b, IRL1c) dalga şekilleri Şekil 5.36'da, faz akımı frekans spektrumu ise Şekil 5.37'de verilmiştir



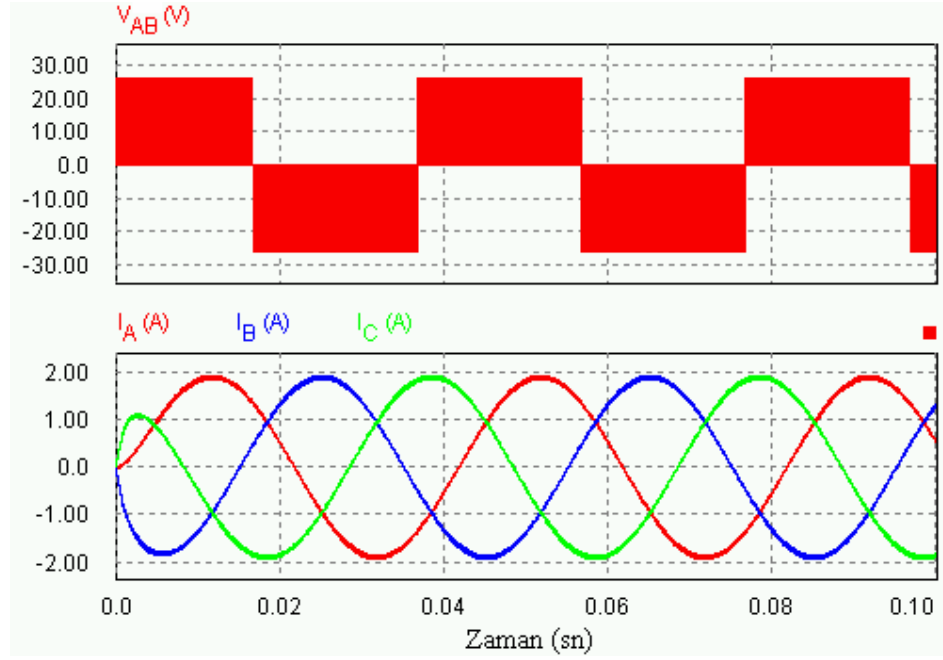
Şekil 5.36 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodu için üç fazlı R-L yükte elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve hat akımları (IRL1a,IRL1b,IRL1c) simülasyon sonuçları



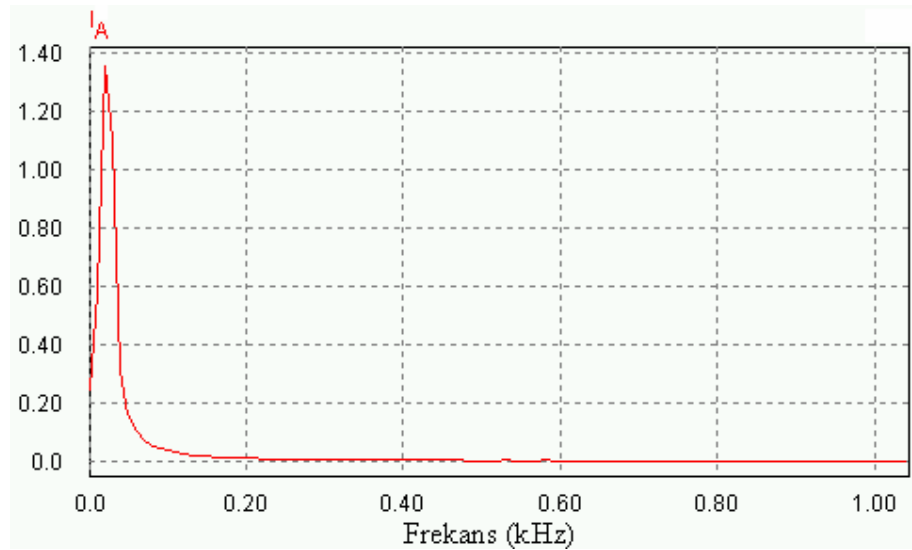
Şekil 5.37 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodu için üç fazlı R-L yükte elde edilen faz akımı frekans spektrumu

GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunda üç fazlı asenkron motorda 25 Hz temel frekans için elde edilen dalga şekilleri ve frekans spektrumu sırasıyla Şekil

5.38 ve Şekil 5.39’da verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlarda, fazlar arası gerilim sinüzoidal formdan oldukça farklı olmasına karşın faz akımının beklendiği gibi oldukça kaliteli ve sinüzoidal forma çok yakın olduğu görülmektedir.



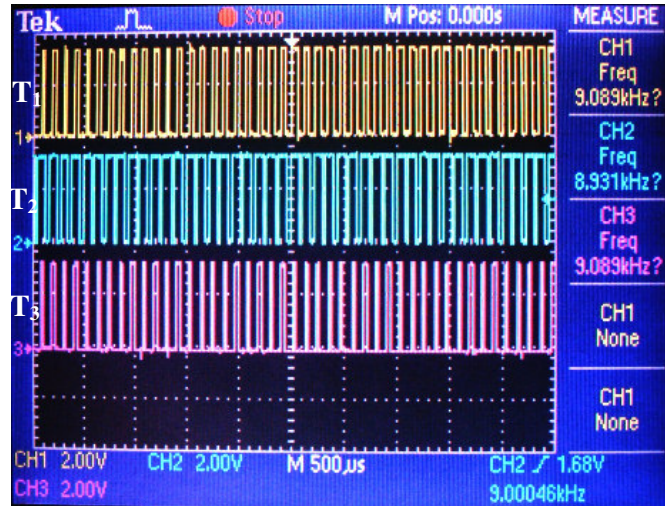
Şekil 5.38 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodu için asenkron motor yükünde elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve hat akımları (I_A, I_B, I_C) simülasyon sonuçları



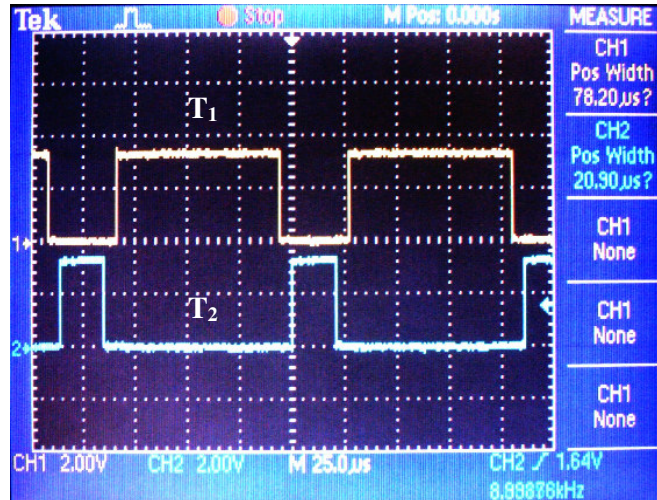
Şekil 5.39 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodu için asenkron motor yükünde elde edilen faz akımı (I_A) frekans spektrumu

5.2.2. Deneysel sonuçlar

Şekil 5.40'ta T_1 , T_3 ve T_5 için DSP tarafından üretilen üç faz UVM sinyalleri görülmektedir. Her hangi bir kısa devreyi önlemek amacıyla inverterde aynı kolda bulunan üst ve alttaki anahtarlama elemanlarının aynı anda iletme geçmesini önlemek için bir ölü zaman kullanılmıştır. Şekil 5.41'de ölü zaman durumunu gösteren PWM sinyalleri görülmektedir.



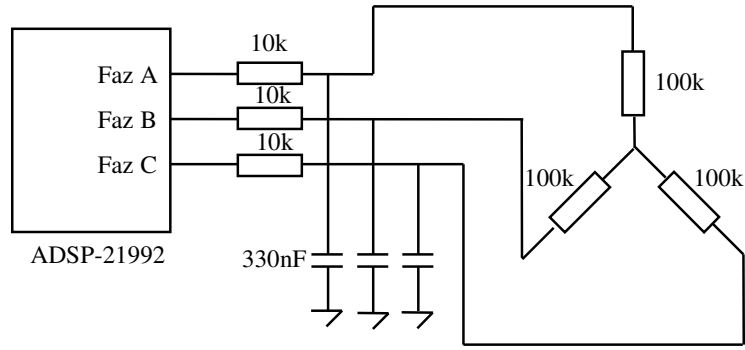
Şekil 5.40 DSP tarafından üretilen UVM sinyalleri (Volt/Div: CH1-2V CH2-2V CH3-2V, Time/Div:500µs)



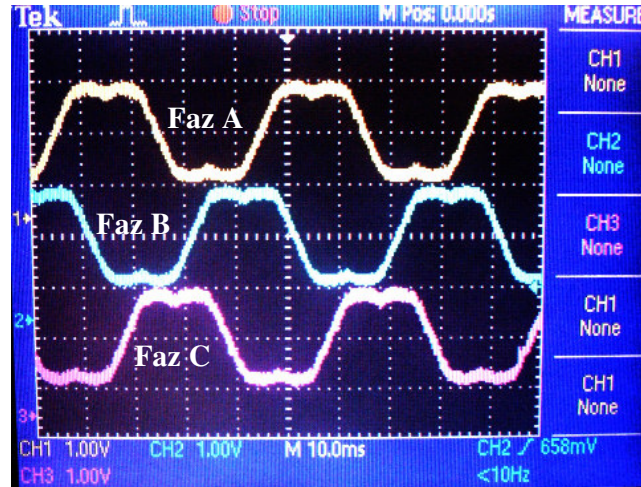
Şekil 5.41 Ölü zaman içeren UVM sinyallerinin değişimi (Volt/Div: CH1-2V CH2-2V, Time/Div:25µs)

Şekil 5.41’de görüldüğü gibi üç fazlı inverterde üst ve alttaki anahtarlama elemanlarına uygulanan sinyallerin pozitif kısımlarının toplamı, toplam periyottan çıkarıldığında, ölü zamanın $111.1\mu\text{sn} - (78.20\mu\text{sn} + 20.90\mu\text{sn}) = 12\mu\text{sn}$ olduğu görülmektedir.

Gerçekleştirilen UVM metodunun teorik dalga şekillerini elde etmek amacıyla ADSP-21992 sayısal işaret işlemcisinin PWM çıkışları filtrelenerek osiloskop görüntüleri alınmıştır. Filtre olarak kesim frekansı $f_c = 48.2\text{Hz}$ olan ve Şekil 5.42’de verilen bir alçak geçiren filtre kullanılmıştır. Tüm fazlar için çıkış gerilimi dalga şekilleri, 25Hz ’lik frekans için Şekil 5.43’te gösterilmiştir.



