

**YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇİN TEK AŞAMALI
MPPT DENETİMLİ ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİNİN
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Şaban ÖZDEMİR

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Ocak 2013
ANKARA**

Şaban ÖZDEMİR tarafından hazırlanan YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇİN TEK AŞAMALI MPPT DENETİMLİ ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İbrahim SEFA

Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Hasan KÖMÜRCÜGİL

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, D.A.Ü.

Doç. Dr. İbrahim SEFA

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Güngör BAL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Hamit ERDEM

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, B.Ü.

Tez Savunma Tarihi: 18 / 01 / 2013

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

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Şaban ÖZDEMİR

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI İÇİN TEK AŞAMALI MPPT DENETİMLİ ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Şaban ÖZDEMİR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ocak 2013

ÖZET

En yaygın kullanılan yenilenebilir enerji kaynağı fotovoltaik sistemlerdir. Yapılan çalışma ile yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş pillerinin ürettiği DA enerjisini genel şebekeye aktarabilmek amacıyla üç fazlı, üç seviyeli, tek kademeli ve şebeke etkileşimli evirici tasarlanmış ve uygulanmıştır. Evirici, küçük değişikliklerle rüzgârdan elektrik enerjisi üreten sistemler için de kullanılabilir durumdadır. Gerilim kaynaklı ve akım denetimli olarak tasarlanan eviricinin referans akımının değeri en yüksek güç noktasını izleme alt programı ile belirlenmekte ve böylece güneş pillerinden anlık olarak elde edilebilecek en yüksek güç çekilebilmektedir. En yüksek güç noktasının izlenmesi işlemi uyarlanmış artan iletkenlik yönteminin uygulandığı tek kademeli evirici ile gerçekleştirilirken akım denetimi için PI denetleyici kullanılmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında uyumlu oldukları, eviricinin birim güç faktöründe şebekeye enerji aktardığı ve evirici çıkış akımı toplam harmonik bozulumu seviyesinin %3,8 olduğu görülmüştür. Bu değer uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde. Ayrıca tasarlanan tek kademeli sistemin toplam verimi %93,08 olarak ölçülmüştür. Önerilen sistem ile ikinci bir DA/DA çevirici kullanılmasına gerek kalmadan ve en yüksek güç noktası izlenerek güneş pillerinden üretilen enerjinin şebekeye aktarılması sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 703.3.012
Anahtar Kelimeler : MPPT, Çok Seviyeli, Şebeke Etkileşimli, Evirici, PLL
Sayfa Adedi : 166
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. İbrahim SEFA

**IMPLEMENTATION OF SINGLE STAGE LINE INTERACTIVE
MULTILEVEL INVERTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES WITH
MPPT CAPABILITY
(Ph.D. Thesis)**

Şaban ÖZDEMİR

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
January 2013**

ABSTRACT

One of the widespread renewable energy source is photovoltaic. In this study, three-phase, neutral point clamped, single stage grid interactive inverter importing DC energy generated by photovoltaic modules to the public grid is designed and implemented. Designed inverter can also be used for wind systems with small modification. The inverter is designed voltage source and current controlled. Reference current of the inverter is determined by a sub-program of maximum power point tracking in order to obtain maximum power from photovoltaic modules for all instant. While a modified incremental conductance method is applied for maximum power point tracking algorithm, a PI controller is used for the current control. Simulations and experimental results show that the designed inverter imports energy to the grid with unity power factor and total harmonic distortion level is 3,8%. This value is in the limits of the international standards. In addition, the total efficiency of the system is measured as 93,08%. Proposed system provides maximum power point tracking of photovoltaic modules and exporting the generated energy to the grid without using additional DC/DC converter.

Science Code : 703.3.012
Key Words : MPPT, Multilevel, Line Interactive, Inverter, PLL
Page Number : 166
Adviser : Assoc. Prof. Dr. İbrahim SEFA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, tecrübelerinden faydalandığım danışmanım Doç. Dr. İbrahim SEFA'ya değerli görüş ve önerileriyle çalışmaya katkılar sağlayan kıymetli hocalarım Prof. Dr. Güngör BAL, Prof. Dr. Hasan Kömürcügil, Doç. Dr. Hamit ERDEM ve Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR'a ayrıca çalışmalarımda yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Necmi ALTIN'a katkılarından dolayı sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarına proje katkılarıyla maddi olarak destek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığına (07/2011-52 nolu proje) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xv
RESİMLERİN LİSTESİ	xxi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxii
1. GİRİŞ	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	5
2.1. Güneş Enerjisi	5
2.2. Rüzgar Enerjisi	6
2.3. Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları	7
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER	8
3.1. Fiziksel Yapıları	8
3.2. Çalışma İlkesi	9
3.3. PV Panel Verimi	10
3.3.1. PV yapı maliyeti	11
3.4. Işınım Şiddeti	13
3.5. PV Sistem Kullanım Alanları ve Türkiye'deki Durum	16

Sayfa

3.6.	PV Hücre Elektriksel Modeli	17
3.7.	PV Panel Akım Gerilim Karakteristiği	21
3.8.	PV Sistem Verimini Etkileyen Faktörler	23
3.9.	PV Modül Performansının Yıllara Göre Değişimi.....	25
4.	EVİRİCİLER.....	26
4.1.	Evirici Çıkış Frekansı ve Geriliminin Denetimi	26
4.2.	Eviricilerde DGM Üretimi	27
4.3.	Faz Sayılarına Göre Evirici Yapıları.....	30
4.3.1.	Bir fazlı eviriciler	30
4.3.2.	Üç fazlı eviriciler.....	31
4.4.	Besleme Kaynağına Göre Evirici Yapıları.....	32
4.5.	Seviye Sayılarına Göre Evirici Yapıları.....	34
4.6.	Çok Seviyeli Eviriciler	34
4.6.1.	Çok seviyeli evirici çeşitleri.....	36
4.6.2.	Çok seviyeli evirici eleman sayılarının karşılaştırılması	38
4.7.	Üç Seviyeli NPC Evirici	38
4.7.1.	Üç seviyeli NPC evirici eşdeğer devre modeli	42
4.7.2.	Üç seviyeli NPC evirici çıkış dalga formu.....	44
4.7.3.	Üç seviyeli NPC evirici orta nokta dengesizliği	48
4.8.	Şebeke Etkileşimli Eviriciler.....	49
5.	EN YÜKSEK GÜÇ NOKTASININ TAKİBİ	52
5.1.	Dolaylı MPPT	54

Sayfa

5.1.1.	Sabit gerilim metodu	54
5.1.2.	Sabit akım metodu	56
5.2.	Doğrudan MPPT	57
5.2.1.	Değiştir-gözle metodu	57
5.2.2.	Artan iletkenlik metodu	58
5.3.	Diğer metotlar	60
5.3.1.	Eğri uyarlama metodu	60
5.3.2.	Tablodan okuma metodu	61
5.3.3.	Parazitik kapasite metodu	61
5.3.4.	Sadece akım metodu	61
5.3.5.	Bulanık mantık ve yapay sinir ağları metotları	62
5.4.	MPPT Yöntemlerinin Karşılaştırılması	62
5.5.	ŞEE’de Kullanılan MPPT Tekniklerinin Karşılaştırılması	63
5.5.1.	Evirici yapısı ve faz sayılarına göre MPPT’li ŞEE’ler	64
5.5.2.	Yardımcı sistem kullanan MPPT’li ŞEE’ler	65
5.5.3.	Kullandıkları çevirici sayısına göre MPPT’li ŞEE’ler	67
5.5.4.	Doğrudan ya da dolaylı MPPT yapabilen ŞEE’ler	70
5.6.	MPPT Yapabilen Şebeke Etkileşimli Eviriciler	75
6.	ÜÇ FAZLI ÜÇ SEVİYELİ ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ TASARIMI	77
6.1.	Fotovoltaik Emülatör	78
6.2.	Güç Katı	82
6.3.	Filtreler	83

Sayfa

6.3.1.	DA bara kondansatörü	83
6.3.2.	Evirici çıkış filtresi tasarımı	84
6.4.	Giriş/çıkış Üniteleri	86
6.4.1.	Açma kapama ve gösterge sinyalleri.....	86
6.4.2.	Analog işaretler	87
6.4.3.	IGBT sürme işaretinin oluşturulması	89
6.5.	Denetçi Kartı	90
6.6.	Şebeke Bağlantı Ünitesi	91
7.	BENZETİM VE UYGULAMA SONUÇLARI	93
7.1.	Benzetim	93
7.2.	Uygulama	107
7.3.	Tasarlanan NPC Eviricinin Akım Denetimi	111
7.4.	Tasarlanan NPC Eviricide DA Nötr Akımı ve DA Bara Dengeleme ...	115
7.5.	Tasarlanan NPC Eviricinin Şebeke ile Senkron Çalıştırılması	116
7.6.	Tasarlanan NPC Eviricinin Şebeke ile Paralel Senkron Çalıştırılması.	118
7.7.	Tasarlanan NPC Eviricinin MPPT Denetimi	125
7.7.1.	Tek aşamalı eviricide doğrudan denetimli MPPT problemleri	131
7.7.2.	Tek aşamalı eviricide önerilen doğrudan denetimli MPPT	136
7.7.3.	P&O yönteminin şebeke etkileşimli eviriciye uyarlanması	138
7.7.4.	IC yönteminin şebeke etkileşimli eviriciye uyarlanması	141
7.7.5.	MPPT denetimli eviricinin şebeke şartlarında çalıştırılması ...	145
8.	SONUÇLAR.....	152

Sayfa

KAYNAKLAR	155
ÖZGEÇMİŞ	163

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli	15
Çizelge 3.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı.....	16
Çizelge 3.3. PV modül değişkenlerinin yıllara göre yaşlanma etkisi ile değişimi.....	25
Çizelge 4.1. Çok seviyeli evirici topolojilerinin donanım bazında karşılaştırılması .	38
Çizelge 4.2. Üç seviyeli NPC topolojisi için A fazı anahtar konumları	39
Çizelge 4.3. PV sistemlerden şebekeye enerji veren sistemler ile ilgili standartlar...	50
Çizelge 4.4. IEEE Std 929-2000'e göre şebekeden ayrılma zamanları	51
Çizelge 5.1 Değiştir-gözle değişim verileri	58
Çizelge 5.2. MPPT Yöntemlerinin Karşılaştırılması	63
Çizelge 7.1. Denetçi parametrelerinin Ziegler ve Nichols metodu ile bulunması ...	111
Çizelge 7.2. Düzenlenmiş P&O yöntemi	138
Çizelge 7.3. MIC ve MP&O yöntemlerinin tek aşamalı ÇŞE'de karşılaştırması	151
Çizelge 8.1. MIC ve MP&O yöntemlerinin tek aşamalı ÇŞE'de karşılaştırması	153

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Güneş pili iç yapısı	9
Şekil 3.2. Güneş pili temel elektriksel modeli	10
Şekil 3.3. Farklı PV uygulamaları için birim güç başına maliyet	11
Şekil 3.4. PV yapı maliyetinin yıllara göre değişimi	12
Şekil 3.5. Dünya güneşlenme haritası	13
Şekil 3.6. Türkiye güneşlenme haritası	14
Şekil 3.7. Güneş pili elektriksel eşdeğer modeli	18
Şekil 3.8. En yüksek güç noktasındaki eşdeğer devre modeli	19
Şekil 3.9. PV devre modeli	19
Şekil 3.10. PV çıkış değerlerinin ışınlam ve kalite faktörüne göre değişimi	22
Şekil 3.11. PV çıkış değerlerinin iç direnç ve sıcaklıkla değişimi	23
Şekil 3.12. PV modül değişkenlerinin çıkışa etkisi	24
Şekil 4.1. Bir fazlı sinüzoidal DGM evirici	27
Şekil 4.2. Çift kutuplu DGM üretimi	28
Şekil 4.3. Tek kutuplu DGM üretimi	29
Şekil 4.4. Yarım köprü evirici	30
Şekil 4.5. Tam köprü evirici	31
Şekil 4.6. Üç fazlı evirici	32
Şekil 4.7. Bir fazlı gerilim kaynaklı evirici	33
Şekil 4.8. Bir fazlı akım kaynaklı evirici	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Evirici bir kolu için çok seviye kavramının gösterilmesi	35
Şekil 4.10. Çok seviyeli evirici topolojileri prensip şeması.....	37
Şekil 4.11. Üç seviyeli NPC evirici	39
Şekil 4.12. Üç seviyeli NPC evirici anahtar konumlarına göre çıkış gerilimi	40
Şekil 4.13. A fazının O, P ve δ anahtarlama durumları için eşdeğer devre modeli ...	41
Şekil 4.14. PV panelden beslenen tek kademeli şebeke etkileşimli NPC evirici.....	42
Şekil 4.15. PV kaynaklı şebeke etkileşimli NPC evirici eşdeğer devre modeli.....	43
Şekil 4.16. Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici filtre edilmemiş faz nötr gerilimleri	45
Şekil 4.17. Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici filtre edilmemiş faz-faz gerilimleri	45
Şekil 4.18. Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici çıkış geriliminin m_a 'ya göre değişimi ..	47
Şekil 5.1. Güneş ve rüzgâr türbini MPPT eğrileri.....	53
Şekil 5.2. MPPT ve MPPT olmadan üretilen enerjilerin karşılaştırması	53
Şekil 5.3. Sabit gerilim metodu akış diyagramı	56
Şekil 5.4. Artan İletkenlik algoritmasının çalışma eğrisi	59
Şekil 5.5. Farklı evirici topolojilerinin PV akımına etkisi	64
Şekil 5.6. Ultra kapasitör kullanımı	66
Şekil 5.7. YEK'dan çekilen akımı doğrusallaştırma için ek düzenek	67
Şekil 5.8. PV kaynaklı şebeke etkileşimli evirici yapıları	68
Şekil 5.9. Farklı yapılardaki şebeke etkileşimli eviriciler.....	69
Şekil 5.10. Rüzgâr kaynaklı şebeke etkileşimli evirici yapıları.....	69
Şekil 5.11. Tablo metodları ile MPPT yapan evirici.....	71
Şekil 5.12. Matematiksel eşitlik metodları ile MPPT yapan evirici	72

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. Pilot hücre metodları ile MPPT yapan evirici.....	73
Şekil 5.14. Sık uygulanan iki aşamalı evirici yapıları.....	74
Şekil 6.1. Uygulama devresi prensip şeması.....	77
Şekil 6.2. Üç Fazlı Üç Seviyeli Şebeke Etkileşimli Evirici Uygulama Devresi.....	78
Şekil 6.3. PV panel verilerinin PPPE'e girilmesi.....	80
Şekil 6.4. PPPE çıkış gerilimi ve gücünün MP eğrisini üzerindeki değişimi.	81
Şekil 6.5. Giriş çıkış ve gösterge kartı	87
Şekil 6.6. AA gerilim okuma devresi.....	88
Şekil 6.7. AA akım okuma devresi	88
Şekil 6.8. DA okuma devreleri.....	89
Şekil 6.9. IGBT sürme devresi.....	89
Şekil 6.10. eZdsp F28335 denetçi kartı blok diyagramı	90
Şekil 6.11. Tristör Sürücü	92
Şekil 7.1. Üç fazlı üç seviyeli evirici Matlab/Simulink benzetim devresi.....	93
Şekil 7.2. Benzetim çalışması denetimi ve anahtarlama işaretlerinin üretimi	94
Şekil 7.3. Taşıyıcı ve modülasyon işaretlerinin gösterimi	95
Şekil 7.4. Üç seviyeli evirici anahtar işaretleri	96
Şekil 7.5. Etkin değer denetimi	97
Şekil 7.6. Etkin değer örnekleme yöntemi ile sistem çıkış parametreleri	98
Şekil 7.7. Etkin değer örnekleme ile aşağı ve yukarı ani referans değişimi tepkisi	99
Şekil 7.8. Denetim yapısının ani değerler cinsinden örnekleme ile denetlenmesi... ..	100
Şekil 7.9. Ani değer örnekleme ile sistem çıkış parametreleri	101