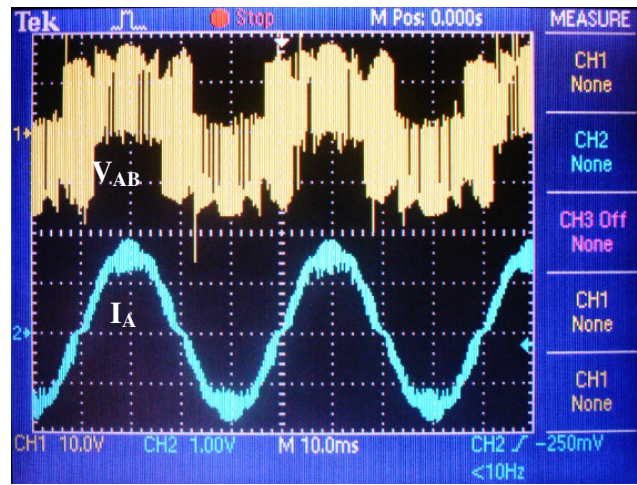
Şekil 5.42 UVM metodunda faz çıkışlarının ortalama değerlerinin gözlenmesi için kullanılan test devresi



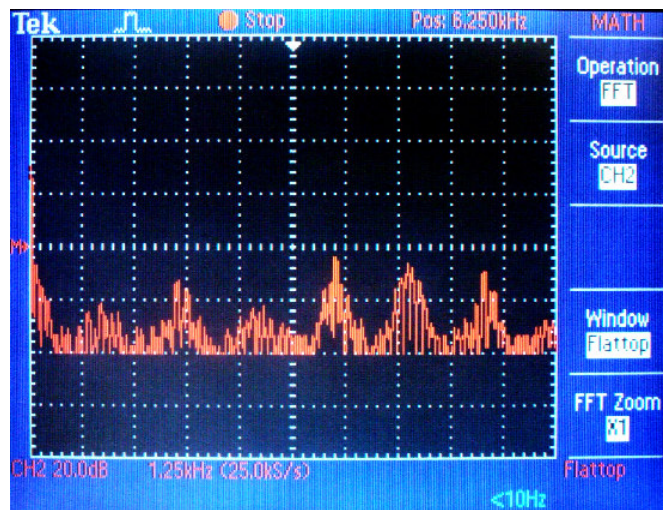
Şekil 5.43 Üç fazlı inverterde tüm fazlar için 25Hz temel frekansta elde edilen çıkış gerilimi dalga şekilleri (Volt/Div: CH1-2V CH2-2V CH3-2V, Time/Div:10ms)

Şekil 5.43'te görüldüğü gibi dalga şekilleri, PWM anahtarlama sinyallerinin ortalamasını vermekte ve UVM metodunun kendi yapısından kaynaklanan üçüncü harmonik eklentisi görülmektedir. Üçüncü harmonik bileşen, çıkışta elde edilen yük uçlarındaki faz ve fazlar arası gerilimlerde elimine edilmektedir.

Gerçekleştirilen algoritmalar ADSP-21992'ye yüklenerek çeşitli deneysel dalga şekilleri elde edilmiştir. Üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekansta geleneksel UVM metodu için elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımı (I_A) dalga şekilleri Şekil 5.44'te, faz akımı frekans spektrumu ise Şekil 5.45'te verilmiştir.

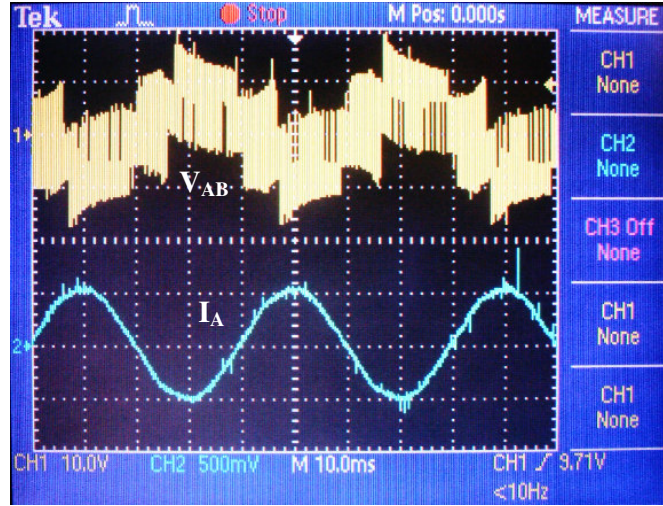


Şekil 5.44 Geleneksel UVM metodunda üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekansta elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımının (I_A) değişimleri (Volt/Div: CH1-10V CH2-1A, Time/Div:10ms)

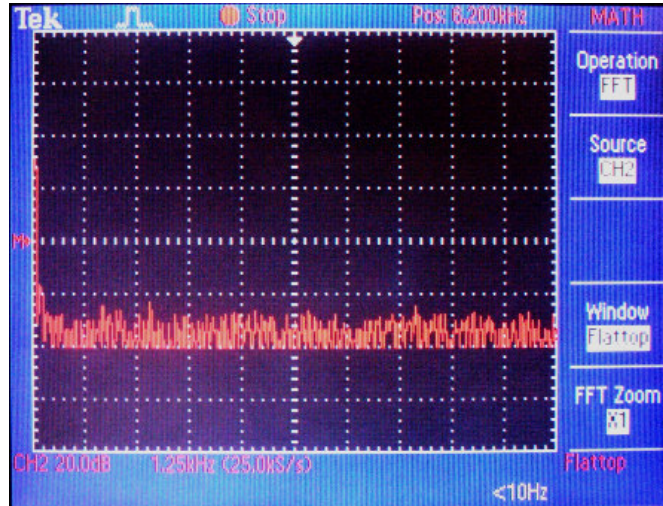


Şekil 5.45 Geleneksel UVM metodunda üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekans için elde edilen faz akımının frekans spektrumu (1.25kHz, 25.0kS/s)

Geleneksel UVM metodu ile yıldız bağlı üç fazlı asenkron motor için, 25 Hz temel frekansta elde edilen dalga şekilleri sırasıyla Şekil 5.46 ve Şekil 5.47’de verilmiştir.



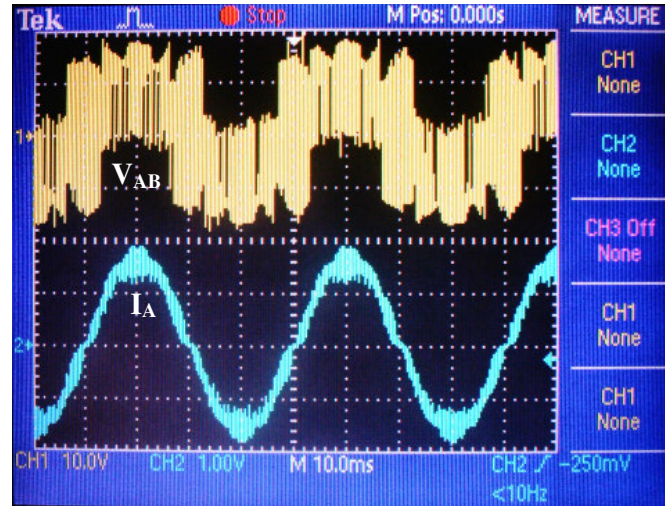
Şekil 5.46 Geleneksel UVM metodunda asenkron motor yükünde 25 Hz temel frekans için elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımı (I_A) değişimleri (Volt/Div: CH1-10V CH2-1A, Time/Div:10ms)



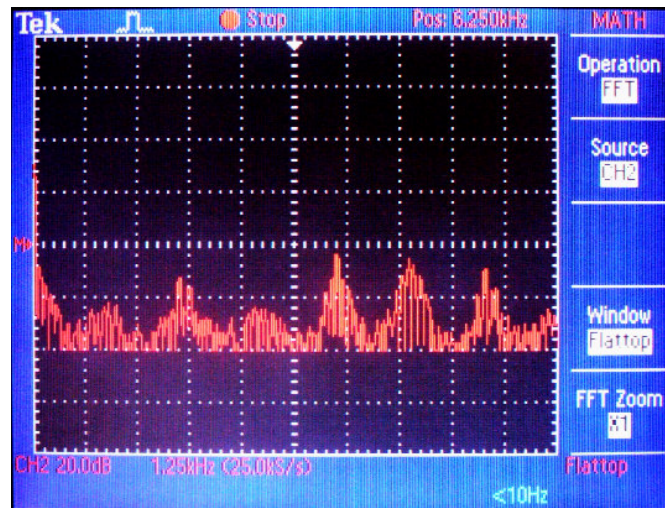
Şekil 5.47 Geleneksel UVM metodunda asenkron motor yükünde 25 Hz temel frekans için elde edilen faz akımının frekans spektrumu (1.25kHz, 25.0kS/s)

Üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekans için GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunda elde edilen fazlar arası çıkış gerilimi (V_{AB}) ve faz akımı (I_A) dalga şekilleri Şekil 5.48’de, faz akımının frekans spektrumu ise Şekil 5.49’da verilmiştir.

Bu metotta UVM sinyallerinin darbe süreleri, sinir ağı yapısı her bir örnekleme periyodunda hesaplanarak elde edilmektedir.

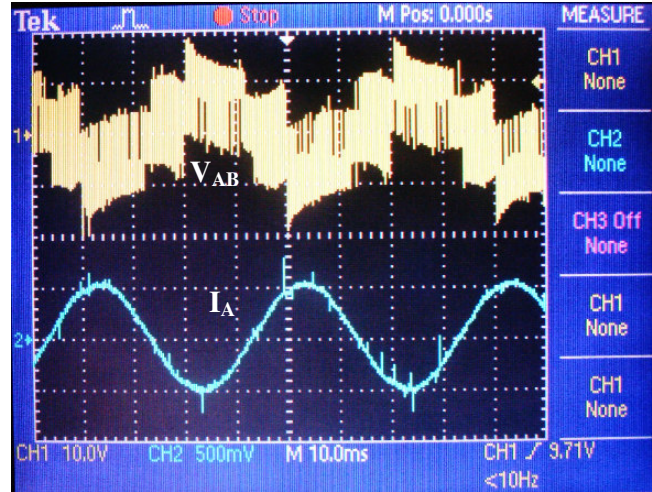


Şekil 5.48 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunda üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekans için elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımının (I_A) değişimleri (Volt/Div: CH1-10V CH2-1A, Time/Div:10ms)

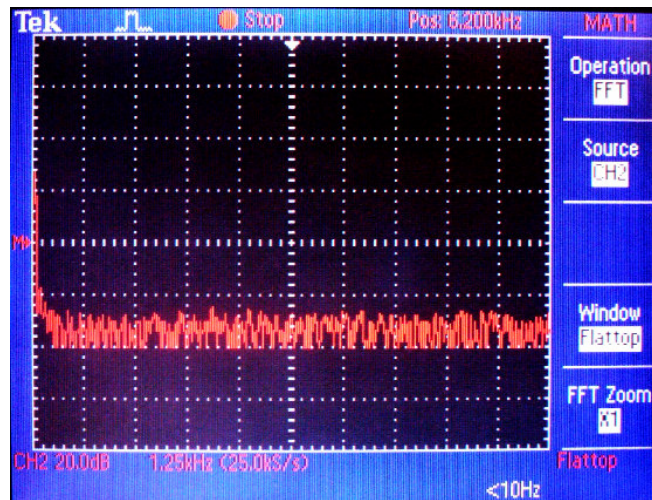


Şekil 5.49 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunda üç fazlı R-L yükte 25 Hz temel frekans için deneysel olarak elde edilen faz akımının frekans spektrumu (1.25kHz, 25.0kS/s)

GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodu için yıldız bağlı üç fazlı asenkron motor için 25Hz temel frekansta elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımının (I_A) dalga şekilleri ve faz akımının frekans spektrumu sırasıyla Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de verilmiştir.



Şekil 5.50 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunda asenkron motor yükünde 25 Hz temel frekans için elde edilen fazlar arası gerilim (V_{AB}) ve faz akımı (I_A) değişimleri (Volt/Div: CH1-10V CH2-1A, Time/Div:10ms)



Şekil 5.51 GA yardımcı YSA tabanlı UVM metodunda asenkron motor yükünde 25Hz temel frekans için deneysel olarak elde edilen faz akımının frekans spektrumu (1.25kHz, 25.0kS/s)

Bu kısımda elde edilen sonuçlardan, tezde geliştirilen YSA tabanlı UVM metodu için elde edilen sonuçlarla, geleneksel UVM metodu için elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, UVM metodunun YSA tabanlı olarak başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir. Elde edilen YSA yapısının en büyük avantajı, ASIC kullanılarak pratik olarak uygulanması ile UVM metodunda yüksek anahtarlama frekanslarına çıkılabilmesi ve oldukça yüksek doğrulukta PWM sinyalleri elde edilmesinin mümkün olmasıdır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada fotovoltaiik panellerden maksimum güç çekilmesi amacıyla, GA optimizasyonu kullanılan YSA tabanlı bir MPPT algoritması geliştirilmiştir. PI kontrol çevrimine sahip MPPT algoritmasında kontrol değişkeni olarak sadece PV panel gerilimi kullanılmış ve denetleyicinin maksimum güç izleme performansı açısından oldukça iyi sonuçlar verdiği, sistem cevabındaki gecikme ve kararlı durumdaki dalgalanmaların önemli ölçüde azaltıldığı gözlenmiştir. Tezde ayrıca, GA yardımcı YSA tabanlı bir UVM algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmaların uygulandığı bir fotovoltaiik sistem prototipi tasarlanmış, elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar YSA'yı kullanan tasarımın başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğini göstermiştir. PV sistem, özellikle tarımsal alanda su pompalama ve havalandırma sistemi gibi hız cevabı hassasiyetinin çok önemli olmadığı uygulamalar için tasarlanmıştır.

Tezde geliştirilen MPPT algoritmasının diğer geleneksel metotlarla karşılaştırıldığında avantajları, çıkış frekansındaki değişme miktarının sabit olmamasından dolayı cevap süresinin kısa olması ve algortmada yalnızca PV panel çıkış gerilimi ölçümünün yeterli olmasıdır. PV sistemde, akım sensörü gereksinimi ortadan kaldırılarak maliyet azaltılmış ve akım ölçümünden dolayı ortaya çıkan gürültü problemi giderilmiştir. Algoritmanın, geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritmasına göre üstünlükleri elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. Gün boyu yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlardan, GA optimizasyonunun kullanılmadığı YSA yapısı içeren MPPT algoritması için bulunan değerlere göre, teorik olarak hesaplanan PV panel gücünün ortalama olarak %95.14'ü kullanılabilirken, GA optimizasyonlu YSA içeren MPPT algoritması için %97.58'inin kullanılabildiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen sistemin avantajlarından birisi MPPT algoritmasının inverter katında gerçekleştirilmesiyle DC-DC dönüştürücü kullanımının elimine edilmesidir.

Böylece sistemin verimi artırılmıştır. PV sistem verimindeki bu artış, kullanılacak PV panellerin sayısını azaltmakta, bu da toplam maliyeti düşürmektedir.

Sistem özellikle depolamanın su tankı ile yapıldığı su pompalama ve kaynak-talep kısımları açısından tamamlayıcı bir yapıya sahip olan havalandırma uygulamaları için tasarlanmış olmasından dolayı, akü birimi içermemektedir. Böylece, daha basit ve daha ekonomik bir PV sistem elde edilmiştir.

MPPT algoritmasında YSA, ışık şiddeti ve sıcaklığa bağımlı olarak PV panellerin maksimum güç noktasındaki referans değerin gerçek zamanda bulunması için kullanılmış ve bu uygulama için sonuçların yeterince yüksek doğrulukta olduğu görülmüştür. Burada, referans değerin önceden bilinmesi mümkün olduğu için, geleneksel arama yöntemlerine göre daha etkin şekilde maksimum güç noktasında çalışma sağlanmıştır. Gerçekleştirilen MPPT algoritmasında geleneksel model tabanlı algoritmalarından farklı şekilde, PV paneller hakkında bir ön bilgiye ihtiyaç yoktur.

YSA'nın eğitilmesinde GA'ların kullanılmasıyla ağ performansının iyileştirilmesine önemli katkılar sağlanmıştır. Bu çalışmada GA ilk olarak YSA'nın eğitilmesinde veri girişleri için optimal bir alt setin elde edilmesi için kullanılmıştır. GA optimizasyonu kullanılarak giriş değişkenleri sayısının azaltılmasıyla daha hızlı eğitime ve daha yüksek işlem doğruluğu elde edilmiş ve ağdaki genelleştirme yeteneği geliştirilmiştir.

GA'lar kullanılarak herhangi bir uzman müdahalesine gerek duyulmadan YSA mimarisinin otomatik olarak tasarlanması ve verilen problem için uygun bir topolojinin elde edilmesi sağlanmıştır. Deneme yanılma yönteminde eğitime verisiyle birlikte aşırı öğrenme durumu ortaya çıktığı göz önüne alınarak, GA'da amaç fonksiyonuna bir ceza terimi eklenmesi ile düğüm sayısının gereğinden fazla sayıda olmasının önüne geçilmiştir. Ayrıca amaç fonksiyonu hesabında doğrulama setinin kullanılması da, ağdaki aşırı öğrenme problemine karşı olumlu yönde etki etmiştir. GA ile beş adet sinir hücresi içeren tek gizli katmana sahip optimal bir sinir ağı yapısı elde edilmiştir. Sinir ağının DSP üzerinde gerçekleştiriliyor olması göz önüne alındığında, 24 gizli düğüm sayısının elde edildiği deneme yanılma yöntemine göre

önemli bir avantaj sağlandığı görülmüştür. Daha az sinir hücresi sayısına sahip olunması, eğitime işleminin de hızlanmasına yol açmıştır.

MPPT algoritmasında, inverterde temel frekansın güncellenmesinde kullanılan değişme miktarını belirleyen PI denetleyici, sistem cevabında önemli iyileştirmeler sağlayarak sistem veriminin artmasına katkı sağlamıştır. İnverter frekansındaki değişme miktarının yüksek değerde seçilmesinin maksimum güç noktasına hızlı şekilde ulaşmayı sağlamakla birlikte, maksimum güç noktası etrafında oluşan salınımların artmasına neden olduğu görülmüştür. Frekanstaki değişme miktarının düşük değerde seçilmesi ise maksimum güç noktası etrafındaki salınımları azaltmış, ancak bu noktaya ulaşma hızının düşmesine neden olması verime olumsuz yönde etki etmiştir. Bu amaçla, frekanstaki değişme miktarının maksimum güç noktasına kadar büyük değerde, bu noktadan sonra ise düşük değerde seçildiği yöntemlerden (Hua ve Lin 2001, Xiao ve Dunford 2004) farklı olarak, bu çalışmada gerçekleştirilen PI denetleyici kullanılan GA yardımcı YSA tabanlı MPPT algoritması ile tüm çalışma noktalarında frekanstaki değişme miktarının gerçek zamanda belirlenmesi, sistem verimine olumlu katkı sağlamıştır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen üç fazlı inverterde, yüke daha yüksek gerilim sağlayabilmesi ve daha düşük harmonik içeriğe sahip olması gibi özelliklerinden dolayı UVM metodu kullanılmıştır. UVM metodu ile lineer bölgede çalışmada fazlar arası çıkış geriliminin genliğinin inverter DC giriş gerilimine kadar artırılabilmesi mümkün olmuştur. Böylece DC kaynak geriliminin daha verimli kullanılması sağlanmıştır. Sinüzoidal PWM algoritmasına göre, çıkış geriliminin genliğinin %15 artmasından dolayı motorda üretilen moment artırılmış, böylece motorda daha iyi bir dinamik cevap elde edilmiştir. UVM metodunun gerçekleştirilmesi için YSA tabanlı bir algoritma geliştirilmiş ve burada YSA'nın interpolasyon özelliğinden faydalanılmıştır.

Fotovoltaik sistemde, algoritmaların yürütülmesi için hızlı cevap yeteneğinden dolayı, yüksek hızda çalışan bir DSP kullanılmıştır. Bu amaçla PV sistem, ADSP-21992 tabanlı bir güç elektroniği sistemi olarak gerçekleştirilmiş ve böylece güvenilirliğin ve esnekliğin artırılması sağlanmıştır. DSP kullanımı ile hem komut düzeyinde hem de veri düzeyinde paralel işlem gerçekleştirilmiştir. DSP,

aritmetik ve adres hesaplamaları için ayrı aritmetik-lojik birimlere (ALU) sahip olduğu için veri hesaplamaları adres hesaplamalarından etkilenmeden gerçekleştirilmiş ve böylece yüksek hıza erişilmiştir.

6.2 Öneriler

MPPT algoritmasında inverterde temel frekansın değiştirilerek fotovoltaiik panellerin optimal noktaya karşılık gelen güç değerlerinde çalıştırılmasının sağlanması amacıyla PI denetleyici yapısının yerine bir bulanık mantık denetleyicinin kullanılması, sistem güç izleme performansının geliştirilmesi açısından önerilebilir. Bu amaçla istenilen dinamik performansın elde edilebilmesi için özellikle sinyal işleme hızı açısından DSP'nin yeterli kapasitede olması gerekmektedir.

İnverterde kullanılan anahtarlama metodunun uygun şekilde değiştirilmesi ile gerçekleştirilen MPPT algoritmasının fırçasız DC motor, anahtarlama relüktans motor ve PM senkron motor gibi farklı tipte motorlara uygulanması mümkündür. Ayrıca tezde ele alınan yüksek dinamik performansa ihtiyaç duymayan uygulamalar yerine, yüksek doğrulukta dinamik cevap isteyen vektör kontrollü asenkron motor uygulamaları için de PV sistemde geliştirilen MPPT algoritması kullanılabilir. UVM metodu özellikle vektör kontrol uygulamasında önemli avantajlar sağlayabilmektedir. Bu tip bir uygulama, DSP'lerin gittikçe daha güçlü hale gelmeleri ve maliyetlerinin düşük değerlere inmesiyle birlikte daha cazip hale gelebilecektir.

Geliştirilen MPPT algoritmasında, asenkron motora bağlanabilecek farklı tipte mekanik yükler için en uygun V/f profilinin belirlenerek asenkron motor momentinin yük tarafından istenen momentle uyumlandırılması gerekir. Fan tipi yüklerin aksine, bazı yüklerde kalkış zor olabilir ve yükün hareket ettirilmesi için motorun tam yük momentinden daha fazlasına ihtiyaç duyulabilir. Bu nedenle V/f profili, sistemde kullanılan farklı mekanik yüklere uygun şekilde seçilmelidir.