Şekil	Sayfa
Şekil 7.10. Ani değer denetimi ile referanstaki değişime tepkisi.....	102
Şekil 7.11. Üç fazlı üç seviyeli NPC MPPT’li ŞEE modeli.....	103
Şekil 7.12. Işınım şiddeti adım tepkisi ile evirici çıkış parametrelerinin değişimi ..	104
Şekil 7.13. Farklı atmosfer koşullarında evirici çıkış parametrelerinin değişimi	105
Şekil 7.14. Evirici akımının kararlı durumundaki toplam harmonik bozunumu	106
Şekil 7.15. Uygulama devresi prensip şeması.....	107
Şekil 7.16. Uygulama devresi prensip şeması.....	108
Şekil 7.17. Uygulama devresi detaylı şeması.....	108
Şekil 7.18. Uygulama devresi denetim diyagramı	109
Şekil 7.19. Algoritma özeti	110
Şekil 7.20. Akım denetimli lokal çalışma	113
Şekil 7.21. Evirici lokal çalışma akım, gerilim dalga formu ve harmonikleri	114
Şekil 7.22. DA bara dengesizliğinin giderilmesi	115
Şekil 7.23. Nötr akımı dengesizliğinin giderilmesi.....	116
Şekil 7.24. Şebekeden bağımsız senkron çalışma durumları	117
Şekil 7.25. Şebekeden bağımsız senkron çalışma durumları	118
Şekil 7.26. Eviricinin boş çalışmadan şebeke ile çalışmaya geçişi.....	119
Şekil 7.27. Eviricinin ada modu çalışmadan şebeke ile çalışmaya geçişi.....	120
Şekil 7.28. Farklı gerilimlerde şebeke etkileşimli çalışma	122
Şekil 7.29. Şebeke ile çalışma akım dalga formları ve harmoniği.....	123
Şekil 7.30. Eviriciden şebekeye aktarılan güç	123
Şekil 7.31. MPPT’li şebeke etkileşimli evirici çıkış akım ve gerilim dalga formu..	124

Şekil	Sayfa
Şekil 7.32. Üç seviyeli evirici aktif ve reaktif enerji denetimi.....	125
Şekil 7.33. Bir gün boyunca sıcaklık ve ısıtım şiddetinin değişimi	126
Şekil 7.34. Bir gün boyunca PV çıkış gücünün değişimi.....	127
Şekil 7.35. Çevirici çalışma noktasının MP noktasında olma durumu	127
Şekil 7.36. Çevirici çalışma noktasının MP noktasının sağında olma durumu.....	128
Şekil 7.37. Çevirici çalışma noktasının MP noktasının sağında olma durumu.....	129
Şekil 7.38. DA/DA çeviriciler üzerinde uygulanan MPPT yöntemleri	130
Şekil 7.39. Güneş pili ile beslenen DA/DA çevirici	131
Şekil 7.40. Bir fazlı tek aşamalı iki seviyeli şebeke etkileşimli evirici.....	132
Şekil 7.41. Üç fazlı tek aşamalı iki seviyeli şebeke etkileşimli evirici	133
Şekil 7.42. DA bara akım dalgalılığı.....	134
Şekil 7.43. MPPT denetçi hızı ile evirici denetçisi hızı arasındaki ilişki.....	135
Şekil 7.44. Yapay MP noktasının oluşturulması.....	136
Şekil 7.45. Evirici referans akımının adım büyüklüğü sınırının belirlenmesi	137
Şekil 7.46. Uygulanan MP&O yöntemi akış diyagramı	140
Şekil 7.47. Farklı ısıtım şiddetlerinde dP/dV eğiminin değişimi	141
Şekil 7.48. MP' noktası eğimi	143
Şekil 7.49. Uygulanan MIC MPPT akış diyagramı	144
Şekil 7.50. Önerilen şebeke etkileşimli NPC eviricinin genel görünüşü	145
Şekil 7.51. MPPT'li şebeke etkileşimli evirici çıkış akım ve gerilim dalga formu..	146
Şekil 7.52. MPPT'li Evirici çıkış parametreleri	147
Şekil 7.53. Farklı güç seviyelerinde evirici parametrelerini	147

Şekil	Sayfa
Şekil 7.54. MIC yöntemi ile referansa yaklaşma	148
Şekil 7.55. MP&O referansa yaklaşma hızı	148
Şekil 7.56. Kararlı durumda MIC yöntemi ile referans gücün izlenmesi	150
Şekil 7.57. Kararlı durumda MP&O yöntemi ile referans gücün izlenmesi	150

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Büyük PV santraller	6
Resim 2.2. Rüzgâr türbini (7,58 MW)	7

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	PV idealleştirme katsayısı
Ar	PV panel alanı (m^2)
C_{IN}	Giriş kondansatörü (Farad)
C_O	Çıkış kondansatörü (Farad)
D	Darbe genişlik oranı
dB	Gürültü seviyesi (Desibel)
δ_{GA}	Işınım şiddeti verimi
e	e sabiti = 2.71828
ekt	Karakteristik eğri eğimi (V^{-1})
E_L	Yükün ihtiyaç duyduğu enerji (kWh)
E_P	PV sistem tarafından üretilen enerji (kWh)
E_{PA'}	PV hücre enerjisi (kWh)
E_{PA}	Uygulamaya bağlı olarak hücreden çıkan enerji (kWh)
Φ_m	Manyetik akı (Weber)
f_s	Anahtarlama frekansı (Hertz)
G	Işınım şiddeti ($Sun=W.m^{-2}$)
H_A	PV panel yüzeyine düşen ışınım şiddeti ($kWh.m^{-2}$)
H_G	Güneş ışınım gücü ($kWh.m^{-2}$)
I_C	Kondansatör akımı (Amper)
I_D	Diyot akımı (Amper)
I_H	Güneş pili çıkış akımı (Amper)
I_{IN}	Giriş akımı (Amper)
I_L	Endüktans akımı (Amper)
I_{MPP}	En yüksek güç noktası akımı (Amper)
I₀	PV hücre karanlık veya ters tıkama akımı (Amper)

Simgeler	Açıklama
I_O	Çıkış akımı (Amper)
I_{PH}	Güneş ışınlamı tarafından üretilen akım (Amper)
I_{REF}	Referans akım (Amper)
I_{SC}	Kısa devre akımı (Amper)
k	Sabit değer
K	Boltzmann sabiti ($8,65 \times 10^{-5}$ eV/K)
K_B	Akü ve akü devre kaybı katsayısı
K_C	Güç dönüştürücü kayıpları katsayısı
K_H	Gölgelenme ve kir katsayısı
K_{PA}	Hücre devre kaybı katsayısı
K_{PH}	Işınım düşme açısı katsayısı
K_{PM}	Yanlış yükleme metodu katsayısı
K_{PT}	Hücre sıcaklık katsayısı
η_{MPPT}	En fazla güç noktası verimi
η_{PS}	Standart koşullarda PV verimi
P_{MAX}	En fazla güç (W)
R_L	Yük direnci (ohm)
R_{MPP}	En fazla güç noktası direnci (ohm)
R_P	Güneş pili eşdeğer paralel direnci (ohm)
R_{PM}	En fazla güç noktası PV eşdeğer paralel direnci (ohm)
R_S	Güneş pili eşdeğer seri direnci (ohm)
R_{SM}	En fazla güç noktası PV eşdeğer seri direnci (ohm)
T	Pil sıcaklığı (Kelvin)
T_S	Periyot süresi (s)
V	Gerilim (Volt)
V_A	Çıkış gerilimi (Volt)
V_D	Diyot gerilimi (Volt)
V_{IN}	Giriş gerilimi (Volt)
V_L	Endüktans gerilimi (Volt)
V_{MPP}	En fazla güç noktası gerilimi (Volt)

Simgeler	Açıklama
V_{MPPT}	En fazla güç noktası izleme gerilimi (Volt)
V_O	Çıkış gerilimi (Volt)
V_{OC}	Açık devre gerilimi (Volt)

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif Akım
CC	Sabit Akım (Constant Current)
CV	Sabit Gerilim (Constant Voltage)
D	Diyot
DA	Doğru Akım
DGM	Darbe Genişlik Modülasyonu
DMİ	Devlet Meteoroloji İşleri
e	Elektron
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi
EMI	Elektro Manyetik Girişim
IC	Artan İletkenlik (Incremental Conductance)
kcal	kilo kalori
MC	Mikrodenetleyici (Microcontroller)
MP	En Fazla Güç
MPP	En Fazla Güç Noktası
MPPT	En Fazla Güç Noktası İzleme
MW	Mega Watt
P&O	Değiştir ve Gözle (Perturb and Observe)
PV	Foto Voltaik
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
RFI	Radyo Frekanslı Girişim
SMPS	Anahtarlamalı Güç Kaynağı (Switch Mode Power Supp.)
ŞEE	Şebeke Etkileşimli Evirici
THD	Toplam Harmonik Bozunumu
TS	Türk Standardı
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynağı

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişimi ve dünya nüfusunda artış enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün doğrusal olmayan bir biçimde artırmaktadır. Fosil yakıtların tükenmekte olması ve nükleer yakıtların olumsuz yönlerinin yanında, iletim kayıplarının azaltılması, enerji güvenliğinin sağlanması gibi amaçlarla enerjinin tüketildiği yerlerin yakınlarında üretilmesine yönelik oluşan eğilim yenilenebilir enerji kaynaklarına (YEK) olan ilgiyi artırmaktadır [Sefa ve Altın, 2009]. Ancak YEK'lerinden elde edilen enerjinin birim maliyetinin geleneksel yakıtlara göre daha fazla olması, araştırmacıları bu kaynakların yatırım ve işletme maliyetlerinin azaltılmasına yönelik çalışmalara yoğunlaştırmıştır. Yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak güneş enerjisi ve bu enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan güneş pilleri ile sistem bileşenleri araştırmalarda en çok ilgi çeken konulardandır. Günlük hayatta kullanılan alıcıların çoğunun besleme girişleri alternatif akım (AA) iken fotovoltaiik (PV) paneller doğru akım (DA) üretmektedir. Kullanıcıların enerji talep miktarı ve zamanı ile güneş pilinden üretilen enerjinin zaman ve miktarının genellikle uyumlu olmaması PV ile beslenen lokal sistemlerin güvenilirliğini ve işletme verimini düşürmektedir. Enerjinin sürekliliğinin sağlanması için kullanılan aküler ise yatırım maliyetini arttırırken sistemin verimini de düşürmektedir. Bu sakıncaların giderilmesi ve güneş pillerinden üretilen enerjiden her zaman istifade edilebilmesi ise ancak şebeke etkileşimli sistemler ile mümkün olmaktadır [Sefa ve Altın, 2009; Salas ve ark., 2006; Kjaer ve ark., 2005; Altın ve Sefa, 2012]. Ayrıca bu eviricilerin çıkış akım harmonikleri uluslararası standartlarda (EN61000-3-2, IEEE1547 ve NEC690) belirtilen sınırlar içinde olmalıdır.

Günümüz eviricileri yapı bakımından akım kaynaklı ya da gerilim kaynaklı olarak tasarlanabilseler de şebeke etkileşimli eviricilerde (ŞEE) denetimlerinin kolaylığı nedeni ile gerilim kaynaklı akım denetimli eviriciler daha çok tercih edilmektedir [Sefa ve Altın, 2009; Kjaer ve ark., 2005; Hirachi ve Tomokuni, 1997; Sefa ve ark., 2008]. Diğer yandan, güç anahtarlarının sınırlı gerilim-akım ve anahtarlama frekansı değerlerinde üretilmesi, ya da yüksek gerilim değerlerinde çalışabilecek güç anahtarları maliyetlerinin çok yüksek olması eviricilerin üretebileceği güç seviyelerini

sınırlamaktadır. Şebeke etkileşimli eviriciler için üretilen güç miktarını artırmak amacı ile birden fazla evirici kullanmak bir çözüm olarak önerilebilmektedir. Ancak ekonomik olarak avantajlı bir yöntem değildir. Diğer bir çözüm ise bir evirici üzerinde güç anahtarlarını seri/paralel bağlayarak evirici gerilim/akımının dolayısıyla evirici gücünün artırılmasıdır. Ancak devre elemanları, akım yolları ile anahtarların tam özdeş olmayışı ve denetim sinyalleri arasında olabilecek küçük zaman farklılıkları, sıcaklıkla anahtar karakteristiklerindeki farklılaşmalar seri/paralel bağlı anahtarlarda dengesiz gerilim/akım paylaşımına neden olabilmektedir [Alvarez ve ark., 2010].

Çok seviyeli eviriciler klasik iki seviyeli eviricilere göre daha fazla eleman içermelerine rağmen daha düşük gerilim değerindeki güç anahtarları ile daha yüksek çalışma gerilimlerine dolayısıyla yüksek güçlere erişilmesi mümkün olabilmektedir. Ayrıca evirici çıkışındaki filtre boyutlarının küçülmesi, düşük dv/dt oranı ile birlikte elektromanyetik girişim (EMI) seviyesinin azalması, anahtarlama kayıplarının düşük olması gibi üstünlükleri çok seviyeli eviricilerin hızla yaygınlaşmasına sebep olmaktadır [Rodriguez ve ark., 2002; Dixon, ve Morán, 2006; Nami ve ark., 2008; Suh ve ark., 1998]. Bunun yanında çok seviyeli eviricilerin her bir kolunda kullanılabilecek güç anahtarı modüllerinin seri üretimine başlanması ise güç devresi tasarımını kolaylaştırmış, evirici boyutları küçültmüş ve sistem maliyetini azaltmıştır [Sefa ve ark., 2010].

Güneş pilinden beslenen ve şebekeye enerji aktaran farklı yapıda sistemler bulunmaktadır. Bu sistemlerde güneş pillerinin ürettiği DA gerilim değişen şebeke şartlarına göre koşullandırılmış bir AA gerilime çevrilmektedir. PV panelin çıkış akımı ve gerilimi, ışıınım seviyesi ve sıcaklıkla doğrusal olmayan şekilde değişmektedir. Yapılan yatırımdan en yüksek faydanın sağlanabilmesi için DA/AA çevrimi sırasında doğrusal olmayan bu karakteristiğin göz önünde bulundurularak en yüksek güç noktası takibinin (MPPT) yapılması gerekmektedir. Bu işlem çoğunlukla DA/DA çevirici ya da çeviriciler ile gerçekleştirilmektedir. Güç dönüşümü için iki çevirici (DA/DA ve DA/AA) kullanıldığından bu yapı iki kademeli çevrim olarak adlandırılmaktadır. Güç dönüşümü tek kademede yapıldığında ise MPPT işleminin

de DA/AA eviriciye yaptırılması gerekmektedir. Bu durumda evirici hem DA/AA dönüşümünü gerçekleştirmekte hem de maksimum güç noktasını izleyebilmektedir. Bu iki işlemin aynı anda aynı çeviricide gerçekleştirilmesi evirici denetimini karmaşıktırdığından çıkış kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuzluk nedeniyle önceleri pek kullanılmayan tek kademeli evirici yapısı, mikroişlemci ve güç anahtarı teknolojisindeki gelişmelerle birlikte son yıllarda ilgi çekmektedir [Sefa ve Altın, 2009; Alonso ve ark., 2010].

Tek kademeli çok seviyeli şebeke etkileşimli eviriciler ile maksimum güç noktasının takip edilmesine yönelik çalışmalar, daha çok birbirinden yalıtılmış kaynaklar gerektiren kaskat bağlı H köprüleri ile yapılmıştır. Bu çalışmalarda genellikle sabit gerilim yöntemi, sabit akım yöntemi, tablodan okuma yöntemi ve örnek hücre yöntemi gibi dolaylı yöntemler kullanılarak MPPT işlemi gerçekleştirilmiştir. Doğrudan yöntemlerin kullanıldığı sınırlı sayıda çalışmada ise şebekeye etkileşimli eviricilerin taşınması gereken toplam harmonik bozulumu (THD) seviyesi ve güç faktörü gibi çıkış kalitesi kriterleri IEEE 1547 gibi standartlarda belirtilen şartları sağlayamamıştır [Alonso ve ark., 2010]. Nötr noktası tutmalı (NPC) evirici yapısının kullanıldığı maksimum güç takibi yapabilen şebeke etkileşimli evirici uygulamalarına ilişkin sınırlı sayıda benzetim çalışması bulunmaktadır [Bouchafaa ve ark., 2010; Ravi ve ark., 2011; Stala, 2010]. İzole kaynak gerektirmemeleri, üç seviyeli eviriciler için hazır modüllerin bulunabilmesi gibi kolaylıklar NPC eviricileri daha cazip kılmaktadır [Sefa ve ark., 2010].

Bu çalışmada güneş pillerinden üretilen enerjinin şebekeye aktarılması amacıyla, üç fazlı, üç seviyeli NPC şebeke etkileşimli evirici tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarımda 32 bit kayan noktalı sayısal sinyal işleyici (DSP) kullanılmıştır. Önerilen şebeke etkileşimli üç seviyeli NPC evirici başka bir güç elektroniği dönüştürücüsüne ihtiyaç duymadan güneş pillerinden oluşan kaynaktan her an mümkün olan en yüksek gücün elde edilebilmesi amacıyla maksimum güç noktasını takip edebilmektedir. MPPT işleminin gerçekleştirilmesinde uyarlanmış artan iletkenlik (Modified Incremental Conductance-MIC) yöntemi uygulanmıştır. Şebeke etkileşimli eviricinin şebekeye aktardığı akım oransal-integral (PI) denetleyici ile

denetlenmiştir. Evirici çıkışında yüksek frekans bileşenlerini yok etmek için LCL filtre ve şebeke ile izolasyonun sağlanması, çıkış geriliminin yükseltilmesi ve DA akım enjeksiyonun engellenmesi için şebeke frekanslı transformatör kullanılmıştır. Benzetim ve uygulamalardan elde edilen sonuçlar, tasarlanan sistemin şebekeye birim güç faktöründe ve sinüzoidal formda akım transfer edebildiğini göstermiştir. Tasarlanan evirici anlık olarak güneş pillerinden üretilebilecek maksimum gücü belirleyerek şebekeye aktarabilmektedir. Bununla birlikte önerilen sistemin toplam verimi %93,08 olarak ölçülmüştür.

Tezin 2. bölümünde yenilenebilir enerji kaynaklarının ülkemizde ve dünyada kullanımı, 3. bölümde fotovoltaiik sistemlerin fiziksel yapıları ve fotovoltaiik sistemlerin denetimi yapıları, 4. bölümde eviriciler, çeşitleri, kullanım alanlarına göre evirici, 5. bölümde MPPT yapıları ve uygulanış biçimleri ile eviricilerde kullanılan MPPT yapılarına değinilmiştir. 6. bölümde üç fazlı üç seviyeli NPC şebeke etkileşimli evirici tasarımı, 7. bölümde tasarlanan eviricinin benzetim ve uygulama sonuçları ve son olarak 8. bölümde ise tasarlanan ve uygulanan sistemden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Günümüzde ihtiyaç duyulan enerjinin büyük bir çoğunluğu fosil ve nükleer yakıtlardan elde edilmektedir. Bu yakıtların gerek çevreye verdikleri zararlar ve gerekse rezervlerinin sınırlı oluşu, alternatif enerji kaynakları arayışına sebep olmuştur. Çevrenin korunması, gelecekte insan yaşamı ve çevre dengeleri üzerinde oluşabilecek tehditlerin önlenmesi, ulusal kaynaklardan en üst düzeyde yararlanılarak ülkelerin enerji kaynakları arz güvenliğinin sağlanması, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesini ve kullanılmasını gerekli hale getirmektedir. Böylece, enerjinin karşılanma ihtiyacına bağlı olarak güneş, rüzgâr, jeotermal, biokütle ve hidrojen gibi alternatif enerji kaynakları üzerine araştırma geliştirme çalışmaları yoğunlaşmıştır. Bunlardan güneş ve rüzgâr santrallerinin uygulanabilme potansiyellerinin yüksek oluşu özellikle güneşin hemen hemen her yerde bulunması nedeni ile yaygınlaşması ön plana çıkmaktadır.

2.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi sistemleri ülkemizde ve dünyada güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi, kutba yakın bölgeler hariç güneş enerjisi potansiyelinin bu kaynaktan enerji elde etmek için uygun olması, gibi avantajları sebebiyle hızla yaygınlaşmaktadır. PV paneller DA gerilim üretmektedir. Bu sebeple, elektrikle çalışan uygun güç ve gerilimdeki her türlü alıcı PV kaynaktan doğrudan beslenebilir. Güneşten elektrik enerjisi üreten sistemlerin bir diğer önemli özelliği de modüler yapısı ile birkaç watt değerinden megawatt değerine kadar kolaylıkla tasarlanıp uygulanabilmesidir. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMI) ile Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE)'nin yaptığı araştırmaları Güney Doğu Anadolu ve Akdeniz Bölgelerinin PV uygulamaları için elverişli olduğunu göstermektedir [EİE, 2012].

Her geçen gün özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde PV sisteme olan ilgi artmakta ve uygulanan çeşitli teşvikler neticesinde yüzlerce mega watt (MW) mertebelerinde kurulabilmektedir. Resim 2.1'de 80 ve 40 MW kurulu güce sahip PV

santraller görülmektedir. 2010 yılı itibari ile dünyadaki toplam PV kurulu gücü önceki 10 yıla göre %57 artışla 47 GW olduğu bildirilmiştir [Bouzguenda ve ark., 2011]. 2012 yılı başı itibariyle dünyada kurulu PV gücü 70 GW civarında olduğu tahmin edilmektedir.



Resim 2.1. Büyük PV santraller

a) Ohotnikovo-Ukrayna (80 MW) b) Waldpolenz-Almanya (40 MW)

2.2. Rüzgâr Enerjisi

Rüzgâr enerjisinden eski çağlardan beri faydalanılmaktadır. Ham madde maliyeti olmayan çevreye yok denilecek kadar az zararı olan bir kaynak olması yatırım maliyetinin diğer YEK'ndan daha az olması bu kaynaklara olan ilgiyi artırmaktadır. Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi elde etmek için rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Değişik güçlerde rüzgâr türbinleri hali hazırda kullanılmaktadır. Türbinler rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye oradan da AA generatörler yardımı ile elektrik enerjisine çevirmektedirler. Rüzgâr türbinlerinde değişik yapılarda generatörler kullanılmaktadır. Bunlardan en fazla kullanılanlar indüksiyon generatörleri, uyarımlı veya sabit mıknatıslı senkron generatörlerdir. Türbin güçleri MW seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Resim 2.2'de 7,58 MW gücünde, kanat çapı 127 metre ve kule yüksekliği 135 metre olan ENERCON E-126 model bir rüzgâr türbini görülmektedir [Enercon, 2013].



Resim 2.2. Rüzgâr türbini (7,58 MW)

2.3. Diğer Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Jeotermal, biokütle ve hidrojen gibi kaynaklardan da elektrik üretimi yapılabilmektedir. Ancak hidrojen hariç diğer kaynaklar belirli bölgelerde sınırlı güçlere kadar kurulabilmektedirler. Hidrojen enerjisi veya diğer ifade ile yakıt pilleri 19. yy başlarında keşfedilmesine rağmen çok ilgi görmeyip son yıllarda yeniden önem kazanmaya başlamıştır. Yakıt pilleri gerçekte bir enerji depo eden elemandır. Ancak bu depolama işini suyun elektrolizi ile gerçekleştirir. Elektroliz için gerekli olan enerji fosil yakıtlardan elde edilebildiği gibi rüzgâr ve güneş enerjisinden de elde edilebilmektedir. Elektroliz sonucu ortaya çıkan hidrojen depolanarak ihtiyaç halinde oksijenle birleştirilip enerji elde edilir. Bu yanma işlemi onucunda ise ortaya sadece su çıkacağından çevresel kirlilik oluşturmamaktadırlar.

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

Fotovoltaik ışık enerjisini elektrik enerjisine çeviren elemanlara verilen isimdir. Sistemde ışık kaynağı genelde güneş enerjisi olduğundan güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren sistemler fotovoltaik sistemler olarak adlandırılmaktadır.

3.1. Fiziksel Yapıları

Günümüzde farklı maddelerden ve farklı teknolojilerde birçok tipte PV panel üretilmektedir. Pahalı yarı iletkenlerden üretilirler. Genelde en yaygın üç yapı tipi vardır. Bunlar,

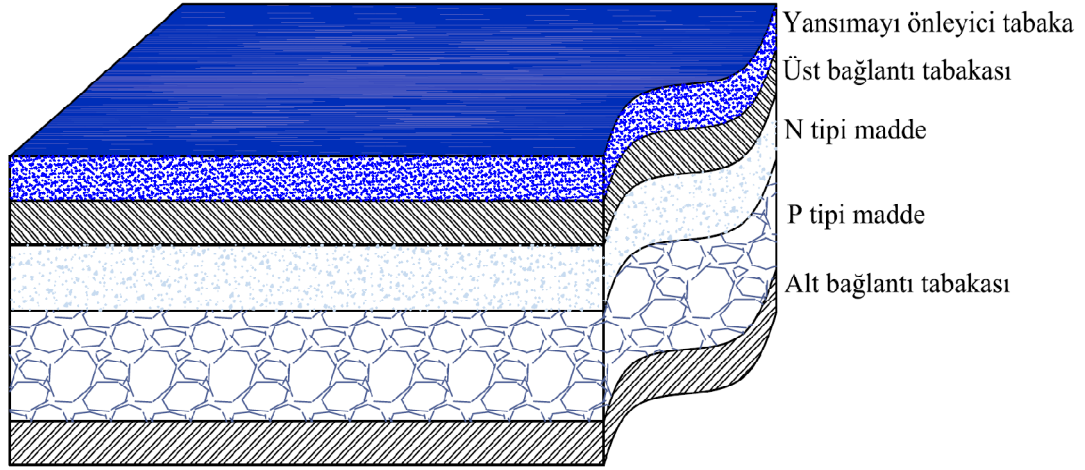
- Tekli Kristal Silikon (Mono-Crystalline Silicon or Single-Crystalline Silicon)
- Çoklu Kristal Silikon (Poly-Crystalline Silicon or Multicrystalline Silicon)
- İnce Film (Thin-Film or Amorphous Silicon)

Yapı malzemesi olarak Kristal Silisyum, Galyum Arsenit (GaAs), Amorf Silisyum, Kadmiyum Tellurid (CdTe), Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe₂) gibi üretim maddeleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tekli kristal paneller 1950'li yıllarda kullanılmaya başlanılmış en eski ve hala kullanılmakta olan teknolojidir. Çoklu kristal paneller 1980'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Her iki teknoloji de yüksek verim ve pahalılığıyla ünlüdür. Ancak tekli kristallerin verimi ve fiyatı çoklu kristallerden fazladır. İnce film paneller ise ucuz olmalarına karşın verimleri oldukça düşüktür.

Hangi panelin en uygun olduğu konusu yer ve uygulamaya göre değişmektedir. Tekli kristallerin yüksek verimli olmalarına karşın sıcaklık katsayısının yüksek olması nedeni ile sıcak iklimlere elverişli değildir. Çoklu kristaller verim olarak ikinci sırada yer almalarına karşın sıcak iklimlere tekli kristallerden daha uygundur. Her iki

yapı uzun yıllar kullanıma uygundur. İnce film paneller ömürlerinin kısa ve düşük ısılardaki veriminin diğerlerine nazaran 2-3 kat daha düşük olmasına karşın aşırı sıcak iklimlerde çalışmaya uygundurlar. Şekil 3.1’de PV panellerin genel iç yapısını gösteren genel bir şekil görülmektedir.

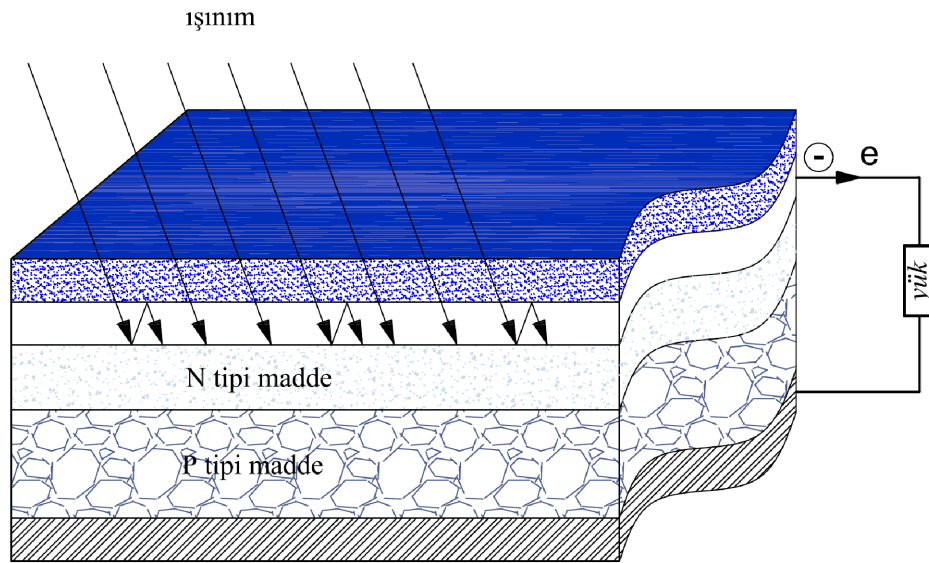


Şekil 3.1. Güneş pili iç yapısı

Alt ve üst bağlantı tabakası terminal noktaları ifade ederken P ve N tipi madde yarı iletken tabakayı ifade etmektedir. Yansımayı önleyici tabaka ise güneşten gelen ışınların bir kısmı geri yansımaktadır. Bu yansıyan ışınların hapsedilerek tekrar yarıiletken madde ile etkileşime geçmesini sağlayan tabakadır.

3.2. Çalışma İlkesi

Şekil 3.2’de şeması verilen PV hücreleri pozitif ve negatif taraf olmak üzere iki kısımdan oluşur. Her iki tarafta da son yörüngelerinde 4 elektron bulunduran (genelde germanyum ya da silisyum) atomlar bulunur. Ayrıca pozitif tarafta (P tipi madde) 3 elektron, negatif tarafta (N tipi madde) ise 5 elektron bulunduran atomlar vardır. 5 elektron bulunduran atom elektron vermeye 3 elektron bulunduran atom ise elektron almaya elverişlidir.



Şekil 3.2. Güneş pili temel elektriksel modeli

Işınım etkisi ile fotonlar PV hücresine çarparak elektronların hareketini sağlar, hareketlenen elektron yük üzerinden devresini tamamlar. Bu ise elektrik akımının oluşumu anlamına gelmektedir.

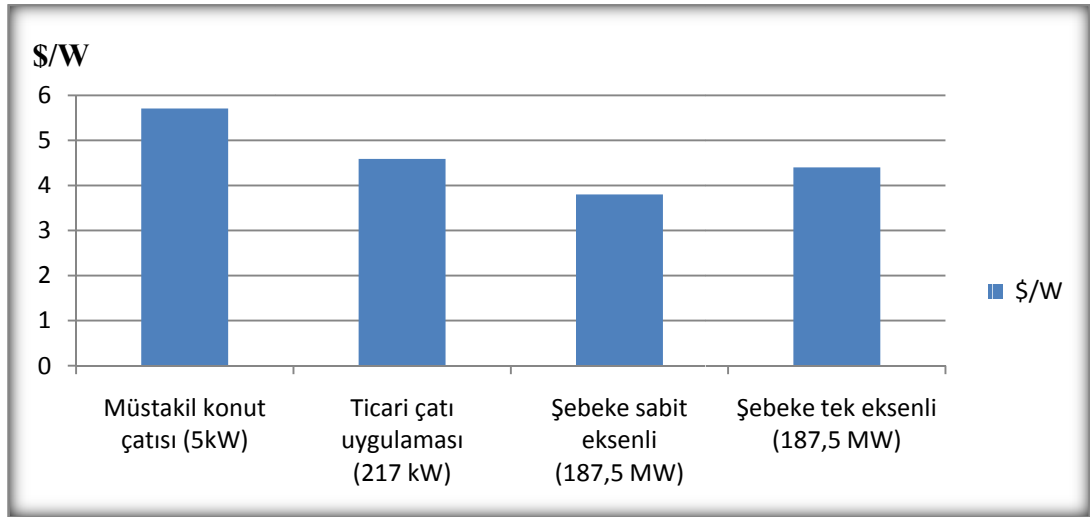
3.3. PV Panel Verimi

PV hücreler güneşten aldıkları enerjinin tamamını elektrik enerjisine dönüştüremezler. Birim alanda üretilen elektrik enerjisinin ışınım yolu ile gelen enerjiye oranı verimi vermektedir. Ticari olarak üretilen panel verimleri %12 ile 19 arasında değişmektedir. Bu değer sıcaklık, ışınım şiddeti, kirlenme, gölgelenme gibi etkilere göre değişmektedir [Mekhilef ve ark., 2012; Özdemir, 2007]. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte bu değer %21'lere kadar çıktığı, yoğunlaştırıcı sistemler (concentrator) kullanılarak PV panel verimleri %35'lere kadar yükseltildiği rapor edilmiştir [Dimroth ve ark., 2005; Mulligan ve ark., 2004].

3.3.1. PV yapı maliyeti

PV panellerden elde edilen enerji maliyeti, hidroelektrik, kömür, petrol, nükleer gibi günümüz yakıtlarından elde edilen enerjiden daha fazladır. Temelde aradaki farkın kaynağı kurulum maliyetidir. Kurulum maliyetini oluşturan unsurlar PV panel, yedekleme üniteleri (akü), güç dönüştürücüleri, taşıma ve inşa giderleri olarak sıralanabilir. PV sistemin büyüklüğüne göre adı geçen giderlerin ağırlıkları değişmektedir. Güneş takip mekanizmalarının varlığı ve eksen sayıları gibi bir çok değişken sistem maliyetini değiştirmektedir.