UVM metodunda, dalga şekillerinin optimize edilmesi için sıfır gerilim vektörlerinin ilavesiyle, üçüncü dereceden harmonik bileşenlerin ilavesi kontrol edilir. Optimize edilmiş UVM dalga şekilleri elde etmek için kullanılan değişik

sürekli modülasyon yöntemleri sistem üzerinde gerçekleştirilebilir. Ayrıca, YSA tabanlı UVM algoritması, aşırı modülasyon bölgesini de içerecek şekilde tasarlanabilir. Aşırı modülasyon bölgesinde ortaya çıkan nonlineerlik, YSA'nın lineer olmayan fonksiyonlara uygulanabilme özelliğinden dolayı, bu tip çalışmalar için uygundur.

Günümüzde YSA donanımı çok pahalı olmasına karşılık, YSA ile geliştirilen uygulamaların ve böylece de talebin artması fiyatların düşmesine neden olacaktır. Böylece, UVM metodunun YSA tabanlı olarak gerçekleştirilmesi üzerinde yapılacak çalışmaların, YSA donanımına olan ilginin artmasıyla birlikte özellikle ileriki yıllarda pratik çalışmalar açısından daha uygun duruma geleceği düşünülmektedir.

YSA tabanlı UVM algoritmasının özellikle ASIC ile gerçekleştirilmesi durumunda örnekleme süresinin azaltılarak daha yüksek anahtarlama sürelerine ulaşılabildiği belirtilmiştir (Pinto ve ark. 2000). Tezde geliştirilen UVM algoritmasının ASIC'de gerçekleştirilmesiyle, performansın incelenmesi ve ulaşılabilecek maksimum anahtarlama frekansı bulunarak, geleneksel algoritmaya göre elde edilecek avantajlar incelenebilir.

Gerçekleştirilen sistemin güç kısmında enerji depolamak için aküler kullanılmamış, ancak sistemde kararlı bir çalışma sağlanabilmesi ve MPPT algoritmasının daha hassas şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla kontrol katı, akü ile beslenmiştir. Böylece kontrol katında PV panellerin enerjisinin kullanılması önlenmiştir. PV sistem, akü depolaması içermediğinden ve direkt kuplajlı yükleri ele aldığından dolayı akü şarjı için ayrı bir dönüştürücü içermemekte olmasına karşın, ileride yapılabilecek sistem geliştirmelerinde, sisteme bir şarj edici ilave edilebilir. Akü depolaması ayrıca güç katında da kullanılarak panellerden sağlanan fazla enerjinin akülere aktarılması ve çeşitli yüklerin beslenmesi mümkün olabilir. Bu durum daha çok, kaynak ve yük dengesinin kaynak yönünde fazlalık oluşturduğu sistemler için uygundur. Bu çalışma, kaynak ve yük arasında dengeye sahip şekilde tasarlandığından enerji depolaması kullanılmamıştır.

7. KAYNAKLAR

- Abu Tariq, J. Asghar, M.S. 2006. Development of microcontroller-based maximum power point tracker for a photovoltaic panel. IEEE Power India Conference, pp.1-5, April 10-12.
- ADSP, 2002. Analog Device Inc., *ADSP-21992 EZ-KIT LITE Evaluation System Manual*, Analog Device, Inc. Digital Signal Processing Division, Noordwood, MA.
- Akbaba, M. 2003. Matching three-phase AC loads to PVG for maximum power transfer using an enhanced version of the Akbaba model and double step up converter. Solar Energy 75 : 15–25.
- Akkaya, R. 1995. Minimum kayıplı süreksiz modülasyonlu yeni bir uzay vektör PWM metodunun geliştirilmesi ve uygulanması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akkaya, R. ve Kulaksız, A.A. 2004. A microcontroller-based stand-alone photovoltaic power system for residential appliances. Applied Energy 78(4) : 419-431.
- Akkaya R. ve Kulaksız, A.A. 2006. DSP implementation of genetic-algorithm-assisted neural-network based space-vector PWM controller. Int. conf. on modeling and simulation (MS'06 Turkey), pp.209-215, Konya, August 28-30.
- Akkaya, R., Kulaksız, A.A., Aydoğdu, Ö. 2007. DSP implementation of a PV system with GA-MLP-NN based MPPT controller supplying BLDC motor drive. Energy Conversion and Management 48(1) : 210-218.
- Al-Amoudi, A., Zhang, L. 2000. Application of radial basis function networks for solar-array modelling and maximum power-point prediction. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution 147(5) : 310 – 316.
- Angeline P. J., Sauders G. M., Pollack J. B. 1994. An evolutionary algorithm that constructs recurrent neural Networks. IEEE Trans. Neural Networks, 5: 54–65.
- Archer, M.D., Hill, R. 2001. Clean electricity from photovoltaics (Series on Photoconversion of Solar Energy, Volume 1) by World Scientific Publishing Company.
- Arrouf, M., Bouguechal, N. 2003. Vector control of an induction motor fed by a photovoltaic generator. Applied Energy 74 : 159–167.
- Asce, 2000. Artificial neural networks in hydrology. I. Preliminary concepts. J. Hydro. Eng. ASCE 5 : 115–123.
- Bahgat, A.B.G., Helwa, N.H., Ahmad, G.E., El Shenawy E.T. 2004. Estimation of the maximum power and normal operating power of a photovoltaic module by neural networks. Renewable Energy 29(3) : 443-457.

- Bakhshai, A., Espinoza, J., Joos, G. Jin, H. 1996. A combined artificial neural network and DSP approach to the implementation of space vector modulation techniques. Conf. Rec. IEEE-IAS Annual. Meeting, pp. 934–940.
- Balakrishnan, K., Honavar, V. 1995. Evolutionary Design of Neural Architectures - a Preliminary Taxonomy and Guide to Literature. A.I. Research Group, Iowa State University, Technical Report CS TR #95-01.
- Balat, M. Havva. 2005. Solar Energy Potential in Turkey. Energy Exploration & Exploitation 23(1) : 61-70.
- Basheer, I.A., Hajmeer, M. 2000. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. Journal of Microbiological Methods 43 : 3–31.
- Basheer, I. 2000. Selection of methodology for modeling hysteresis behavior of soils using neural networks. J. Comput.-aided Civil Infrastruct. Eng. 5(6) : 445–463.
- Benardos, P.G. ve Vosniakos, G.-C. 2007. Optimizing feedforward artificial neural network architecture. Engineering Applications of Artificial Intelligence 20(3) : 365-382.
- Benlarbi, K. 2003. Fuzzy, neuronal and neuro-fuzzy optimization of a photovoltaic water pumping system driven by DC and AC motors. M.Sc. Thesis, Batna University, Algeria.
- Benlarbi, K., Mokrani, L., Nait-Said, M. S. 2004. A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system. Solar Energy 77(2) : 203-216.
- Bishop, C. 1995. Neural networks for pattern recognition. Oxford University Press, Oxford.
- Bose, B. K. 2002. Modern power electronics and AC drives, Prentice Hall, Upper Saddlo River.
- Brambilla, A., Gambarara, M., Garutti, A., Ronchi, F. 1999. New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking. Power Electronics Specialists Conference PESC 99. IEEE 30th Annual Conf. 2 : 632-637.
- Branke, J. 1995. Evolutionary algorithms for network design and training. Institute AIFB, University of Karlsruhe, Technical Report n.322.
- Brill, F.Z., Brown, D.E., Martin W.N. 1992. Fast genetic selection of features for neural network classifiers. IEEE Transactions on Neural Networks 3 : 324-328.
- Brown A. D., Card, H. C. 1997. Evolutionary artificial neural networks. Proc. Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering, CCECE'97 Part 1(of 2) : 313–317.
- Chapin D. M., Fuller C.S., Pearson, G.O. 1954. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. J. Appl. Phys. 25 : 676-677.

- Chung, D. W., Kim, J. S., Sul, S. K. 1998. Unified voltage modulation technique for real-time three-phase power conversion. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 34 : 374–380.
- Dzung, P.Q., Phuong, L.M., Nho, N.V. 2005. A new artificial neural network space vector PWM controller for voltage source inverter. *International Symposium on Electrical-Electronics Engineering-ISEE2005*, October 11-12, Ho Chi Minh City, Vietnam.
- Enjeti, P. N., Ziogas, P. D., Lindsay, J. F. 1990. Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: a critical evaluation. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 26(2) : 302–316.
- Enslin, J.H.R., Snyman, D.B. 1991. Combined low-cost, high-efficient inverter, peak power tracker and regulator for PV applications. *IEEE Transactions on Power Electronics* 6(1) : 73 – 82.
- Enslin, J.H.R., Wolf, M.S., Snyman, D.B., Swiegers, W. 1997. Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44(6) : 769–773.
- Fahlman, S.E. ve Lebiere, C. 1990. The cascade-correlation learning architecture. *Advances in Neural Information Processing Systems 2*. Touretzky, D. S. (ed), pp.524–532, San Mateo, CA.
- Giles, C.L., Omlin C.W. 1994. Pruning recurrent neural networks for improved generalization performance. *IEEE Transactions on Neural Networks* 5(5) : 848–851.
- Goldberg, D.E., Deb, K. 1991. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. *Foundations of Genetic Algorithms*. Morgan Kaufmann Publishers, pp. 69-93, San Mateo, CA.
- Guo Z. ve Uhrig, R.E. 1992. Using genetic algorithms to select inputs for neural networks. *Proc.Int. Workshop Combinations of Genetic Algorithms and Neural Networks*, pp.223–234, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA.
- Hassoun, M.H. 1995. *Fundamentals of Artificial Neural Networks*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Hava, A.M., Kerkman, R., Lipo, T.A. 1998. Carrier-based PWM-VSI overmodulation strategies: Analysis, comparison, and design. *IEEE Trans. Power Electron.* 13 : 674–689.
- Haykin, S. 1994. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Macmillan, NY.
- Hecht-Nielsen, R. 1990. *Neurocomputing*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Heng, G., Zheng, X., You-Chun, L., Hui, W. 2005. A novel maximum power point tracking strategy for stand-alone solar pumping systems. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, IEEE/PES August 15-18.