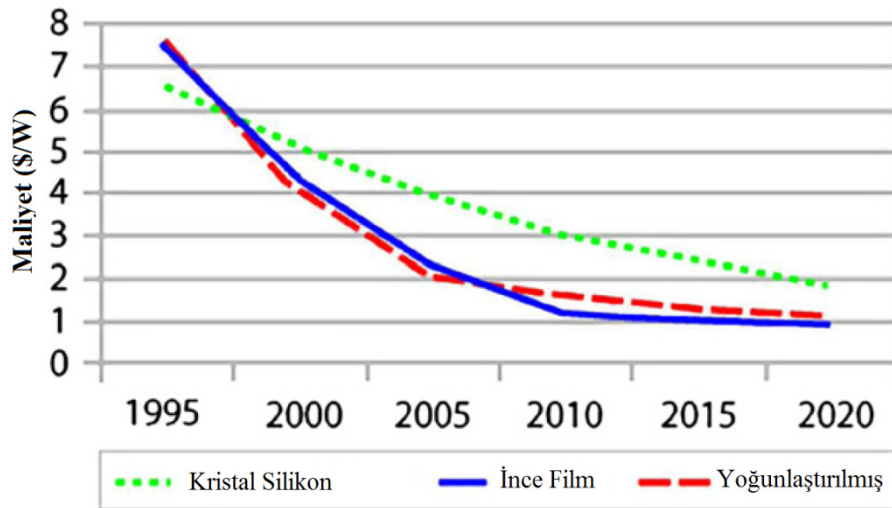
1997 yılında yapılan bir çalışmada 15 kWh/gün (güneşlenme süresi dikkate alındığında kurulu gücün yaklaşık 2kW olduğu çıkarımı yapılabilir) için kurulmuş bir sistemin bileşenlerin kurulum maliyet oranlarını şu şekilde verilmiştir: panel %57, akü %30, evirici%5, MPPT/doğrultucu %2 ve diğer giderler % 6 olarak verilmiştir [Enslin ve ark., 1997].



Şekil 3.3. Farklı PV uygulamaları için birim güç başına maliyet

Şekil 3.3'de verilen ve 2012 yılında Amerika'da müstakil konut çatısı üzerine kurulan 5 kW DA gücüne sahip PV sistem kurulum maliyet oranları için yapılan ayrıntılı bir

çalışmada panel maliyet oranının %38, eviricinin %7 ve diğer giderlerin ise %55 olduğu ayrıca \$5.71/W birim fiyatında olduğu rapor edilmiştir [Goodrich ve ark., 2012]. Aynı çalışmada 217 kW güce sahip ticari çatı tipi sistem için maliyet oranları panel için %45, evirici için %8 olduğu birim fiyatın ise \$4,59/W olduğu bildirilmiştir. Bu kıyaslamadan anlaşılacağı üzere panel fiyatları hızla düşme eğiliminde ve güç arttıkça kurulum maliyetinin düştüğü söylenebilir. PV paneller kurulum maliyetinin en büyük bileşenidir. PV yapılar yaygınlaştıkça panel maliyetleri de düşmekte bunun sonucu olarak daha ekonomik olmaktadır. Ancak diğer bileşenlerin maliyetlerinde hızlı bir düşüş beklenmemektedir.

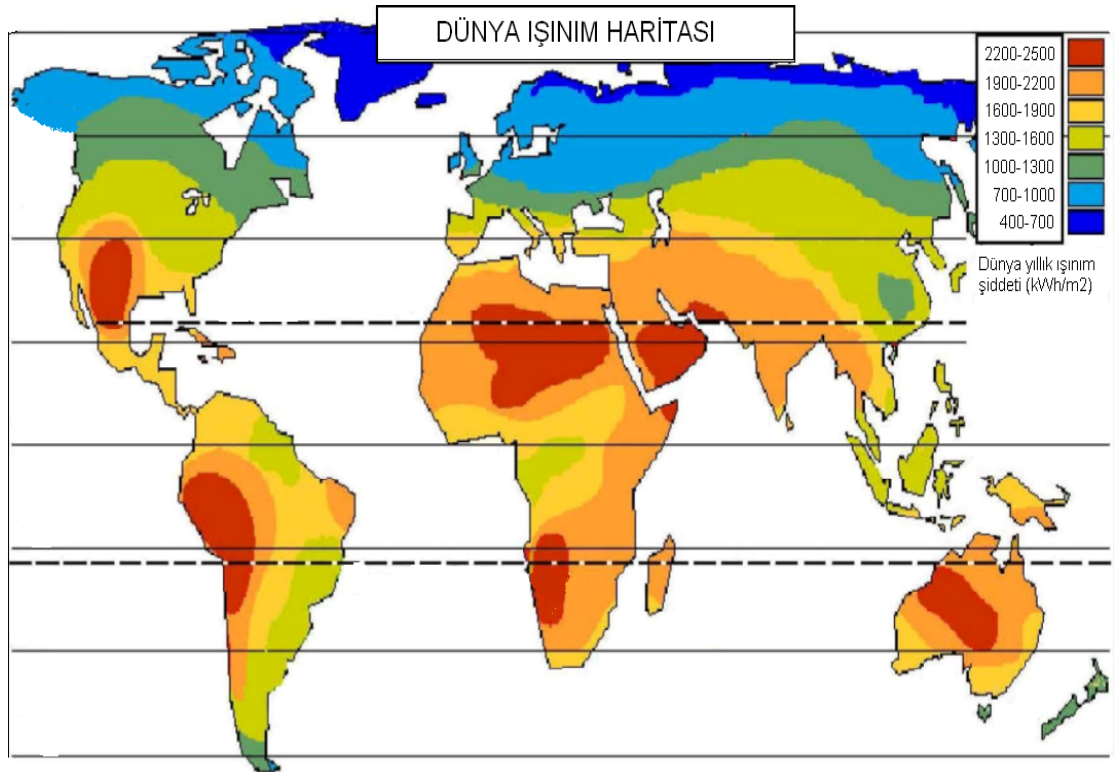


Şekil 3.4. PV yapı maliyetinin yıllara göre değişimi

Şekil 3.4’de PV panel fiyatlarının \$/W cinsinden yıllara göre değişimi ve gelecek yıllardaki tahmini maliyetini veren grafik verilmiştir [Tyagi ve ark., 2013]. Buradan hareketle PV sistemlerin yakın gelecekte enerji ihtiyacına oldukça ekonomik çözümler getireceği söylenebilir. Türkiye’deki güneşten elde edilen enerjinin birim maliyeti ise kullanılan teknoloji, ışınlam şiddeti, güneşlenme süresi ve PV hücre cinsine göre 0,15-0,29 \$/kWh arasında değişmektedir [EİE, 2012].

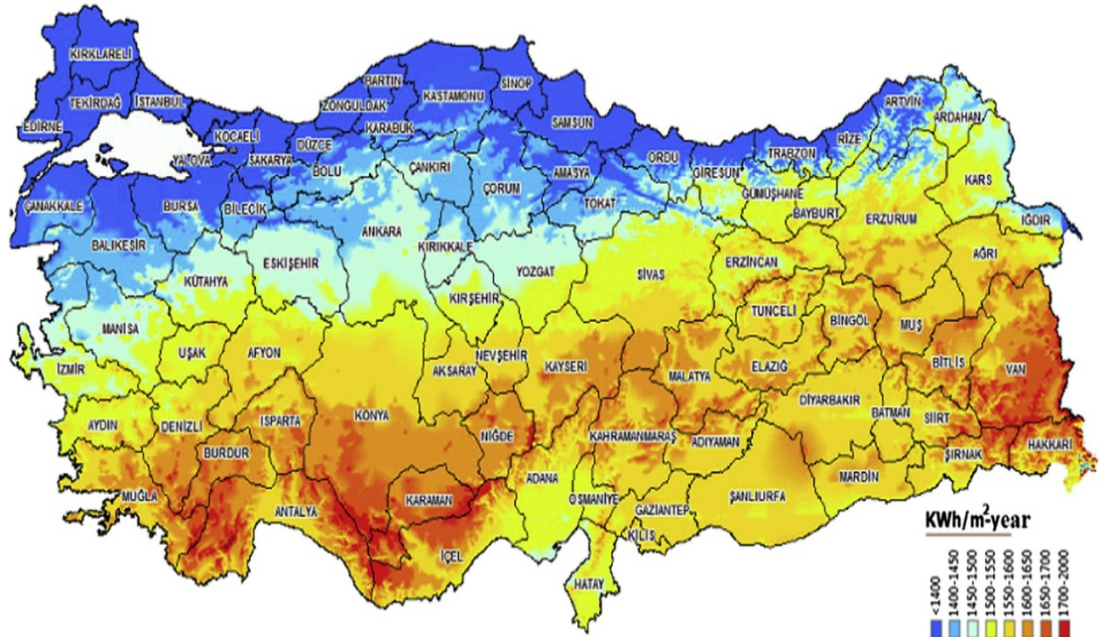
3.4. Işınım Şiddeti

PV sistemler güneşten aldıkları enerjiyi verimleri oranında elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu yüzden PV sistemlerinin ışıınım şiddeti ve güneşlenme sürelerinin yüksek olduğu alanlarda daha verimli ve kullanışlı olmaktadır. Işınım şiddeti pironometre ile ölçülmektedir. Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha elverişlidir. Şekil 3.5’de dünya yıllık ışıınım şiddetini gösteren harita verilmiştir [İnternet, 2013].



Şekil 3.5. Dünya güneşlenme haritası

Şekil 3.6’da Türkiye’nin metrekareye düşen yıllık ışıınım miktarını gösteren harita verilmiştir [Benli, 2013]. Haritadan görüleceği üzere özellikle güney, güneybatı ve güneydoğu bölgeleri PV sistemler için oldukça elverişlidir.



Şekil 3.6. Türkiye güneşlenme haritası

DMİ'nin 1966-1982 yılları arasında yaptığı güneşlenme süresi ve ışınlım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınlım şiddeti de 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olarak tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir [EİE, 2012].

Çizelge 3.1. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli

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

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir.

Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı Çizelge 3.2'de verilmiştir. Ancak, bu değerlerin, Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. 1992 yılından bu yana EİE ve DMİ, güneş enerjisi değerlerinin daha sağlıklı olarak ölçülmesi amacıyla enerji amaçlı güneş enerjisi ölçümleri almaktadırlar. Devam etmekte olan ölçüm çalışmalarının sonucunda, Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin eski değerlerden %20-25 daha fazla çıkması beklenmektedir [EİE, 2012].

Çizelge 3.2. Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı

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

EİE'nin ölçüm yaptığı 8 istasyondan alınan yeni ölçümler ve DMI verileri yardımı ile illere ait güneş enerjisi ve güneşlenme süreleri değerleri hesaplanarak bir kitapçık halinde basılmıştır [EİE, 2012].

3.5. PV Sistem Kullanım Alanları ve Türkiye'deki Durum

PV sistem çıkışı elektrik enerjisi olduğundan elektrikle çalışan uygun güçteki her türlü alıcılarla çalışabilir. Güneş pilleri, halen elektrik şebekesinin olmadığı, yerleşim merkezlerinden uzak yerlerde ekonomik yönden uygun olarak kullanılabilir. Genelde otoyol aydınlatma, otoyol sinyalizasyon, park bahçe aydınlatma, uzay uygulamaları, su pompalama, ev ve küçük işyerleri tipi sistemlerde kullanılmaktadır. Genel olarak gün boyunca alıcıları besleyerek ihtiyaç fazlası enerjiyi akülerinde depolayarak gerektiğinde alıcı sisteme aktaracak şekilde tasarlanırlar. Şebeke ile paralel çalışan ve şebekeye enerji gönderebilen sistemler son yıllarda önem kazanmış ve geniş uygulama alanı bulmuştur.

Bahsi geçen uygulamalar dışında otomobil, sera ısıtma gibi çeşitli uygulamalarda da çalışmalar yapılmaktadır.

Güneş enerjisi araştırma ve geliştirme konularında EİE'nin yanında Tübitak Marmara Araştırma Merkezi ile üniversitelerde çalışmalar yapmaktadır. Yine araştırma amacıyla Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde şebeke etkileşimli çalışabilen 2,59 kW gücünde PV sistem kurulmuştur.

Güneş enerjisi verilerinin ölçülmesi konusunda Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü faaliyet göstermektedir. EİE 1991 yılından bu yana kendi güneş enerjisi gözlem istasyonlarını kurmaktadır.

Güneş enerjisi ile ilgili standartlar hazırlanması konusunda Türk Standartları Enstitüsü;

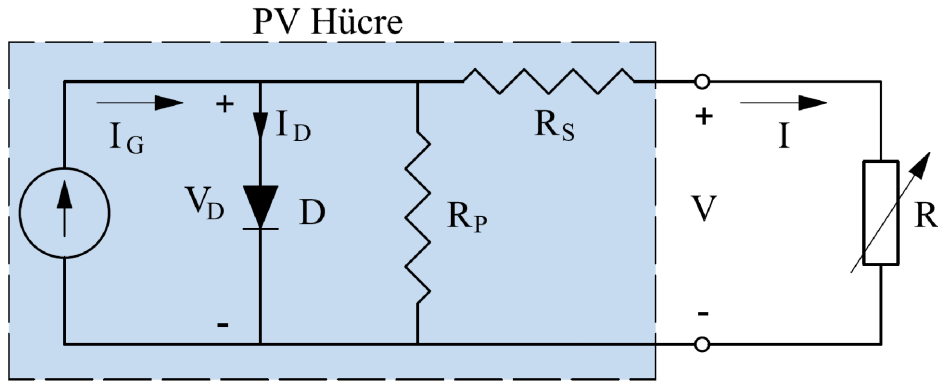
- TS 3680-Güneş Enerjisi Toplayıcıları-Düz
- TS 3817-Güneş Enerjisi Su Isıtma Sistemlerinin Yapım, Tesis ve İşletme Kuralları

konulu standartları hazırlamıştır. Ancak bu standartlar termal sistemlere yöneliktir.

3.6. PV Hücre Elektriksel Modeli

Güneş pilleri P ve N yarı iletkenlerinin ince bir katman haline getirilerek birleştirilmesinden oluşur. Karanlıkta PV hücre çıkış $I-V$ karakteristiği diyot karakteristiğine çok benzer. Işığa maruz kaldığında fotonlar sayesinde elektron hareketi dolayısı ile akım sağlanır. PV panel kısa devre edildiğinde bu akım harici yük üzerinden, açık devre halinde bırakıldığında ise bu akım karakteristik P-N bileşimli diyot üzerinden devresini tamamlar [Walker, 2001].

Güneş pilleri Şekil 3.7'deki gibi bir akım kaynağı, akım kaynağına paralel bağlı direnç ve diyot, oluşan yapıya seri bağlı bir direnç ile ifade edilirler [Mineiro, 2004].



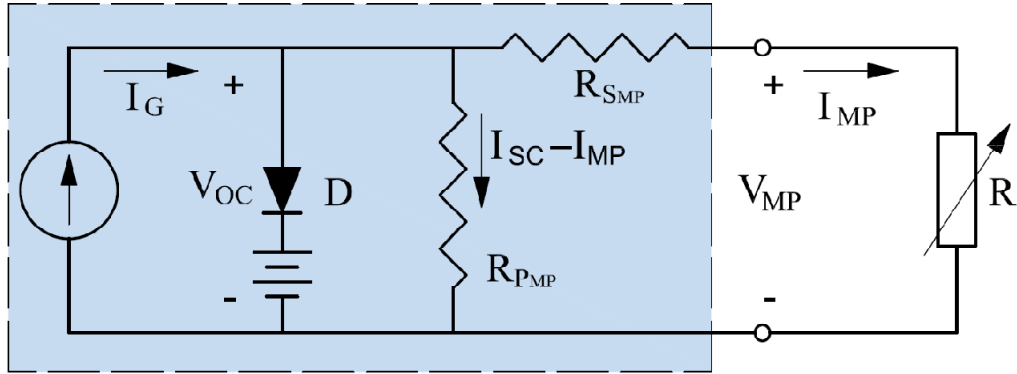
Şekil 3.7. Güneş pili elektriksel eşdeğer modeli

Ayrıca devre matematiksel modeli Eş. 3.1 ile ifade edilebilir.

$$I = I_G - I_0 \left(e^{\frac{q}{A k T} (V + I R_S)} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (3.1)$$

Burada I PV çıkış akımı (A), I_G ışınım tarafından üretilen akım (A), I_0 karanlık akımı yada ters tıkama akımı (A), A idealleştirme katsayısı, q $1,6 \times 10^{-19}$ C, k Boltzmann's sabiti (8.65×10^{-5} eV/K ve T hücre sıcaklığı (K) değerlerini belirtmektedir.

R_S direnci çok küçük bir dirençtir. R_P direnci ise büyük değerdedir. Bu direnç değerlerini en yüksek güç noktası (MPP) için hesaplamak mümkündür. Bu işlemi yapabilmek için Şekil 3.8'deki modül eşdeğer devresinden yararlanılır. Üretici firmadan alınan bilgi yaprakları değerleri modül eşdeğer devresinde kullanılarak yapı değişkenleri bulunur [Mineiro, 2004].



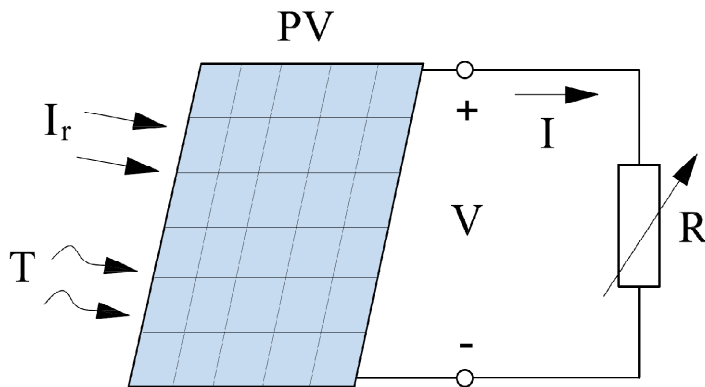
Şekil 3.8. En yüksek güç noktasındaki eşdeğer devre modeli

Eşdeğer devreden hareketle R_{PM} ve R_{SM} değerleri Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 yardımı ile bulunabilir.

$$R_{SMP} = \frac{V_{OC} - V_{MP}}{I_{MP}} \quad (3.2)$$

$$R_{PMP} = \frac{V_{OC}}{I_{SC} - I_{MP}} \quad (3.3)$$

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'deki PV modeli ışıınım ve sıcaklık için yeniden düzenlenirse Şekil 3.9 elde edilir.



Şekil 3.9. PV devre modeli

Şekil 3.9’da verilen devre modelinde panel çıkış gerilimi V için Eş. 3.4 yazılabilir.

$$V(I, T, I_r) = \frac{\frac{V_{oc}(T, I_r) \cdot \ln\left(2 - \left(\frac{I}{I_{sc}(T, I_r)}\right)^{N(T, I_r)}\right)}{\ln(2)} - (R_s(T, I_r) \cdot (I - I_{sc}(T, I_r)))}{1 + \frac{R_s(T, I_r) \cdot I_{sc}(T, I_r)}{V_{oc}(T, I_r)}} \quad (3.4)$$

Eş. 3.4 içerisinde geçen $R_s(T, I_r)$, $N(T, I_r)$ ve $\alpha(T, I_r)$ ifadeleri sırası ile Eş. 3.5, Eş. 3.6 ve Eş. 3.7’de verilmiştir.

$$R_s(T, I_r) = \frac{V_{oc}(T, I_r) - V_{MP}(T, I_r)}{I_{MP}(T, I_r)}, \quad (3.5)$$

$$N(T, I_r) = \frac{\ln(2 - 2^{\alpha(T, I_r)})}{\ln\left(\frac{I_{MP}(T, I_r)}{I_{sc}(T, I_r)}\right)}, \quad (3.6)$$

$$\alpha(T, I_r) = \frac{V_{MP}(T, I_r) \cdot \left(1 + \frac{R_s(T, I_r) \cdot I_{sc}(T, I_r)}{V_{oc}(T, I_r)}\right) + R_s(T, I_r) \cdot (I_{MP}(T, I_r) - I_{sc}(T, I_r))}{V_{oc}(T, I_r)} \quad (3.7)$$

Işınım şiddeti doğrudan PV panel çıkış akımı ile orantılıdır. Panel çalışma sıcaklığı da hem panel çıkış gerilimi hem de panel çıkış akımı ile ilişkilidir. Sıcaklık ve ışınım etkisi Eş. 3.8-11 deki gibi hesaplanabilir:

$$V_{oc}(T) = V'_{oc} \cdot [1 + C_V \cdot (T - T_{ref})] \quad (3.8)$$

$$I_{sc}(T, I_r) = I'_{sc} \cdot [1 + C_I \cdot (T - T_{ref})] \cdot \frac{I_r}{I_{rref}} \quad (3.9)$$

$$V_{MP}(T) = V'_{MP} \cdot [1 + C_V \cdot (T - T_{ref})] \quad (3.10)$$

$$I_{MP}(T, I_r) = I'_{MP} \cdot [1 + C_I \cdot (T - T_{ref})] \cdot \frac{I_r}{I_{rref}} \quad (3.11)$$

Burada V'_{OC} , I'_{SC} , V'_{MP} ve I'_{MP} değerleri $T = T_{ref}$ ve $I_{ref} = I_{ref}$ 'deki panel akım ve gerilimleridir. Ayrıca T sıcaklık, T_{ref} üretici bilgi yaprağında verilen sıcaklık, I_r ışıınım şiddeti, I_{ref} üretici bilgi yaprağında verilen ışıınım şiddeti, $V_{OC}(T)$ panel açık devre gerilimi, $I_{SC}(T, I_r)$ panel kısa devre akımı, $V_{MP}(T)$ panelin MPP'deki gerilimi, $I_{MP}(T, I_r)$ panelin MPP'deki akımını belirtmektedir. C_V değeri Eş. 3.12 ile C_I ise Eş. 3.13 ile ifade edilmektedir.

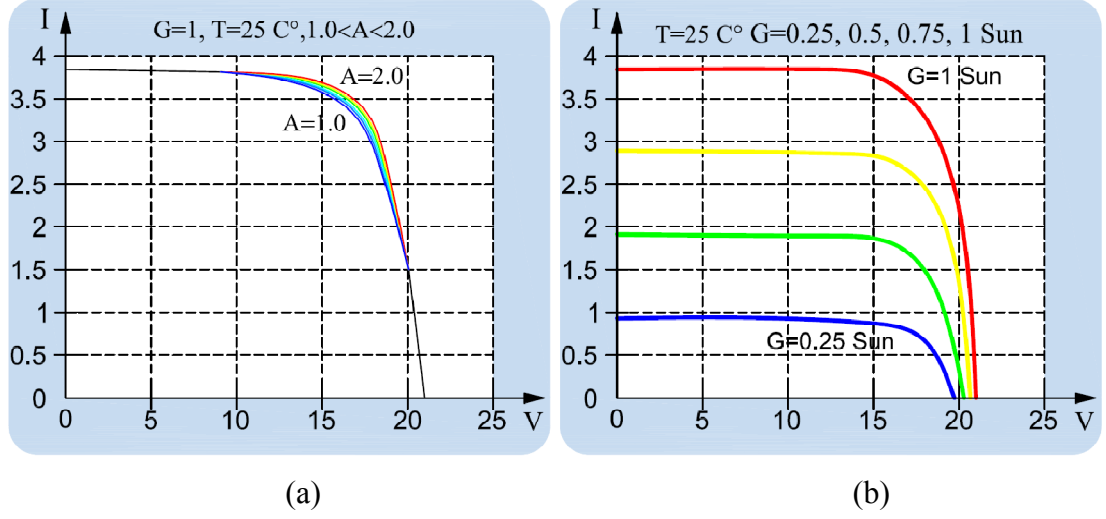
$$C_V = \frac{V'_{OC} \text{deki } \% \text{ değişim}}{\text{sıcaklıktaki } C^\circ \text{ değişimi}} \quad (3.12)$$

$$C_I = \frac{I'_{SC} \text{deki } \% \text{ değişim}}{\text{sıcaklıktaki } C^\circ \text{ değişimi}} \quad (3.13)$$

Eş. 3.12 ile PV panel üreticisi tarafından verilen gerilimin sıcaklıkla değişim katsayısını verilmektedir. Eş. 3.13 ise yine üretici tarafından verilen akımın sıcaklıkla değişim katsayısını vermektedir [Magna, 2009].

3.7. PV Panel Akım Gerilim Karakteristiği

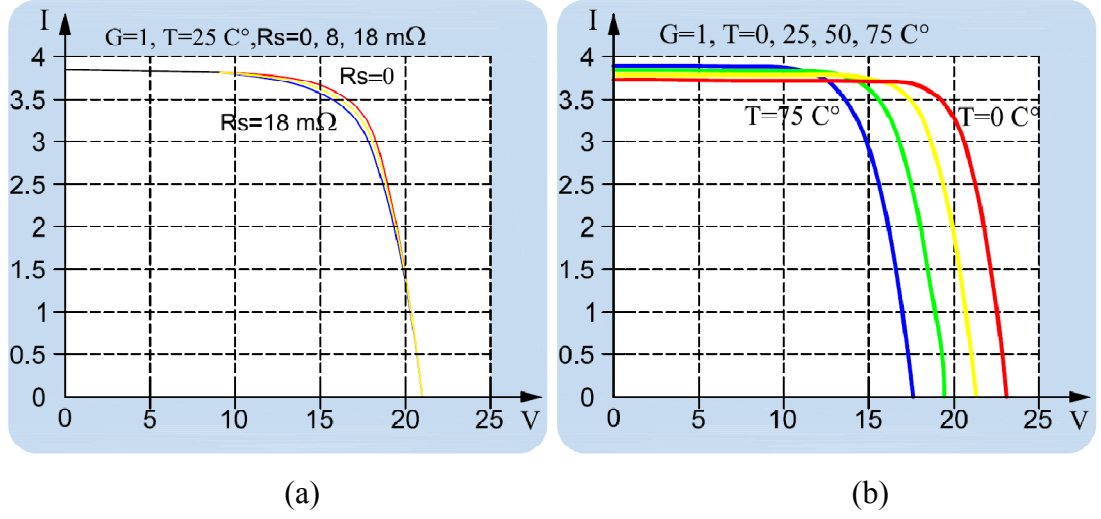
PV panel üreticileri modüle ait değerleri $25^\circ C$ ve güneş ışıınım şiddeti 1000 W/m^2 iken yapılan testler sonucunda oluşturmaktadırlar. Bu şartlar altında modül açık devre gerilimi (V_{OC}), kısa devre akımı (I_{SC}), MPP akımı (I_{MPP}) ve MPP gerilimi (V_{MPP}) değerleri alınarak modül bilgi yaprakları oluşturulur. PV panellerin çıkış özelliği üretim tekniği, ışıınım, sıcaklık, beslediği yük gibi değişkenlerden etkilenir. Ticari bir ürün olan MX60 modeli PV panelin ışıınım, sıcaklık v.b. gibi değişkenlere göre PV çıkış gücünün değişimini veren bilgisayar ortamında hazırlanmış bir dizi grafik verilmiştir [Walker, 2001].



Şekil 3.10. PV çıkış değerlerinin ışınlm ve kalite faktörüne göre değişimi
 a) Kalite faktörüne göre PV akım ve gerilimin değişimi
 b) Işınım şiddetine göre PV akım ve gerilimin değişimi

Şekil 3.10 a'da 'da verilen panelin yapı maddesi ile ilgili olan kalite faktörüdür. Kalite faktörü büyüdükçe panelin verebileceği güç miktarı da artmaktadır. Şekil 3.10 b'de ise ışınlm şiddeti ile çıkış parametrelerinin değişimi görölmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere ışınlm şiddeti arttıkça panel çıkış akımı artmakta panel geriliminin artışı ise sınırlı oranda artmaktadır.

Şekil 3.11 a'da panel seri direncinin çıkış akımı ve gerilimi üzerine etkisi görölmektedir. Doğal olarak seri direnç arttıkça çıkış akımı ve geriliminde azalma görölmektedir.



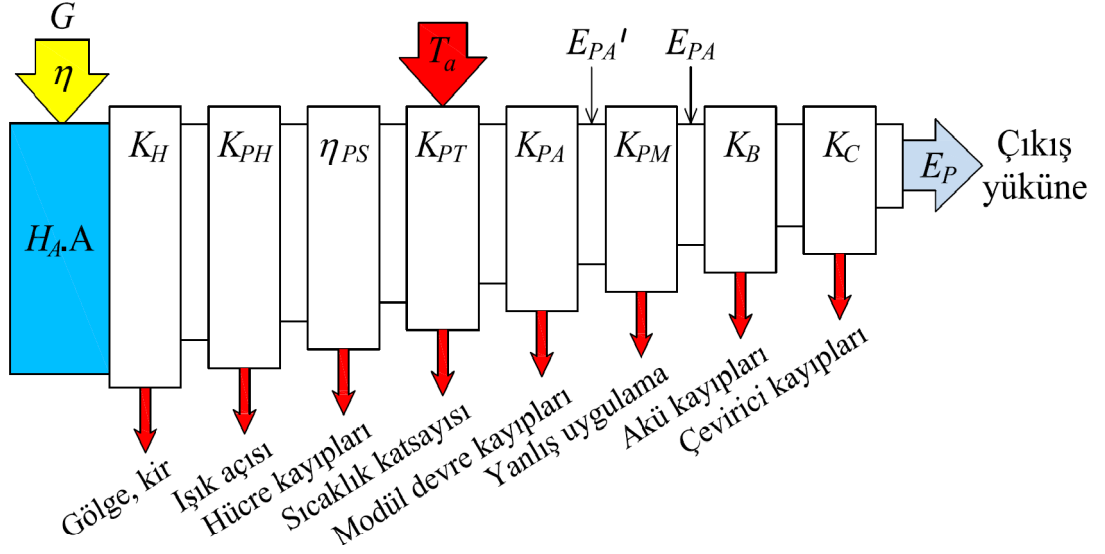
Şekil 3.11. PV çıkış değerlerinin iç direnç ve sıcaklıkla değişimi
a) R_s direncine göre PV akım ve gerilimin değişimi.
b) Sıcaklığa göre PV akım ve gerilimin değişimi.

Şekil 3.11 b’de ise sıcaklığın çıkış akımı ve gerilimi üzerinde etkisi görülmektedir. Şekil 3.10 a, Şekil 3.10 b ve Şekil 3.11 a’da akım ve gerilimin değişimi aynı yönlü iken Şekil 3.11 b’deki sıcaklık grafiğinde bu değişim farklı olmaktadır. Sıcaklık panel akımını artırıcı etki yaparken panel geriliminde düşmeye neden olmaktadır. Ancak gerilimdeki düşme akımdaki yükselmeden daha yüksek olduğundan sıcaklığın çıkış gücünü düşürücü etki yaptığını söylemek mümkündür.

3.8. PV Sistem Verimini Etkileyen Faktörler

Güneş ışığını elektrik enerjisine çevirirken verimi etkileyen birçok etken vardır. Bu etkenlerden bir kısmı iyileştirilebilse de (örneğin panel açısı, kirlenme) modül özelliğine bağlı olanlar değiştirilemez.

Güneşten alınan enerjinin PV çıkışına iletilmesi esnasında meydana gelen kayıpları Şekil 3.12’de gösterilmiştir [Kurokawa, 1998].



Şekil 3.12. PV modül değişkenlerinin çıkışa etkisi

Şekil 3.12'de G ile gelen ışıının şiddeti η panel verimi ile çarpılarak H_A panel gücü elde edilir. Panel gücü ile panel alanı A 'nın çarpımı K_H gücü elde edilir. Bu güç kirlenme ve gölgelenmelerden meydana gelen kayıpların çıkarılması ile K_{PH} 'a dönüşür. K_{PH} gücü güneşe gelen ışığın dik açı yaptığı andaki güçtür. Bu güç ışık açısının gerek panelin yerleşiminden gerekse güneşin mevsimsel ve günlük yer değişim etkilerinden meydana gelen kayıplar çıkarılıp η_{PS} hücre içyapısından meydana gelen kayıplar düşüldüğünde K_{PT} gücü elde edilir. Güneş panelinin çıkış parametreleri sıcaklıktan etkilenmektedir. K_{PT} gücü T_A sıcaklık değerinden gelen etki ile biraz daha küçülerek K_{PA} gücüne dönüşmektedir. Bu güç kablolamada meydana gelen I^2R kayıpları düşüldüğünde K_{PM} gücüne dönüşür ki bu kullanıcının karşısına çıkan güçtür. K_{PM} gücü yüke aktarılırken panel verim eğrisine (MP eğrisi) dikkat edilmeden aktarılmaya çalışıldığında bu güçten yeteri kadar faydalanılamamaktadır. Ayrıca bu gücün depolanması ve evirici ya da DA/DA çeviriciden geçirilmesi sonucunda da bir miktar güç kaybı meydana gelir ve en son çıkış gücü olan E_P elde edilmiş olur.

3.9. PV Modül Performansının Yıllara Göre Değişimi

PV sistemler temiz, sessiz, bakım gerektirmeyen, sistemler olarak bilinmektedir. Ancak kurulum maliyetlerinin yüksekliği ve yıllara göre performanslarında meydana gelen düşmeler olumsuz etkileri olarak sayılabilir.