- Hiyama, T., Kouzuma, S., Imakubo, T. 1995. Evaluation of neural network based real time maximum power tracking controller for PV system. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 10(3) : 543-548.
- Holland, J.H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. The university of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
- Holtz, J. 1992. Pulsewidth Modulation-A survey. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 39(5) : 410-420.
- Holtz, J., Lammert, P., Lotzkat, W. 1986. High-speed drive system with ultrasonic MOSFET PWM inverter and single-chip microprocessor control. *Conf. Rec. IEEE-IAS Ann. Mtg.*, pp. 12-17.
- Holtz, J., Beyer, B. 1994. The trajectory tracking approach-A new method for minimum distortion PWM in dynamic high-power drives, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 30(4):1048-1057.
- Hu, Y.H. ve Hwang, J.-N. 2001. *Handbook of neural network signal processing (Electrical Engineering & Applied Signal Processing)*, CRC press.
- Hua, C., Lin, J. 2004. A modified tracking algorithm for maximum power tracking of solar array. *Energy Conversion and Management* 45(6):911-925.
- Hua, C., Lin, J., Shen, C. 1998. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Trans. Ind. Electron* 45 : 99-107.
- Hua, C. ve Shen, C. 1998. Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '98. Conf. Proc., Thirteenth Annual Volume 2*, pp.679 – 685, Feb.15-19.
- Hussein, K.H. Muta, I., Hoshino, T., Osakada, M. 1995. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEE Proc. Gener. Trans.. Distrib.* 142(1) : 59-64.
- Ikegami, T., Maezono, T., Nakanishi, F., Yamagata, Y., Ebihara, K. 2001. Estimation of equivalent circuit parameters of PV module and its application to optimal operation of PV system. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67 : 389-395.
- Jain, A.K., Mao, J., Mohiuddin, K.M. 1996. *Artificial neural networks: a tutorial*. *IEEE Comput.*, March 31-44.
- Jang, J.R., Sun, C., Mizutani, E. 1997. *Neuro-fuzzy and soft computing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Kulaksız, A.A. 2001. Güneş panelinden sağlanan elektrik enerjisinin güç elektroniği sistemleriyle kontrolü. Yüksek lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kulaksız, A.A., Akkaya, R. 2003. Maksimum güç noktası izleyicili fotovoltaik güç sisteminin mikrodenetleyici tabanlı kontrolü. *Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, pp.53 – 61, Kayseri, Ekim 3-4.

- Kunlun, C., Zhengming, Z., Liqiang, Y. 2001. Implementation of a stand-alone photovoltaic pumping system with maximum power point tracking. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems 1 : 612-615.
- Kyocera KC60. High efficiency multicrystal photovoltaic module. www.kyocerasolar.com/pdf/specsheets/kc60.pdf
- Levenberg, K. 1944. A method for the solution of certain problems in least squares, Quart. Applied Mathematics 2 : 164-168.
- Li, G., Alnuweiri, H., Wu, W. 1993. Acceleration of backpropagation through initial weight pre-training with Delta rule. Proceedings of an International Joint Conference on Neural Networks, pp. 580–585, San Francisco, CA.
- Liang, T.-J., Connell, R.M., Hoft, R.G. 1997. Inverter harmonic reduction using Walsh function harmonic elimination method. IEEE Trans Power Electron. 12(6) : 971–982.
- Looney, C.G. 1996. Advances in feedforward neural networks: demystifying knowledge acquiring black boxes. IEEE Trans. Knowledge Data Eng. 8(2) : 211–226.
- Lucas, B. ve Berringer, K. 2000. A 3-Phase AC induction motor control based on the MC68HC908MR32. Motorola, Inc., AN1857/D.
- Maier, H. R., ve Dandy, G. C. 2000. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modelling issues and applications. Environmental Modelling & Software 15 : 101-124.
- Mandischer, M. 1993. Representation and evolution of neural networks. Proc. International Conference on Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms, pp. 643-649, Springer, Eds. R. Albrecht and C. Reeves.
- Markvart, T. 2000. Solar Electricity, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- Marquardt, D.W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters. Jour. Soc. Ind. Appl. Math. 11 : 4731-441.
- Masoum, M.A.S., Dehbonei, H., Fuchs, E.F. 2002. Theoretical and experimental analysis of photovoltaic systems with voltage and current-based maximum power-point tracking. IEEE Trans.on Energy Conversion 17(4) : 514–522.
- Masters, T. 1994. Practical neural network recipes in C++. Academic Press, Boston, MA.
- Mendes, E.F., Carvalho, A.C., Matias, A. B. 1997. Credit assessment using evolutionary MLP networks. Proc. of Computational Finance 1997 – The Fifth International Conference on Neural Networks in the Capital, December.
- Microchip Technology Inc, 2001. 16F87x Data Sheet, 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers.

- Miller, C. B., Giles, C. L. 1993. Experimental comparison of the effect of order in recurrent neural networks. *Int. Journal of Pat. Recog. and A.I.* 7(4) : 849-872.
- Miller, G.F., Todd, P.M. ve Hegde, S.U. 1989. Designing neural networks using genetic algorithms. *Proc. 3rd Int. Conf. Genetic Algorithms and Their Applications*. J.D. Schaffer, Ed. San Mateo, CA: Morgan Kauffmann : 379-384.
- Mitsubishi Electric, 2000. Mitsubishi Intelligent Power Modules PM20CSJ060 Flat base type insulated package, September.
- Moody, J., Yarvin, N. 1992. Networks with learned unit response functions. Moody, J. et al. (Eds.). *Advances in Neural Information Processing Systems 4*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, pp. 1048–1055.
- Muljadi, E. ve Taylor, R. 1996. PV water pumping with a peak power tracker using a simple six step square wave inverter. *IEEE Industry Applications Conference. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96.*, vol 1, pp.133-142, October 6-10.
- Mutoh, N., Matuo, T., Okada, K., Sakai, M. 2002. Prediction-data-based maximum-power-point-tracking method for photovoltaic power generation systems. *Power Elect. Spec. Conf., IEEE 33rd Annual vol 3*, pp.1489-1494, June 23-27.
- Narendra, K.S., Parthasarathy, K. 1990. Identification and control of dynamical systems using neural networks, *IEEE Trans. on Neural Networks* 1(1) : 4-27.
- Nayar, C.V., Islam, S.M., Sharma, H. 2001. *Power electronics handbook*. Editor-In-Chief, Muhammad H. Rashid, Academic Press 23. *Power Electronics for Renewable Energy Sources*.
- Nelson, M., Illingworth, W.T. 1990. *A practical guide to neural nets*. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Noguchi, T., Togashi, S., Nakamoto, R. 2002. Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 49(1) : 217 – 223.
- Ocran, T.A., Cao, J., Cao, B., Sun, X. 2005. Artificial neural network maximum power point tracker for solar electric vehicle. *Tsinghua Science & Technology* 10(2) : 204-208.
- Ogasawara, O., Akagi, H., Nabel, A. 1989. A novel PWM scheme of voltage source inverters based on space vector theory. *Proc. EPE European Conf. Power Electronics and Applications*, pp.1197–1202.
- Oh, I.-S., Lee, J.-S., Moon, B.-R. 2004. Hybrid genetic algorithms for feature selection. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 26(11) : 1424-1437.
- Pfaff, G. Weschta, A., Wick, A. 1982. Design and experimental results of a brushless AC servo-drive. *Conf. Rec. IEEE-IAS Ann. Meeting*, pp. 692-697.

- Pinto, J.O.P., Bose, B.K., da Silva, L.E.B., Kazmierkowski, M.P. 2000. A neural-network-based space-vector PWM controller for voltage-fed inverter induction motor drive. *IEEE Trans. Ind. App.* 36(6) : 1628-1636.
- Pollmann, A.J. 1986. Software pulsewidth modulation for μ P control of AC-drives. *IEEE Trans. Ind. App.*, IA-22(4).
- Powersim Technologies 2006. PSIM-7.0 User Manual.
- Premrudeepreechacharn, S., Patanapirom, N. 2003. Solar-array modelling and maximum power point tracking using neural networks. *IEEE Bologna Power Technology Conference, Italy*.
- Rathnakumar, D., Lakshmana, Perumal, J. Srinivasan, T. 2005. A new software implementation of space vector PWM. *IEEE SoutheastConf. Proceedings.* pp. 131-136. April 8-10.
- Rumelhart D.E., McClelland J.L. 1986. *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition*, vol 1. MIT Press, Cambridge, MA
- Sağıroğlu, S., Beşdok, E., Erler, M. 2003. *Mühendislikte yapay zeka uygulamaları*, Ufuk Kitap Yayıncılık, İstanbul.
- Salas, V., Olías, E., Lázaro, A., Barrado, A. 2005. New algorithm using only one variable measurement applied to a maximum power point tracker. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 87(1-4) : 675-684.
- Samangkool, K., Premrudeepreechacharn, S. 2005. Maximum power point tracking using neural networks for grid-connected photovoltaic system. *International Conference on Future Power Systems*, pp.1-4, November 16-18.
- Santos, J.L., Antunes, F.L.M. 2003. Maximum power point tracker for PV systems. *RIO 3 - World Climate & Energy Event*, Rio de Janeiro, Brazil, December 1-5.
- Schaffer, J.D., Caruna, R.A., Eshelman, L.J., Das, R.S. 1989. Study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization, pp.51-60.
- Schmidt, W., Raudys, S., Kraaijveld, M., Skurikhina, M., Duin, R. 1993. Initialization, backpropagation and generalization of feed-forward classifiers. *Proc.of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks*, pp. 598–604.
- Spectrolab 2006. Boeing Spectrolab terrestrial solar cell surpasses 40 percent efficiency, St. Louis, MO, 6 Aralık 2006.
- Sun, X., Wu, W., Li, X., Zhao, Q. 2002. A research on photovoltaic energy controlling system with maximum power point tracking, *Proc. Power Conversion Conf.* pp. 822-826.
- Swingler, K. 1996. *Applying neural networks: a practical guide*. Academic Press, New York.

- Tan, S.-C., Lai, Y.M., Tse, C.K. 2005. Implementation of pulse-width-modulation based sliding mode controller for boost converters. *IEEE Power Electronics Letters* 3(4): 130 – 135.
- Torres, A.D.M., Antunes, F.L.M., dos Reis, F.S. 1998. An artificial neural network-based real time maximum power tracking controller for connecting a PV system to the grid. *Industrial Electronics Society. Proc. of the 24th Annual Conf. of the IEEE* 1 : 554 – 558.
- Tzou, Y.-Y., ve Hsu, H.-J. 1997. FPGA realization of space-vector PWM control IC for three-phase PWM inverters. *IEEE Trans. on Power Electronics* 12(6) : 953-963.
- Van der Broeck, H.W., Skudenly, H.C., Stanke, G.V. 1988. Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors, *IEEE Trans. on Ind. App.* 24(1) : 142-149.
- Vas, P. 1999. Artificial intelligence based electrical machines and drives, Application of Fuzzy, Neural, Fuzzy-Neural and Genetic Algorithm-Based Techniques, Oxford University Press.
- Veerachary, M. ve Yadaiah, N. 2000. ANN based peak power tracking for PV supplied DC motors. *Solar Energy* 69(4) : 343-350.
- Veerachary, M., Senjyu, T., Uezato, K. 2002. Neural network-based feedforward maximum power point tracking control for IDB converter-supplied PV system, *Int. Journal of Electronics*, 89(5):403-420.
- Widrow, B. ve Hoff, M. E. 1960. Adaptive switching circuits. *IRE WESCON*, pp.96-104, New York. Convention Record.
- Xiao, W. ve Dunford, W.G. 2004. A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems. *35th Annual IEEE Power Electron. Specialists Conf.*, pp. 1957-1963.
- Yang, J., Honavar, V. 1998. Feature subset selection using a genetic algorithm. *IEEE Intelligent Systems* 13, pp.44-49.
- Yao, X. 1999. Evolving artificial neural networks. *Proceedings of the IEEE* 87(9):1423-1447.
- Yao, Y., Baustamente, P., Ramshaw, R.S. 1994. Improvement of induction motor drive systems supplied by photovoltaic array with frequency control. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 8(1) : 47–52.
- Zaki, A., Eskander, M. 1996. Matching of photovoltaic motor–pump systems for maximum efficiency operation. *Renewable Energy* 7(3) : 279–288.
- Zhang, L. ve Bai, Y.F. 2005. Genetic algorithm-trained radial basis function neural networks for modeling photovoltaic panels. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 18(7) : 833-844.