Çizelge 3.3. PV modül değişkenlerinin yıllara göre yaşlanma etkisi ile değişimi

Değişken	1990		2001		% Değişim
	Ana değer	Stand.sap.	Ana değer	Stand.sap.	
P_{MAX} (W)	39,88	0,849	38,13	1,67	-4,39
V_{OC} (V)	18,19	0,131	18,15	0,108	-0,22
I_{SC} (A)	3,29	0,044	3,08	0,120	-6,38
R_S (Ohms)	0,347	0,115	0,384	0,184	10,66
R_P (Ohms)	171	39,2	115	48,7	-32,75
ekt (V^{-1})	0,709	0,125	0,896	0,26	26,38
V_{MPP} (V)	13,9	0,20	14,2	0,33	2,16
I_{MPP} (A)	2,88	0,033	2,69	0,111	-6,60

Yapılan araştırmalar PV modül verimi ve öz değerlerinde meydana gelen değişimin modül gücünü düşürdüğünü göstermektedir. Çizelge 3.3'de 1990 ve 2001 yılları arasında yapılan bir çalışmanın sonucu görülmektedir [Reis ve ark., 2002]. Çizelge incelendiğinde panel değerlerinde meydana gelen değişimler sonucunda 11 yıllık periyot sonunda panel gücünde %4,39 oranında bir azalma olduğu görülmektedir.

Yapılan başka bir çalışmada ise 1990 ve 2010 yılları arasında çoklu kristal modül yapısı üzerinde bu etkiler incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucuna göre 20 yıllık süre sonunda yaşlanma etkisiyle panel güçlerinde %4,84'lük bir düşüş olduğu yıllık bozulma miktarının ise %0,24 olduğu rapor edilmiştir [Polverini ve ark., 2012].

4. EVİRİCİLER

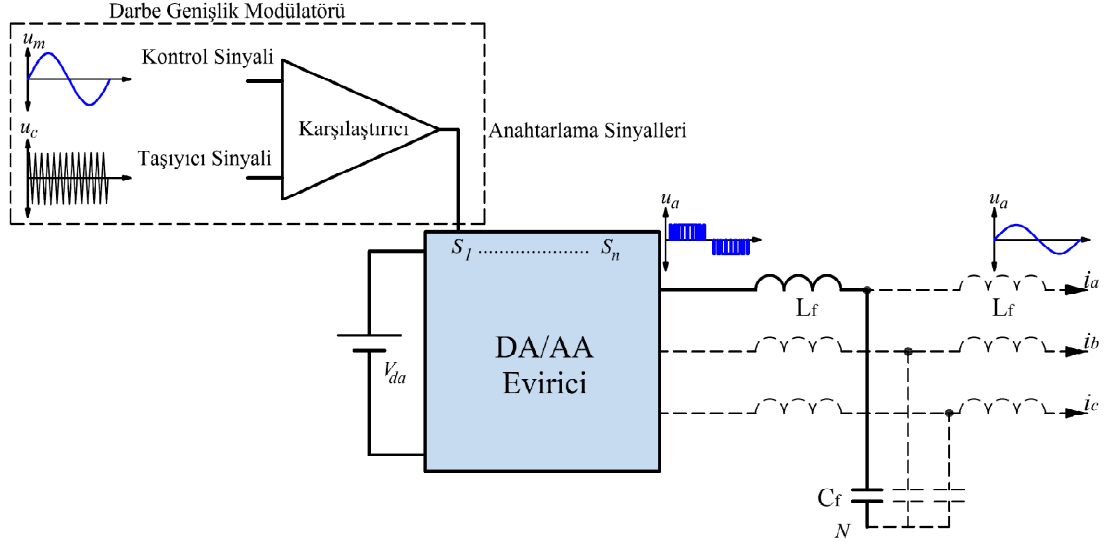
DA elektrik enerjisini AA elektrik enerjisine dönüştüren çeviricilere evirici de denilmektedir. Eviriciler sabit veya değişken DA giriş gerilimini genliği ve frekansı isteğe bağlı olarak sabit (Constant Voltage Constant Frequency -CVCF) ya da değişken (Variable Voltage Variable Frequency-VVVF) yapılabilen AA çıkış gerilimine çevirmektedir. Çıkış AA geriliminin seviyesi giriş DA gerilim seviyesinin ayarlanmasıyla yapılabilir. Ancak giriş gerilimi sabitse ya da denetlenemiyorsa evirici çıkış gerilimi evirici kazancının değiştirilmesi ile denetlenerek ayarlanabilir. Bu denetim işlemi darbe genişlik modülasyonu (DGM) (Pulse Width Modulation - PWM) olarak adlandırılır [Mohan ve ark., 1995; Rashid, 2006; Skvarenina, 2002]. Şebeke gerilimine benzer olarak evirici çıkış geriliminin sinüzoidal olması istenir. Uygulamada ise evirici çıkış gerilimleri sinüs dalga formundan biraz uzaktadırlar ve bir miktar harmonik içerirler. Anahtarlama teknikleri ile bu harmonik etkileri azaltılabilmektedir.

Uygulamada çeşitli evirici yapıları görmek mümkündür. En yaygın kullanım alanları motor sürücüler, kesintisiz güç kaynakları ve şebekeye enerji aktaran sistemlerdir.

4.1. Evirici Çıkış Frekansı ve Geriliminin Denetimi

Sinüzoidal çıkış gerilimi/akımı verebilen ve frekansı ayarlanabilen bir eviricinin blok diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi DA güç kaynağından gelen DA gerilim/akım denetim sinyalinden gelen işarete göre DGM sayesinde evirici ile kıyılarak çıkışta bir AA sinyale dönüştürülmektedir. Burada u_m ile gösterilen sinyal çıkışta olması istenen sinyalin bir örneğini oluşturmaktadır. u_m belirli bir frekansta ve genlikte verildiğinde DGM evirici u_c taşıyıcı sinyali sayesinde DA gerilimi/akımı geri beslemeden gelen sinyali de dikkate alarak işleyerek istenilen genlik ve frekansta AA'ya dönüştürür. Buradaki u_c taşıyıcı sinyalinin frekansı

anahtarlama frekansını vermektedir. Evirici çıkışında görülen LC ya da LCL çıkış filtresi çıkıştaki yüksek frekanslı bileşenleri süzme görevini üstlenir.



Şekil 4.1. Bir fazlı sinüzoidal DGM evirici

Eviriciye uygulanan S_{1-n} anahtarlama sinyallerinin üretimi için farklı teknikler geliştirilmiştir.

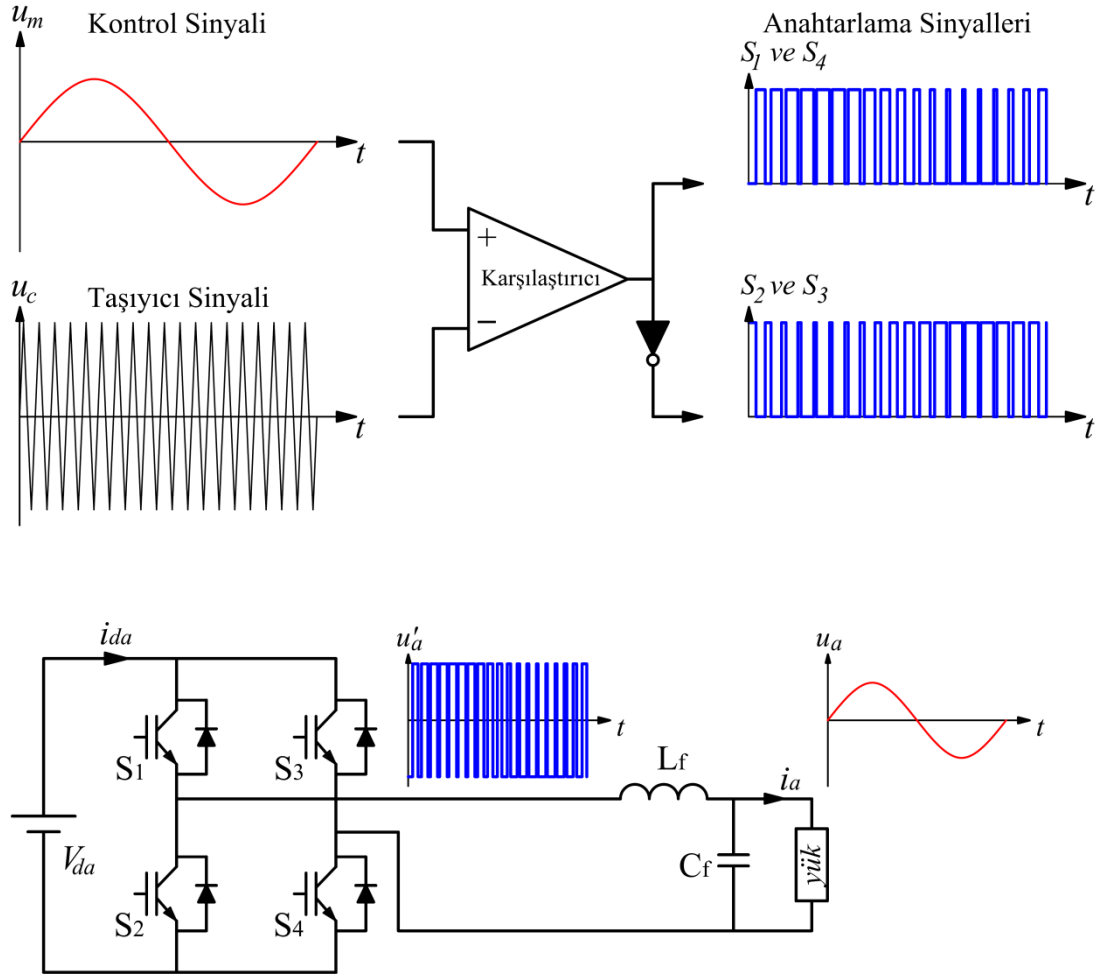
4.2. Eviricilerde DGM Üretimi

Eviricilerin denetiminde kullanılan farklı yapıda anahtarlama teknikleri bulunmaktadır. Bunlardan en çok bilinenleri;

- Sinüzoidal DGM,
- Uzay vektörü DGM,
- Histerisiz band denetim,
- Altı adım denetim,

olarak sıralamak mümkündür. Bunun yanı sıra farklı teknikler de mevcuttur. Ancak her DGM üretim yöntemi her eviriciye uygulanamamaktadır.

Sinüzoidal DGM en bilinen DGM yöntemlerinden biridir. Çift kutuplu DGM (bipolar PWM) ve tek kutuplu DGM (unipolar PWM) üretimi olmak üzere iki farklı yapıda uygulamaları bulunmaktadır. Şekil 4.2'de çift kutuplu DGM üretimi ve bir fazlı tam dalga eviriciye uygulanışı gösterilmiştir.

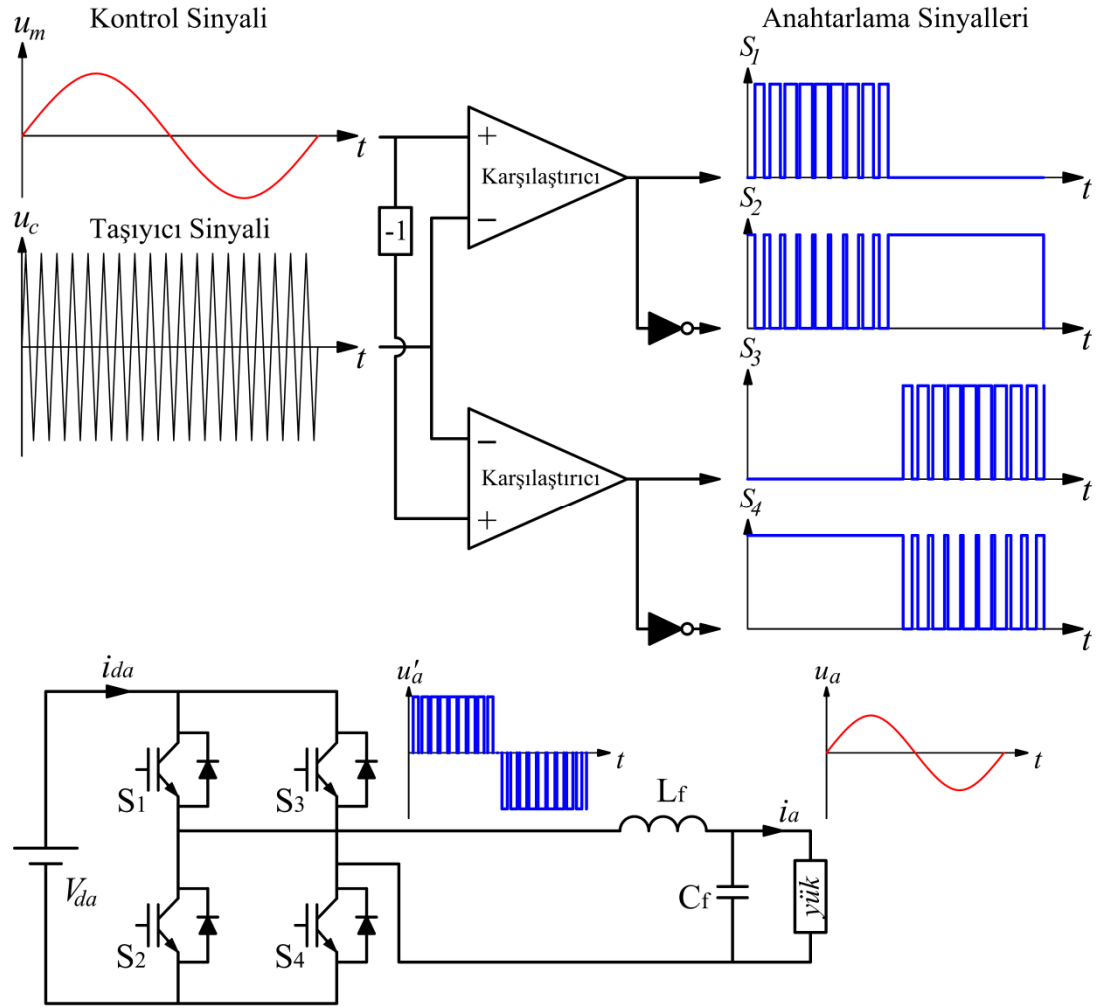


Şekil 4.2. Çift kutuplu DGM üretimi

Şekil 4.2'de anahtarlama sinyallerine bakıldığında IGBT'lerin her an anahtarladığı görülür. Bu yöntemin tek kutuplu DGM üretimine göre üstünlüğü sinüs kalitesinin

daha iyi oluşu ve anahtarlama sinyali üretiminin kolay olmasıdır. Ancak çift kutuplu DGM ile çalışan eviricilerin verimleri tek kutuplulara göre daha düşüktür.

Tek kutuplu DGM üretimi çift kutupludan farklı olarak birbirinin tersi iki denetim sinyali ve bir taşıyıcı sinyali ile üretilmesidir. Şekil 4.3'de tek kutuplu DGM üretimi ve bir fazlı tam dalga eviriciye uygulanışı gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Tek kutuplu DGM üretimi

Bu yöntemle yapılan eviricilerin verimi çift kutuplulara göre daha yüksek olmasına karşın DGM sinyallerinin üretimi zor ve evirici çıkış geriliminin sıfır geçiş noktalarında kırılmalar görülür. Bunun sonucunda ise sinüs kalitesi bozulabilir.

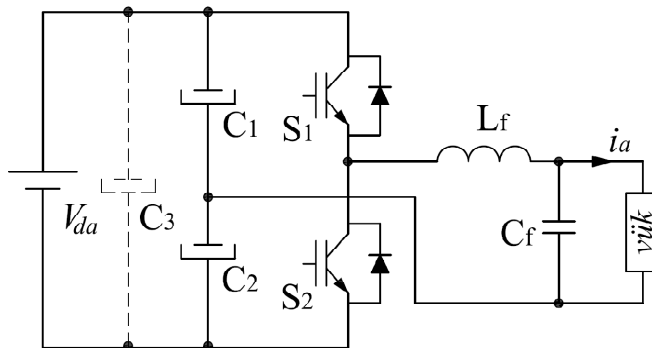
4.3. Faz Sayılarına Göre Evirici Yapıları

Eviriciler bir fazlı ya da çok fazlı olarak da tasarlanabilmektedir. Çok fazlı eviriciler genellikle üç fazlı olarak tasarlanmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre de eviriciler faz sayılarına göre;

- Bir fazlı eviriciler,
- Üç fazlı eviriciler olarak iki gruba ayrılabilir.

4.3.1. Bir fazlı eviriciler

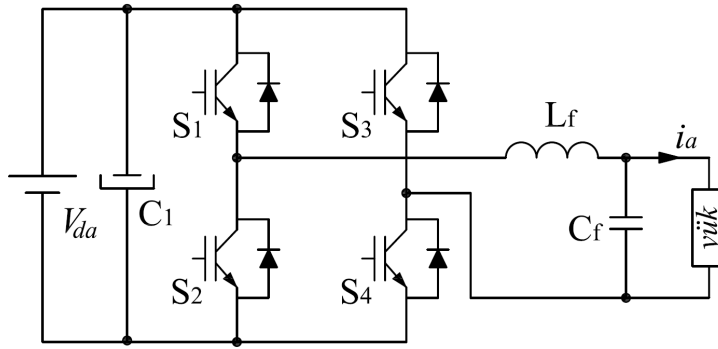
Bir fazlı eviriciler yarım köprü eviriciler ve tam köprü eviriciler olmak üzere iki farklı uygulamasını görmek mümkündür. Bunların yanında farklı itme-çekme (push-pull) evirici gibi düşük güçlerde farklı uygulamaları da görmek mümkündür. Şekil 4.4'de şeması görülen bir fazlı yarım köprü transformatörsüz eviricide giriş V_{da} gerilimi, evirici girişinde bulunan ve DA baraya bağlı kondansatörler vasıtası ile ikiye bölünür.



Şekil 4.4. Yarım köprü evirici

Anahtar ve dolayısıyla sürücü sayısının az olması sebebi ile tercih edilse dahi giriş geriliminin bölünmesi için gereken kondansatör gereksinimi ile DA baranın yüksek olma gerekliliği olumsuzluklarındandır.

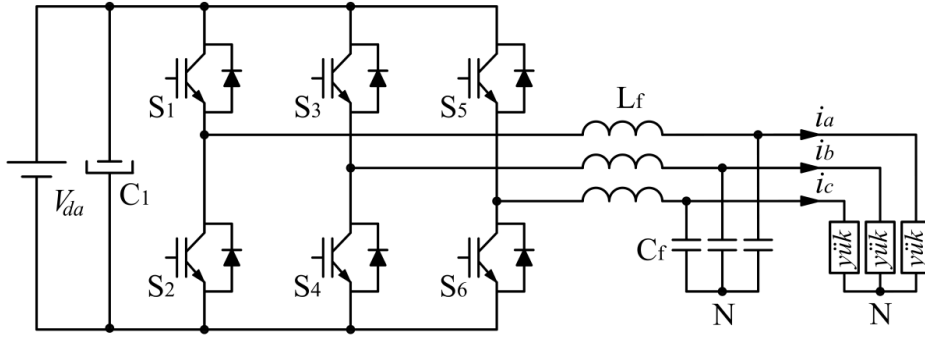
Şekil 4.5'te 1 fazlı tam köprü evirici şeması görülmektedir. Bu eviricilerde 4 adet anahtar kullanılmaktadır. Çıkış geriliminin en yüksek değeri aynı DA bara için yarım köprü eviricilerin iki katı kadardır.



Şekil 4.5. Tam köprü evirici

4.3.2. Üç fazlı eviriciler

Şekil 4.6'da üç fazlı evirici görülmektedir. Üç adet bir fazlı yarım köprü eviriciden oluşan eviricinin her bir yarım köprü kısmına evirici bir kolu ya da fazı denilmektedir. Aralarında 120'şer derece faz farkı olan üç denetim sinyali her bir evirici koluna verilir. Dolayısıyla evirici çıkış gerilimleri arasında 120'şer derece faz farkı oluşur.



Şekil 4.6. Üç fazlı evirici

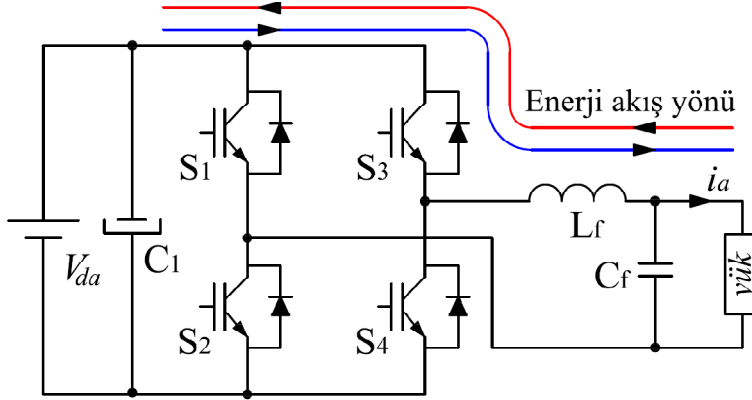
Eğer evirici lokal olarak çalıştırılacak ise yüklerin birleştiği nokta yapay nötr (N) noktasını oluştur. Eviricinin her fazından eşit güç çekildiğinde bu durum sorun oluşturmaz. Ancak Kesintisiz güç kaynağı gibi uygulamalarda dengeli yük koşulu her zaman sağlanamayacağından bu tip uygulamalarda şebekenin nötr noktası ile yapay nötr noktası birleştirilir.

4.4. Besleme Kaynağına Göre Evirici Yapıları

Eviriciler yapısal olarak;

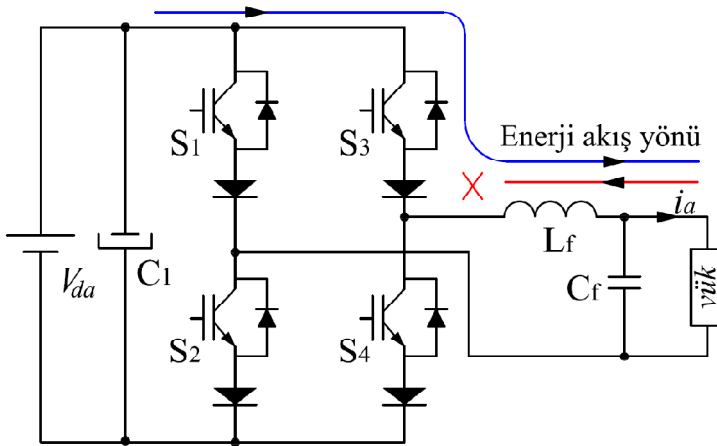
- Gerilim kaynaklı eviriciler (Voltage Source Inverter - VSI),
- Akım kaynaklı eviriciler (Current Source Inverter - CSI),

olarak iki gruba ayrılabilir. Bir fazlı ya da üç fazlı eviriciler gerilim kaynaklı ya da akım kaynaklı olarak tasarlanabilmektedir ve daha önce anlatılan evirici yapıları gerilim kaynaklı evirici yapısındadırlar. Dolayısıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilen evirici yapılarının hepsi birer gerilim kaynaklı evirici yapısıdır.



Şekil 4.7. Bir fazlı gerilim kaynaklı evirici

Gerilim kaynaklı eviricideki temel özellik enerji akışının kaynaktan yüke ya da yükten kaynağa akabilmesidir. Bu durum Şekil 4.7'de bir fazlı tam köprü evirici üzerinde açıklanmıştır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi evirici akımının yönü DA kaynaktan yüke doğru olabildiği gibi yükün kaynak gibi davrandığı durumlarda enerji IGBT üzerindeki ters dönüşüm diyotu üzerinden kaynağa geri dönebilmektedir. Şekil 4.8'de bir fazlı tam köprü akım kaynaklı evirici şeması verilmiştir. Burada gerilim kaynaklı eviriciden farklı olarak anahtarlara seri olarak bağlanan diyotlar bulunmaktadır. Bu ise enerjinin ters yönde akmasını engellemektedir.



Şekil 4.8. Bir fazlı akım kaynaklı evirici

CSI'ların uygulama alanları kısıtlı olmakla birlikte çok büyük güçlü motor sürücü uygulamaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

4.5. Seviye Sayılarına Göre Evirici Yapıları

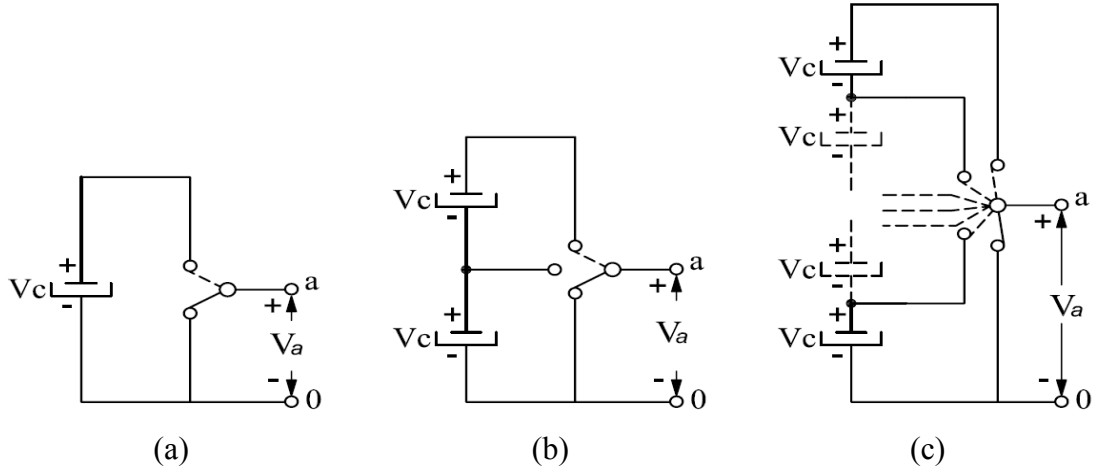
Eviriciler giriş DA gerilimine göre çıkışlarındaki filtre edilmemiş AA gerilimin alabileceği seviye sayılarına göre de sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmaya göre de eviriciler seviye sayılarına göre;

- İki seviyeli eviriciler (Two Level Inverter - TLI),
- Çok seviyeli eviriciler (Multi Level Inverter - MLI),

olarak iki gruba ayrılabilir. Çok seviyeli eviriciler $3, 5, 7, \dots, 2n+1$ seviyeli olabilmektedir. Çok seviyeli eviriciler farklı bir çalışma konusu olduğundan ayrı başlıkta incelenmiştir.

4.6. Çok Seviyeli Eviriciler

Geleneksel eviricilere göre daha fazla donanım içermesi önceleri bu tip eviricilerin gelişimine engel olmuşsa da yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ve güç anahtar maliyetlerindeki düşme ile uygulanmasının önündeki önemli bir engel ortadan kalkmıştır. Eviricideki seviye kavramı giriş DA seviyesine göre çıkış gerilimin alabileceği değerlerin sayısı olarak açıklanabilir. Dolayısıyla çıkış gerilimindeki seviye adedi iki ise iki seviyeli, üç ise üç seviyeli evirici benzer olarak n ise n seviyeli evirici olarak adlandırılmaktadır. Çıkış gerilim seviyelerinin artırılması için geleneksel eviricilerden daha fazla yarı iletken anahtar ve donanım gereksinimi doğmaktadır. Çıkış gerilimi seviyesi ile anahtarlama durumlarına ilişkin sembolik durum Şekil 4.9'da görülmektedir.



Şekil 4.9. Evirici bir kolu için çok seviye kavramının gösterilmesi
a) İki seviyeli evirici b) üç seviyeli evirici c) n seviyeli evirici

Buradan hareketle seviye sayısı arttıkça anahtar sayısının artması gerektiği anlaşılmaktadır. Bu yüzden birçok ticari orta gerilim güç uygulamalarında çoğunlukla üç seviyeli eviriciler kullanılmaktadır.

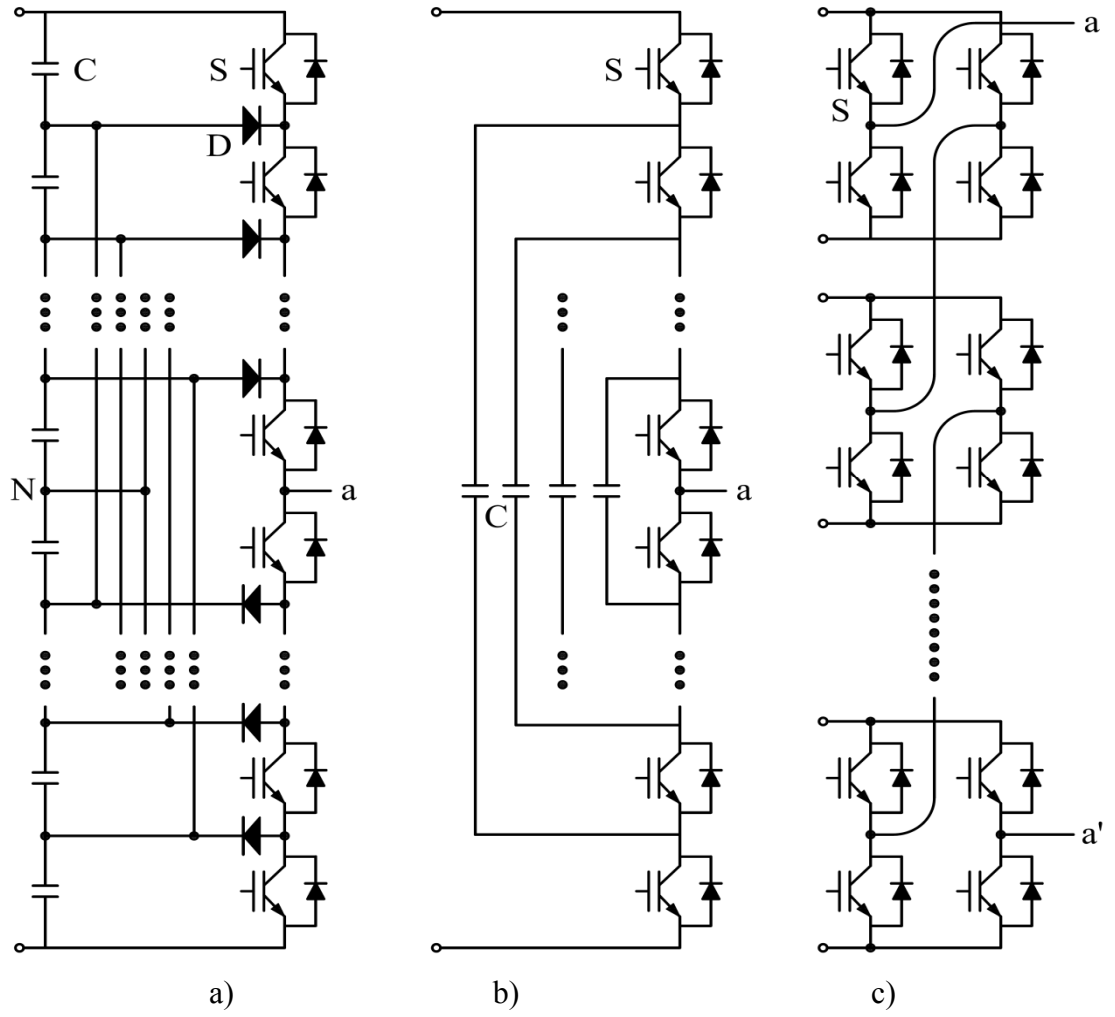
Çok seviyeli eviriciler iki seviyeli eviricilere göre, çıkış gerilim harmoniklerinin düşük olması, anahtarlama frekansının düşük olması, daha küçük anahtarlarla daha yüksek gerilimlere dolayısıyla güçlere erişimin kolaylaşması, aynı anahtarlama frekans değeri için daha küçük filtre gereksinimi, düşük dv/dt oranı gibi avantajları vardır. Ancak daha fazla donanım (anahtar, kondansatör, sürücü v.b) içermesi, sistemin daha karmaşık olması gibi olumsuzlukları da mevcuttur [Rodriguez ve ark., 2002; Dixon ve Morán, 2006; Nami ve ark., 2008; Suh ve ark., 1998; Lin ve ark., 2004]. Ayrıca düşük gerilim uygulamalarında da üç seviyeli topolojilerinin iki seviyeli eviricilere alternatif olabileceği, eleman sayıları, filtre boyutları, verimleri gibi değerler incelendiğinde orta ve yüksek frekans bölgesinde çalışmada üç seviyeli topolojilerin şebeke, sürücü, doğrultucu uygulamaları için daha ekonomik olabileceği belirtilmiştir [Teichmann ve Bernet, 2005; Teichmann ve ark., 2005]. Çok seviyeli eviriciler için;

- Çıkış gerilim çalışma aralığını genişletir.
- Daha düzgün akım ve gerilim dalga formu sağlar.
- Transformatörlü sistemlerde transformatör dönüştürme oranını küçültür ya da transformatör gereksinimini ortadan kaldırabilir.
- Güç anahtarları bozulduğunda akım ve gerilim kaynaklı zararları azaltır.
- Common-mode bozunumlarına karşı bağışıklığı daha iyidir.
- Daha küçük filtreye gereksinim duyar.
- dv/dt oranı düşüktür (daha küçük EMI) denilebilir.

Çok seviyeli evirici yapılarına uygun modüllerin hızla yaygınlaşması, farklı akım ve gerilim değerlerinde üretilebilmesi gelişimlerdeki ivmeyi hızlandırmıştır.