EKLER

EK I. MATLAB PROGRAMLARI

Ek I-1. PV panel eşdeğer modeli için MATLAB’da gerçekleştirilen GUI için program kodu

```
function varargout = esdegermodelensson(varargin)
% Last Modified by GUIDE v2.5 24-Jan-2007 11:40:51
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @esdegermodelensson_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @esdegermodelensson_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before esdegermodelensson is made visible.
function esdegermodelensson_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

global EB, TC, Va, Ia;
function varargout = esdegermodelensson_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
```

```

else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

```

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global EB, TC, Va, Ia, VOC, ISC_O, VMP, IMP, PMP, y, seri, paralel, deger;
%function [output_data] = vmp(EB,T)
giris1=findobj(gcf,'Tag','edit1')
EB=(str2num(get(giris1,'String')))/1000;
giris2=findobj(gcf,'Tag','edit2')
TC=str2num(get(giris2,'String'))
giris3=findobj(gcf,'Tag','edit16');
seri=str2num(get(giris3,'String'))
giris4=findobj(gcf,'Tag','edit17');
paralel=str2num(get(giris4,'String'));

Vgeca=[0:0.01:seri*25];
Va=seri.*Vgeca;
Ia=kyo(Va,EB,TC);
Ia=paralel.*Ia;

```

```

ISC=Ia(1);
PMPdizi=(Va.*Ia);
PMP=max(PMPdizi);

k=find(PMPdizi>(PMP-0.001));
km=k(1);
VMP=Va(km);
IMP=Ia(km);

vocbul=find(Ia<0);
son=vocbul(1);
VOC=Va(son);
Va=Va(1:son);
Ia=Ia(1:son);

Efficiency=100*(PMP/((EB*1000)*0.489));
vocstr=findobj(gcf,'Tag','edit3')
set(vocstr,'String',num2str(VOC))
iscstr=findobj(gcf,'Tag','edit4')
set(iscstr,'String',num2str(ISC))
vmpstr=findobj(gcf,'Tag','edit5')
set(vmpstr,'String',num2str(VMP))
impstr=findobj(gcf,'Tag','edit6')
set(impstr,'String',num2str(IMP))
pmpstr=findobj(gcf,'Tag','edit7')
set(pmpstr,'String',num2str(PMP))
effstr=findobj(gcf,'Tag','edit8')
set(effstr,'String',num2str(Efficiency))

deger=paralel*5;
plot(Va*seri,Ia,'LineWidth',2);
axis([0 deger 0 50]);
xlabel('\bfPanel Gerilimi (V)');
ylabel('\bfPanel Akimi (A)');
grid on;
hold on;

function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla
function edit16_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit16_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit17_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Ia=kyo(Va,EB,TC)
global Va, EB, TC, VOC, ISC_O, VMP, IMP, PMP
k = 1.38e-23;
q = 1.60e-19;
A = 1.36;
Vg = 1.12;
Ns = 36;

```

```

T1 = 273 + 25;
Voc_T1 = 21.49 /Ns;
Isc_T1 = 3.73;
T2 = 273 + 75;
Voc_T2 = 15.69 /Ns;
Isc_T2 = 3.84;
TaK = 273 + TC;
TrK = 273 + 25;
Iph_T1 = Isc_T1 * EB;
a = (Isc_T2 - Isc_T1)/Isc_T1 * 1/(T2 - T1);
Iph = Iph_T1 * (1 + a*(TaK - T1));
Vt_T1 = k * T1 / q; % = A * kT/q
Ir_T1 = Isc_T1 / (exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
Ir_T2 = Isc_T2 / (exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b = Vg * q/(A*k);
Ir = Ir_T1 * (TaK/T1).^(3/A) .* exp(-b.*(1./TaK - 1/T1));
X2v = Ir_T1/(A*Vt_T1) * exp(Voc_T1/(A*Vt_T1));
dVdI_Voc = - 1.15/Ns / 2; % dV/dI at Voc per cell --
Rs=0.009;
Rsh=6.8;
Vt-Ta = A * 1.38e-23 * TaK / 1.60e-19; % = A * kT/q
Vc = Va/Ns;
Ia = zeros(size(Vc));
for j=1:10;
Ia = Ia - ...
(Iph - Ia - Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) -1)-(Vc+Ia.*Rs)/Rsh)...
./ (-1 - (Ir.*( exp((Vc+Ia.*Rs)./Vt-Ta) -1)).*Rs./Vt-Ta-Rs/Rsh);
end

```

Ek I-2. UVM metodu için simülasyon sonuçlarının gözlenebilmesi amacıyla MATLAB GUI'da geliştirilen program kodu

```

function varargout = svmfigure(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @svmfigure_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @svmfigure_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function svmfigure_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
global frekans, AF, MI, aciderece, phay, phby, phcy, cir1, cir2, cir3, cir4, cirb1, cirb2, cirb3, cirb4;
global circ1, circ2, circ3, circ4, dongu, VDC, direnc, bobin, kond, tr, tf;

    set(handles.pushbutton2,'Enable','off');

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = svmfigure_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global frekans, AF, MI, aciderece, phay, phby, phcy, cir1, cir2, cir3, cir4, cirb1, cirb2, cirb3, cirb4;

```

```
global circ1, circ2, circ3, circ4, dongu, artim, tr, tf;
```

```
temeld=findobj(gcf,'Tag','edit1');
frekans=str2num(get(temeld,'String'));
anahtar=findobj(gcf,'Tag','edit2');
AF=str2num(get(anahtar,'String'));
modi=findobj(gcf,'Tag','edit3');
MI=str2num(get(modi,'String'));
trst=findobj(gcf,'Tag','edit7');
tr=(str2num(get(trst,'String')))*0.000000001;
tfst=findobj(gcf,'Tag','edit8');
tf=str2num((get(tfst,'String')))*0.000000001;
artim=1/AF;
dongu=AF/frekans;
sondeger=((1/(frekans*artim))-1)*artim;
aci=[0:artim:sondeger];
aciderece=aci*360*frekans;
bolge1=aciderece(1:(dongu/6));
bolge2=aciderece(((dongu/6)+1):(2*(dongu/6)));
bolge3=aciderece((2*(dongu/6)+1):(3*(dongu/6)));
bolge4=aciderece((3*(dongu/6)+1):(4*(dongu/6)));
bolge5=aciderece((4*(dongu/6)+1):(5*(dongu/6)));
bolge6=aciderece((5*(dongu/6)+1):(6*(dongu/6)));
tk1=MI*artim*sin((60-bolge1)*(2*pi/360));
tk2=MI*artim*sin((120-bolge2)*(2*pi/360));
tk3=MI*artim*sin((180-bolge3)*(2*pi/360));
tk4=MI*artim*sin((240-bolge4)*(2*pi/360));
tk5=MI*artim*sin((300-bolge5)*(2*pi/360));
tk6=MI*artim*sin((360-bolge6)*(2*pi/360));
tkp1=MI*artim*sin(bolge1*(2*pi/360));
tkp2=MI*artim*sin((bolge2-60)*(2*pi/360));
tkp3=MI*artim*sin((bolge3-120)*(2*pi/360));
tkp4=MI*artim*sin((bolge4-180)*(2*pi/360));
tkp5=MI*artim*sin((bolge5-240)*(2*pi/360));
tkp6=MI*artim*sin((bolge6-300)*(2*pi/360));
tks1=artim-(tk1+tkp1);
tks2=artim-(tk2+tkp2);
tks3=artim-(tk3+tkp3);
tks4=artim-(tk4+tkp4);
tks5=artim-(tk5+tkp5);
tks6=artim-(tk6+tkp6);
pha1=artim-tks1/2;
phb1=tkp1+tks1/2;
phc1=tks1/2;
pha2=artim-tks2/2-tkp2;
phb2=artim-tks2/2;
phc2=tks2/2;
pha3=tks3/2;
phb3=artim-tks3/2;
phc3=tks3/2+tkp3;
pha4=tks4/2;
phb4=artim-tks4/2-tkp4;
phc4=artim-tks4/2;
pha5=tks5/2+tkp5;
phb5=tks5/2;
phc5=artim-tks5/2;
pha6=artim-tks6/2;
phb6=tks6/2;
```

```

phc6=artim-tks6/2-tkp6;
pha=[pha1,pha2,pha3,pha4,pha5,pha6];
phb=[phb1,phb2,phb3,phb4,phb5,phb6];
phc=[phc1,phc2,phc3,phc4,phc5,phc6];
phay=pha/artim;
phby=phb/artim;
phcy=phc/artim;
cir1=[];
cir2=[];
cir3=[];
cir4=[];
cir1=aci+(artim-pha)/2;
cir2=cir1+tr;
cir3=cir1+pha;
cir4=cir3+tf;
cir1(dongu+1)=1;

for i=1:dongu
    if cir2(i)<cir1(i)
        cir2(i)=cir1(i)+0.000000001;
    end
    if cir3(i)<cir2(i)
        cir3(i)=cir2(i)+0.000000001;
    end
    if cir4(i)<cir3(i)
        cir4(i)=cir3(i)+0.000000001;
    end
    if cir1(i+1)<cir4(i)
        cir1(i+1)=cir4(i)+0.000000001;
    end
end
cirb1=[];
cirb2=[];
cirb3=[];
cirb4=[];
cirb1=aci+(artim-phb)/2;
cirb2=cirb1+tr;
cirb3=cirb1+phb;
cirb4=cirb3+tf;
cirb1(dongu+1)=1;
for i=1:dongu
    if cirb2(i)<cirb1(i)
        cirb2(i)=cirb1(i)+0.000000001;
    end
    if cirb3(i)<cirb2(i)
        cirb3(i)=cirb2(i)+0.000000001;
    end
    if cirb4(i)<cirb3(i)
        cirb4(i)=cirb3(i)+0.000000001;
    end
    if cirb1(i+1)<cirb4(i)
        cirb1(i+1)=cirb4(i)+0.000000001;
    end
end
circ1=[];
circ2=[];
circ3=[];
circ4=[];

```

```

circ1=aci+(artim-phc)/2;
circ2=circ1+tr;
circ3=circ1+phc;
circ4=circ3+tf;
circ1(dongu+1)=1;
for i=1:dongu
    if circ2(i)<circ1(i)
        circ2(i)=circ1(i)+0.000000001;
    end
    if circ3(i)<circ2(i)
        circ3(i)=circ2(i)+0.000000001;
    end
    if circ4(i)<circ3(i)
        circ4(i)=circ3(i)+0.000000001;
    end
    if circ1(i+1)<circ4(i)
        circ1(i+1)=circ4(i)+0.000000001;
    end
end
set(handles.pushbutton2,'Enable','on');
axes(handles.axes1);
cla;
hold on;
plot(aciderece,phay);
plot(aciderece,phby);
plot(aciderece,phcy);
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
global dongu, cir1, cir2, cir3, cir4, cirb1, cirb2, cirb3, cirb4, circ1, circ2, circ3, circ4, artim, frekans,
DC, direnc, bobin, kond;

direncst=findobj(gcf,'Tag','edit4');
direnc=str2num(get(direncst,'String'));
bobinst=findobj(gcf,'Tag','edit5');
bobin=(str2num(get(bobinst,'String')))*0.000001;
kondst=findobj(gcf,'Tag','edit6');
kond=(str2num(get(kondst,'String')))*0.000001;
vdcst=findobj(gcf,'Tag','edit9');
VDC=str2num(get(vdcst,'String'));
FID_out = fopen('simulasyon.cir','w');
str = '***** GIRIS PARAMETRELERI *****\n.PARAM Vdc = %f\n.PARAM
R = %3.2f\n.PARAM L = %2.8f\n.PARAM C = %1.10f\n.PARAM Fo = %d\n.PARAM
PERIOD={ 1/Fo}\nVS 1 0 DC {Vdc}\n';
m=sprintf(str,VDC,direnc,bobin,kond,frekans);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);
m=[];
dosyaya1=[];
str2 = '\n';
n=sprintf(str2);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str='***** GERILIM KONTROLLU ANAHTARLAR *****\nS1 1 A CON14 0
SWITCH\nS2 1 C CON25 0 SWITCH\nS3 1 B CON36 0 SWITCH\nS4 A 0 0 CON14 SWITCH\nS5
C 0 0 CON25 SWITCH\nS6 B 0 0 CON36 SWITCH\n';
m=sprintf(str);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);

```

```

m=[];
dosyaya1=[];
str2 = '\n';
n=sprintf(str2);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str='*****GERIBESLEME DIYOTLARI *****\nD1 A 1 DMOD\nD2 0 C
DMOD\nD3 B 1 DMOD\nD4 0 A DMOD\nD5 C 1 DMOD\nD6 0 B DMOD\n';
m=sprintf(str);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);
m=[];
dosyaya1=[];
str2 = '\n';
n=sprintf(str2);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str='*****YILDIZ BAGLI YUK*****\nLA A AX {L}\nRA AX 0 {R}\nCA AX 0
{C}\nLB B BX {L}\nRB BX 0 {R}\nCB BX 0 {C}\nLC C CX {L}\nRC CX 0 {R}\nCC CX 0
{C}\n';
m=sprintf(str);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);
m=[];
dosyaya1=[];
str2 = '\n';
n=sprintf(str2);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str='VCON14 CON14 0 Pw\n + REPEAT FOREVER\n + 0 0,\n';
m=sprintf(str);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);
m=[];
dosyaya1=[];
str = '+ %2.12f 0, %2.12f 10, %2.12f 10, %2.12f 0,\n';
m=[];
k=[];
for i=1:dongu
m=sprintf(str,cir1(i),cir2(i),cir3(i),cir4(i));
k=[k;m];
end;
dosyaya1=k';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);
k=[];
m=[];
str3 = '+ ENDREPEAT\n';
n=sprintf(str3);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str2 = '\n';
n=sprintf(str2);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str='VCON25 CON25 0 Pw\n + REPEAT FOREVER\n + 0 0,\n';
m=sprintf(str);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);

```

```

m=[];
dosyaya1=[];
str = '+ %2.12f 0, %2.12f 10, %2.12f 10, %2.12f 0,\n';
for i=1:dongu
m=sprintf(str,cirb1(i),cirb2(i),cirb3(i),cirb4(i));
k=[k;m];
end;
dosyaya2=k';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya2);
k=[];
m=[];
str3 = '+ ENDREPEAT\n';
n=sprintf(str3);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str2 = '\n';
n=sprintf(str2);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str='VCON36 CON36 0 Pw\n + REPEAT FOREVER\n + 0 0,\n';
m=sprintf(str);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);
m=[];
dosyaya1=[];
str = '+ %2.12f 0, %2.12f 10, %2.12f 10, %2.12f 0,\n';
for i=1:dongu
m=sprintf(str,circ1(i),circ2(i),circ3(i),circ4(i));
k=[k;m];
end;
dosyaya3=k';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya3);
k=[];
m=[];
str3 = '+ ENDREPEAT\n';
n=sprintf(str3);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str2 = '\n';
n=sprintf(str2);
n=n';
fprintf(FID_out,'%s',n);
str='***** ELEMAN MODELLERI VE KONTROL KOMUTLARI
*****\n.MODEL SWITCH VSWITCH(RON=0.001)\n.MODEL DMOD
D\n.PROBE\n.TRAN 1U 30000U 0.5m 1U\n*.TRAN 0.5MS 30MS 0 UIC\n.OPTIONS NOPAGE
ITL5=0\n.END\n';
m=sprintf(str);
dosyaya1=m';
fprintf(FID_out,'%s',dosyaya1);
m=[];
dosyaya1=[];
%save test_io.txt;
fclose(FID_out);
winopen('simulasyon.cir');

function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');

```

```

else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

Ek I-3. UVM metodunun simülasyonunun yapılabilmesi için elde edilen PSPICE program kodu

```

***** GIRIS PARAMETRELERI *****
.PARAM Vdc = 20.000000
.PARAM R = 10.00
.PARAM L = 0.00000100
.PARAM C = 0.0000100000
.PARAM Fo = 50
.PARAM PERIOD={ 1/Fo}
VS 1 0 DC {Vdc}
***** GERILIM KONTROLLU ANAHTARLAR *****
S1 1 A CON14 0 SWITCH
S2 1 C CON25 0 SWITCH
S3 1 B CON36 0 SWITCH
S4 A 0 0 CON14 SWITCH
S5 C 0 0 CON25 SWITCH
S6 B 0 0 CON36 SWITCH
*****GERIBESLEME DIYOTLARI *****
D1 A 1 DMOD
D2 0 C DMOD
D3 B 1 DMOD
D4 0 A DMOD
D5 C 1 DMOD
D6 0 B DMOD
*****YILDIZ BAGLI YUK*****
LA A AX {L}
RA AX 0 {R}
CA AX 0 {C}
LB B BX {L}
RB BX 0 {R}
CB BX 0 {C}
LC C CX {L}
RC CX 0 {R}
CC CX 0 {C}

VCON14 CON14 0 Pwl
+ REPEAT FOREVER
+ 0 0,
+ 0.000002232910 0, 0.000002233910 10, 0.000064433757 10, 0.000064434757 0,
+ 0.000068728222 0, 0.000068729222 10, 0.000131271778 10, 0.000131272778 0,
+ 0.000135229940 0, 0.000135230940 10, 0.000198103393 10, 0.000198104393 0,
+ 0.000201738137 0, 0.000201739137 10, 0.000264928529 10, 0.000264929529 0,
.
.
.
+ 0.019762291189 0, 0.019762292189 10, 0.019771042144 10, 0.019771043144 0,
+ 0.019829502179 0, 0.019829503179 10, 0.019837164488 10, 0.019837165488 0,
+ 0.019896707538 0, 0.019896708538 10, 0.019903292462 10, 0.019903293462 0,
+ 0.019963907031 0, 0.019963908031 10, 0.019969426303 10, 0.019969427303 0,
+ ENDREPEAT

***** ELEMAN MODELLERI VE KONTROL KOMUTLARI *****
.MODEL SWITCH VSWITCH(RON=0.001)
.MODEL DMOD D
.PROBE
.TRAN 1U 30000U 0.5m 1U
.OPTIONS NOPAGE ITL5=0
.END

```

Ek I-4. Veri izleyici için MATLAB’da geliştirilen program

```

function varargout = seri(varargin)
% Last Modified by GUIDE v2.5 22-Nov-2005 15:54:14
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @seri_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @seri_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before seri is made visible.
function seri_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes seri wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);
axes(handles.axes1);
cla;
global time, cancel_data_acq, okunan, a, cb1
clear a;
axes(handles.axes1);
xlabel('süre (saniye)');
ylabel('veri');
box on;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.pushbutton1,'Enable','off');
set(handles.pushbutton3,'Enable','off');
set(handles.pushbutton4,'Enable','off');

global cancel_data_acq;
, a;
, time;
s = instrfind('Port', 'COM1');
if length(s) ~= 0
    fclose(s);
    delete(s);
end

s = serial('COM1','BaudRate',9600,'InputBufferSize', 1);
fopen(s);

```

```

s.ReadAsyncMode = 'manual';
data = fscanf(s);
fclose(s);
delete(s);
clear s;

if length(data) ~= 0
    s = serial('COM1','BaudRate',9600,'InputBufferSize',512);
    fopen(s);
    data = [];
    time = [];
    x=[];
    y=[];
    a=[];
    set(handles.messagewindow, 'String', 'Değer okunuyor...');

    while (1)
        pause(0.5);
        if cancel_data_acq
            cancel_data_acq = 0;
            break;
        end
        readasync(s);
        data = fscanf(s);
        x=sscanf(data,'%f %f %f %f');
        time=clock;
        %[satirx sutunx]=size(x)
        if length(x)>3
            y=[x(1) x(2) x(3) x(4) time(4) time(5) time(6)];
            a=[a;y];

            isikstr=findobj(gcf,'Tag','edit1');
            set(isikstr,'String',num2str(y(1)));
            sicstr=findobj(gcf,'Tag','edit2');
            set(sicstr,'String',num2str(y(2)));
            panstr=findobj(gcf,'Tag','edit3');
            set(panstr,'String',num2str(y(3)));
            panistr=findobj(gcf,'Tag','edit4');
            set(panistr,'String',num2str(y(5)));
            konvstr=findobj(gcf,'Tag','edit5');
            set(konvstr,'String',num2str(y(6)));
            konvistr=findobj(gcf,'Tag','edit6');
            set(konvistr,'String',num2str(y(7)));
        end
    end
    save a;
    save sonolculen;
    fclose(s);
    delete(s);
    clear s;
    set(handles.messagewindow, 'String', 'Durdu...');
    set(handles.pushbutton1,'Enable','on');
    set(handles.pushbutton3,'Enable','on');
    set(handles.pushbutton4,'Enable','on');
else
    set(handles.messagewindow, 'String', 'Seri giriş/çıkışta problem var...');
    set(handles.pushbutton1,'Enable','on');
    set(handles.pushbutton3,'Enable','on');
end

```

```

set(handles.pushbutton4,'Enable','on');
end
pause(5);
set(handles.messagewindow, 'String','Data kayıt programı');
% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global cancel_data_acq;
cancel_data_acq = 1;
set(handles.messagewindow, 'String', 'Ölçüm duruyor...');
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global a;
global time;
clear all;
cla;
load a;
hold on;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cbox1=findobj(gcf,'Tag','checkbox1');
cb1=get(cbox1,'Value');
if cb1==1
n=a(:,1);
m=a(:,7);
plot(time,n);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cbox2=findobj(gcf,'Tag','checkbox2');
cb2=get(cbox2,'Value');
if cb2==1
n=a(:,2);
m=a(:,7);
plot(m,n);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cbox3=findobj(gcf,'Tag','checkbox3');
cb3=get(cbox3,'Value');
if cb3==1
n=a(:,3);
m=a(:,7);
plot(m,n);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cbox4=findobj(gcf,'Tag','checkbox4');
cb4=get(cbox4,'Value');
if cb4==1
n=a(:,4);
m=a(:,7);
plot(m,n);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cbox5=findobj(gcf,'Tag','checkbox5');
cb5=get(cbox5,'Value');
if cb5==1
n=a(:,5);
m=a(:,7);

```

```

plot(m,n);
end
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
cbx6=findobj(gcf,'Tag','checkbox6');
cb6=get(cbx6,'Value');
if cb6==1
n=a(:,6);
m=a(:,7);
plot(m,n);
end
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
xlabel('süre (saniye)');
ylabel('veri');
box on;
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
function messagewindow_Callback(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
% -----

```

```

function Untitled_2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Untitled_2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
clear all;
[filename,pathname]=uigetfile('*.mat','Veri dosyasını seçiniz');
if ~ischar(filename),return,end
%load file (and keep only last column)
longfilename=strcat(pathname,filename);
load(longfilename);
save a;
% -----
function Untitled_3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Untitled_3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
global a;
clear all;
load a;
[dosyaa,dosyay]=uiputfile('*.mat','Çalışma alanını kaydet:');
if dosyaa~=0
    save([dosyay dosyaa])
end

```

EK II. PSIM PROGRAMLARI

Ek II-1. Geleneksel yapıdaki YSA tabanlı MPPT algoritması için PSIM şemasında kullanılan program

```
#include <math.h>
__declspec(dllexport) void simuser (t, delt, in, out)

double t, delt;
double *in, *out;
{
double G,T,VPV,freqadim=0.1;
double VPVref,x1,x2,err;
static double freq=5.0, hata[5]= {0,0,0,0,0};

G=in[0];
T=in[1];
VPV=fabs(in[2]);
x1=G;
x2=T-273;

VPVref= ( ( tanh( ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-1.3002212389380530e+000) )*(-
8.5506358007339767e-001) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) + (-1.2238960892386705e+000)
)*(3.8590820751076307e+000) )+ (1.8659630154413076e+000) ))*(9.5411844203608265e+000) )
)+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-1.3002212389380530e+000)
)*(1.1211282410404320e+000) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) + (-
))*(2.6802191388315808e+001) ) )+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-
1.3002212389380530e+000) )*(1.2673464651609627e+000) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) +
(-1.2238960892386705e+000) )*(1.6228779285099890e+000) )+ (5.1514463177843595e-001) ))*(-
1.2449644792013205e-001) ) )+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-
1.3002212389380530e+000) )*(-8.1255685736281136e-001) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) +
(-1.2238960892386705e+000) )*(3.7056362369903932e+000) )+ (1.8430745542372085e+000)
))*(-1.0513530947767727e+001) ) )+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-
1.3002212389380530e+000) )*(2.8388132688650508e-002) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) +
(-1.2238960892386705e+000) )*(8.4685590988193982e-001) )+ (-2.7833114554453551e+000) ))*(-
4.5044039371878704e+001) ) )+ (-7.0400595099990838e+001) ) )*(-5.4425484374092266e+000) ) /
(1.8058818909540975e-001);

if (VPVref<0)
{VPVref=0;}
err=VPV-VPVref;
if (fabs(err)>0)
{freq=freq+freqadim;

if (freq>50.0)
{
freq=50.0;}
if (freq<5.0)
{
freq=5.0;}
}
out[0]=freq;
out[1]=VPVref;
out[2]=freqadim;
}
```

Ek II-2. PSIM devre şemasında kullanılan PV model için geliştirilen program (pvmodel.dll)

```

#include <math.h>
__declspec(dllexport) void simuser (t, delt, in, out)

double t, delt;
double *in, *out;
{
    double IL, IO,V;
    double G,T,I;
    G=in[0];
    T=in[1];
    I=fabs(in[2]);

    IL=(3.73+0.003*(T-298.0))*(G/1000.0);
    IO=14.0E-9*(pow((T/298),3))*pow(2.718281828,(10826.937*((1/298.0)-(1/T))));
    //IO=pow(2,(10826.937*((1/298.0)-(1/T))));
    if (I>=IL)
    { V=out[0]-0.5;}
    else
    { V=(1.110458563*log((IL-I+IO)/IO))-(I*0.35);
    //if (V<0) V=0;
    }
    out[0]=V;
    out[1]=IO;
}

```

Ek II-3. PSIM devre şemasında kullanılan V/f yöntemi için geliştirilen program (Vfkontrol.dll)

```

#include <math.h>
__declspec(dllexport) void simuser (t, delt, in, out)

double t, delt;
double *in, *out;

{
    double freq, Mod;
    freq=in[0];
    Mod=(freq*0.02)+0.2;
    if (Mod>1.0) Mod=1.0;
    out[0]=Mod;
}

```

Ek II-4. Tezde geliştirilen YSA tabanlı MPPT algoritması için PSIM şemasında kullanılan program (ysa.dll)

```
#include <math.h>
__declspec(dllexport) void simuser (t, delt, in, out)
double t, delt;
double *in, *out;
{ double G,T,VPV,freqadim=0.1;
double VPVref,x1,x2,err,integ,oransal;
static double freq=5.0, hata[5]= {0,0,0,0,0};
G=in[0];
T=in[1];
VPV=fabs(in[2]);
x1=G;
x2=T-273;

VPVref= ( ( tanh( ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-1.3002212389380530e+000) )*(-
8.5506358007339767e-001) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) + (-1.2238960892386705e+000)
)*(3.8590820751076307e+000) )+ (1.8659630154413076e+000) ) )*(9.5411844203608265e+000) )
)+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-1.3002212389380530e+000)
)*(1.1211282410404320e+000) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) + (-
1.2238960892386705e+000) )*(-4.3940229186042579e-001) )+ (3.4296854211486276e+000)
))* (2.6802191388315808e+001) ) )+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-
1.2238960892386705e+000) )*(1.6228779285099890e+000) )+ (5.1514463177843595e-001) ) )*(-
1.2449644792013205e-001) ) )+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-
1.3002212389380530e+000) )*(-8.1255685736281136e-001) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002)
+ (-1.2238960892386705e+000) )*(3.7056362369903932e+000) )+ (1.8430745542372085e+000)
))* (-1.0513530947767727e+001) ) )+ ( ( tanh( ( (A1* (1.9911504424778761e-003) + (-
1.3002212389380530e+000) )*(2.8388132688650508e-002) )+ ((B1* (2.9414697754979666e-002) +
(-1.2238960892386705e+000) )*(8.4685590988193982e-001) )+ (-2.7833114554453551e+000) ) )*(-
4.5044039371878704e+001) ) )+ (-7.0400595099990838e+001) ) )-(-5.4425484374092266e+000) ) /
(1.8058818909540975e-001);

if (VPVref<0)
{ VPVref=0; }
err=VPV-VPVref;
hata[0]=hata[1];
hata[1]=hata[2];
hata[2]= hata[3];
hata[3]=hata[4];
hata[4]=err;
integ=(hata[0]+hata[1]+hata[2]+ hata[3]+ hata[4])*intkat;
oransal=err*orkat;
freqadim=(integ+oransal);
if (freqadim<-0.5) freqadim=-0.5;
if (fabs(err)>0.05)
{
freq=freq+freqadim;
if (freq>50.0)
{
freq=50.0;
}
if (freq<5.0)
{freq=5.0;} }
out[0]=freq;
out[1]=VPVref;
out[2]=freqadim; }
```

Ek II-5. YSA tabanlı UVM için gerçekleştirilen PSIM şemasında kullanılan program (ysauvm.dll)

```
float pay, payda, V24,V22, aci,cikis1,cikis2,cikis3,A1,tk1;
int sektor;
    pay=(float)((in[1]-in[2])*0.5773);
    payda=(float)(in[0]*0.6667-(in[1]+in[2])*0.3333);
    V24=(float)((atan2(pay,payda))*180/M_PI);
    if (V24<0) V24=V24+360;
sektor=0;
    if (V24>0) sektor=sektor+1;
    if (V24>60) sektor=sektor+1;
    if (V24>120) sektor=sektor+1;
    if (V24>180) sektor=sektor+1;
    if (V24>240) sektor=sektor+1;
    if (V24>300) sektor=sektor+1;
out[3]=sektor;
V22=abs(pow((pow(pay,2)+pow(payda,2)),0.5));
aci=(float)(V24-((sektor-1)*60.0));
A1=aci;
tk=( ( tanh( ( ( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001)
)*(2.9424967200063064e+000) )+ (2.9153427211694556e+000) ))*(1.0461063753706021e+000) )
)+( ( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001)
)*(7.3095390275780125e-001) )+ (4.1254488680524859e-001) ))*(3.5352671963507235e-002) ) )+ (
( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001)
)*(1.7262904273618120e+000) )+ (-1.8387032113824187e+000) ))*(7.4814438629289204e-001) )
)+( ( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001) )*(-
1.1357171219892139e+000) )+ (-1.5501705684079770e-001) ))*(-7.9433184891992470e-001) ) )+ (
( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001) )*(-
2.6569242123346348e+000) )+ (2.6016105494216575e+000) ))*(-2.8903780738806673e-001) ) )+ (-
4.0778173598739725e-002) ) )-(-9.0656944317245791e-001) ) / (2.0911224716864081e+000);
tk1=( ( tanh( ( ( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001)
)*(2.9424967200063064e+000) )+ (2.9153427211694556e+000) ))*(-6.1378759687565099e-001)
))*(7.3095390275780125e-001) )+ (4.1254488680524859e-001) ))*(-5.8189899809315304e-001) )
)+( ( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001)
)*(1.7262904273618120e+000) )+ (-1.8387032113824187e+000) ))*(-2.6235154759048918e-001) )
)+( ( tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001) )*(-
1.1357171219892139e+000) )+ (-1.5501705684079770e-001) ))*(5.4012929805935683e-001) ) )+ ( (
tanh( ( (A1* (3.0211480362537766e-002) + (-9.0543806646525671e-001) )*(-
2.6569242123346348e+000) )+ (2.6016105494216575e+000) ))*(9.0299445933339939e-001) ) )+ (-
8.5563472944728158e-002) ) )-(-9.0876454414344521e-001) ) / (2.0923868831065446e+000);
cikis1=(float)0.5*(tk*0.0001*V22);
cikis2=(float)0.5*(tk1*0.0001*V22);
cikis3=(float)0.0001-((2*cikis1)+(2*cikis2));
out[0]=cikis2;
out[1]=cikis1;
out[2]=cikis3;
```