4.6.1. Çok seviyeli evirici çeşitleri

Uygulamada birçok sayıda çok seviyeli evirici topolojisi görmek mümkündür. Bu topolojiler tek ve çift yönlü enerji akışına izin verip vermediklerine ve faz sayılarına göre gruplandırılmıştır [Pandey ve ark., 2006]. Bunlardan en önemlileri, nötr noktası tutmalı (NPC), kaskat H köprü (CHB) evirici ve kapasitör tutmalı (FC) olarak sayılabilir [Calais ve ark., 1999; Dixon ve Morán, 2006; Suh ve ark., 1998; Calais ve ark., 2000]. Şekil 4.10'da bu yapılara ait devre şemaları görülmektedir.



Şekil 4.10. Çok seviyeli evirici topolojileri prensip şeması

a) Nötr noktası tutmalı b) Kapasitör tutmalı c) Kaskat H köprüsü

Nötr noktası tutmalı olan yapıda nötr noktası DC seviyeyi ikiye bölen kondansatörlerin orta noktasına bağlanır. Bu yüzden nötr noktası tutmalı diye adlandırılmaktadır. Bu yapının dezavantajı kondansatör üzerinde düşen gerilimlerin (V_{C1} ve V_{C2}) eşitlenememesi durumunda meydana gelen düzensizliklerdir. Kapasitör tutmalı yapı nötr noktası tutmalı yapıya çok benzer. Burada DC gerilim orta iki anahtara bağlanmış olan kapasitör yardımı ile bölünmektedir. Bu yapının dezavantajı ise aşırı büyük kapasite gereksinimi ile birlikte gelen boyutların büyümesidir. Kaskat H köprüsü yapısı, klasik iki seviyeli eviricinin seri bağlanmaları ile

oluşturulmaktadır. Ancak her bir iki seviyeli evirici yapısının bağımsız kaynaktan besleme gerekliliği izolasyon donanımlarını da beraberinde getirir [Pulikanti ve ark., 2010; Pulikanti ve ark., 2011]. PV uygulamalarında bağımsız kaynak probleminin daha az olması bu tip uygulamalarda kaskat H köprüsü yapısının kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır.

4.6.2. Çok seviyeli evirici eleman sayılarının karşılaştırılması

Şekil 4.10'da da görüldüğü üzere her birçok seviyeli evirici topolojisi farklı sayıda yarı iletken anahtar ve reaktif eleman içermektedir. Eleman sayıları ve üzerlerine düşen gerilim seviyeleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [Pandey ve ark., 2006; Wu, 2006; Lin ve ark., 2004]. Evirici yapılarının karşılaştırılması Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çok seviyeli evirici topolojilerinin donanım bazında karşılaştırılması

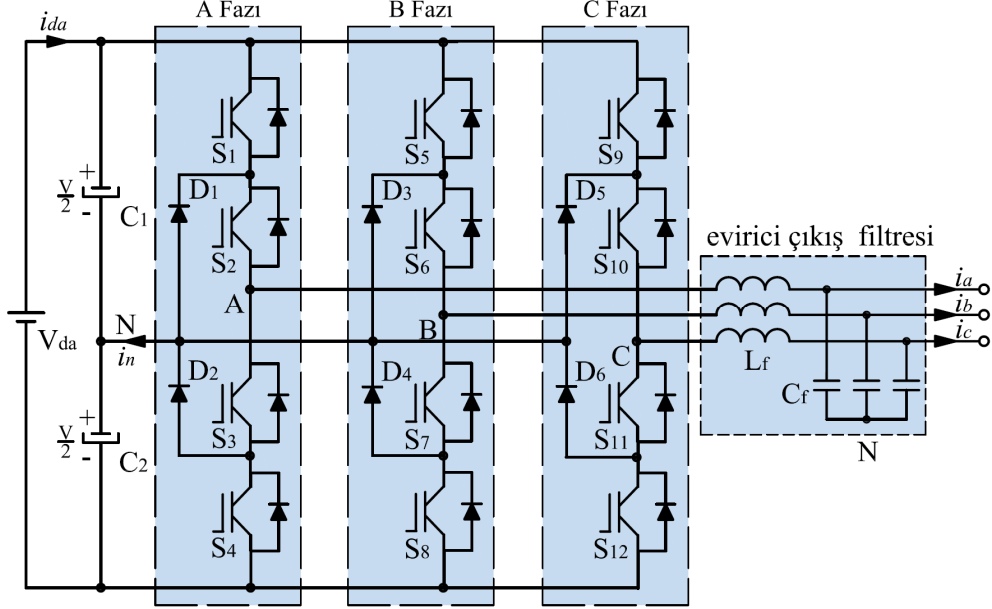
Topoloji	Nötr Noktası Tutmalı (NPC)	Kapasitör tutmalı (FC)	Kaskat H köprüsü (CHB)
Anahtar sayısı	$2(N_s - 1)$	$2(N_s - 1)$	$2(N_s - 1)$
Tutma diyodu s.	$(N_s - 1).(N_s - 2)$	0	0
Tutma kondan. s.	0	$(N_s - 1).(N_s - 2)/2$	0
Kaynak kondan. s.	$(N_s - 1)$	$(N_s - 1)$	$(N_s - 1)/2$

Burada N_s seviye sayısını göstermekte olup çizelge evirici bir kolu için düzenlenmiştir.

4.7. Üç Seviyeli NPC Evirici

İlk nötr noktası tutmalı evirici çalışmaları Nabae tarafından yapılmıştır [Nabae ve ark., 1981]. İlk ticari çok seviyeli evirici patenti 1975 yılında alınmıştır [Baker ve

Bannister, 1975]. Şekil 4.11’de üç seviyeli NPC evirici topolojisi görülmektedir. Üç fazlı eviricinin her bir kolu 4 adet ters paralel diyotlu güç anahtarı (S1-S4) ile iki adet tutma diyotundan (D1, D2) oluşmaktadır.

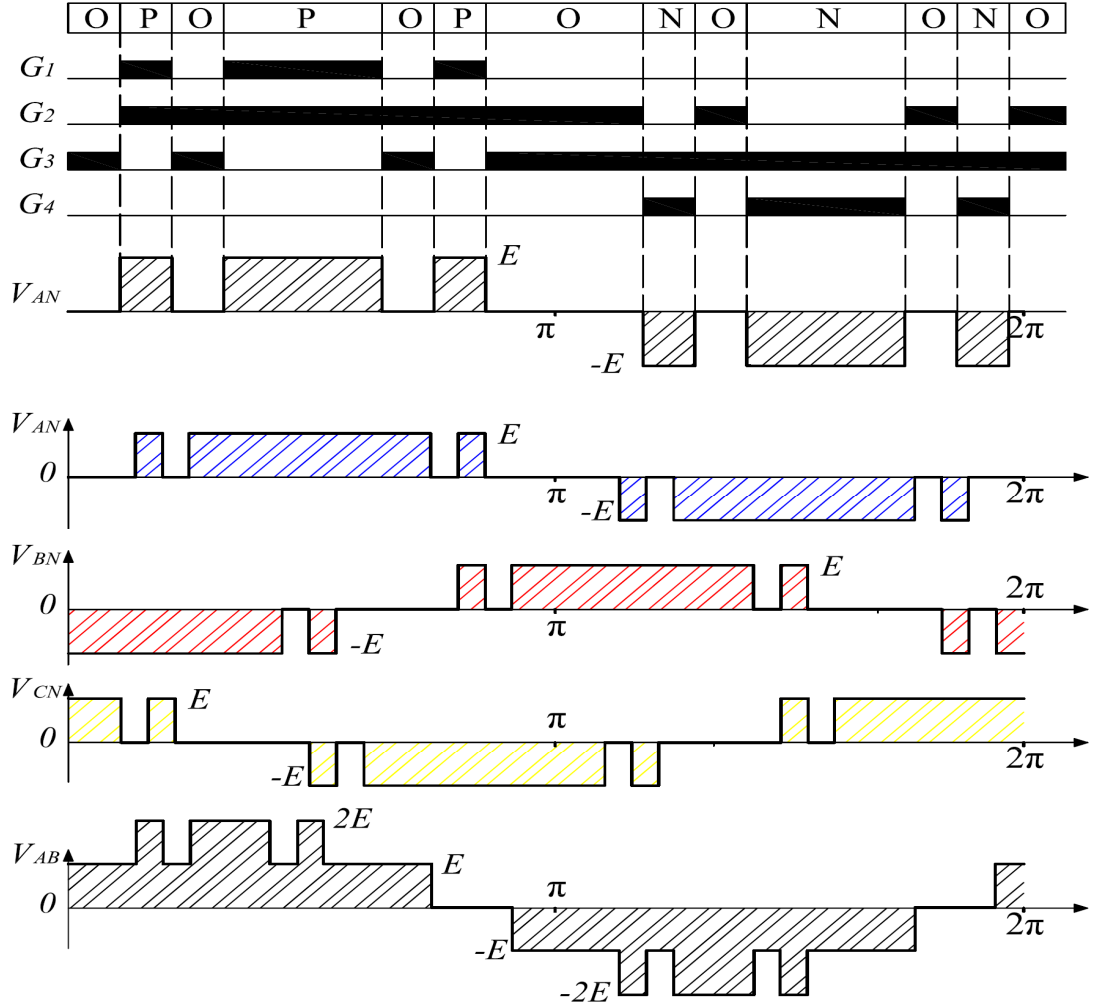


Şekil 4.11. Üç seviyeli NPC evirici

Giriş DA gerilim seviyesi iki adet kondansatör (C_1 , C_2) yardımı ile ikiye bölünmüştür. Ayrıca bu nokta nötr noktası ile de irtibatlandırılmıştır. C_1 ve C_2 kondansatörleri i_n akımı ile şarj ya da deşarj edilmektedir. Bir kol için anahtarların iletim ve kesim konumlarına ait durumlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çizelge 4.2’de verilen durumun bir alternans süresince sürekliliği sağlandığında Şekil 4.12’de verilen anahtarlama sırası elde edilmiş olur.

Çizelge 4.2. Üç seviyeli NPC topolojisi için A fazı anahtar konumları

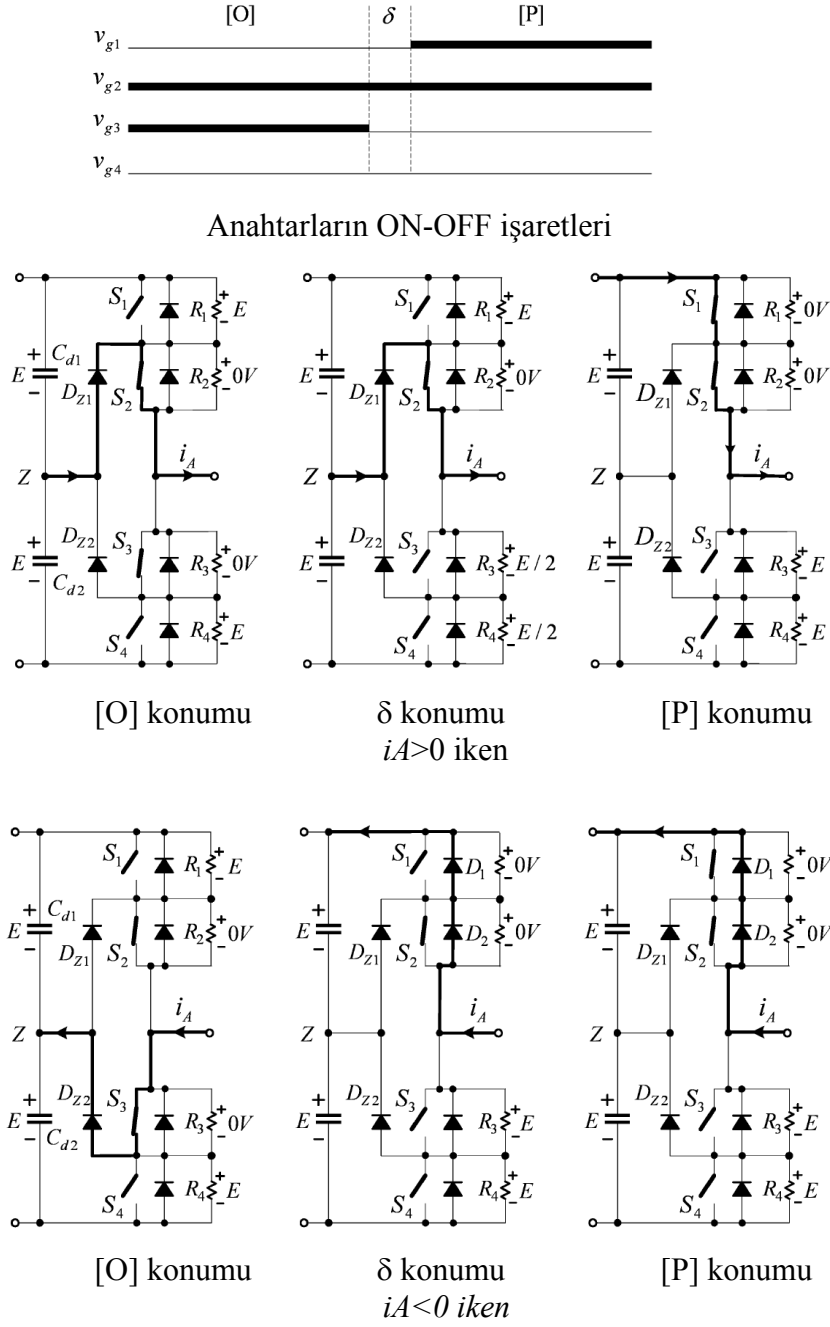
Anahtar konum	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	Çıkış geril. (VAZ)
P (Pozitif)	1	1	0	0	E
O (Orta)	0	1	1	0	0
N (Negatif)	0	0	1	1	$-E$



Şekil 4.12. Üç seviyeli NPC evirici anahtar konumlarına göre çıkış gerilimi

V_{AB} çıkış gerilimi incelendiğinde çıkış geriliminin 0, +E, +2E, +E, 0, -E, -2E, -E ve 0 şeklinde değiştiği görülmektedir. Bu gerilim seviyesi Eş. 4.1 yardımı ile bulunabilir. Buradan da anlaşılacağı üzere çıkış gerilimi sıradan eviricilerin aksine daha fazla seviyeye yani yarım alternans için üç değişik seviyeye sahiptir.

$$v_{AB} = v_{AN} + v_{BN} \quad (4.1)$$



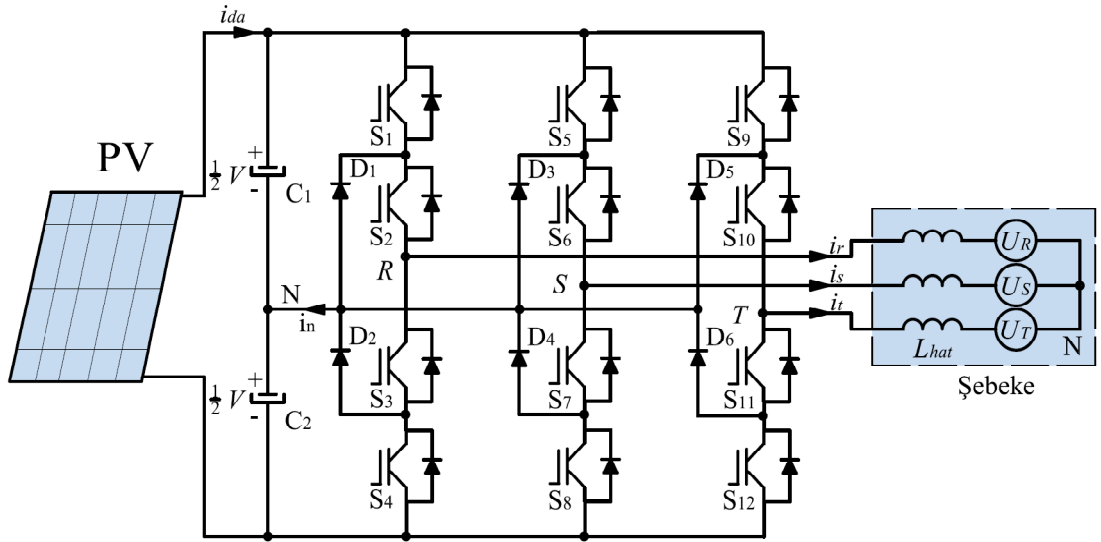
Şekil 4.13. A fazının O, P ve δ anahtarlama durumları için eşdeğer devre modeli

Şekil 4.13’de O, P ve δ (geçiş) durumlarında eşdeğer devre modeli verilmiştir. Bu devre modelinden yola çıkarak N,O ve geçiş durumları çıkartılabilir. Eşdeğer devre modelinden anlaşılacağı üzere NPC eviricide bütün anahtarlar daima DA baranın

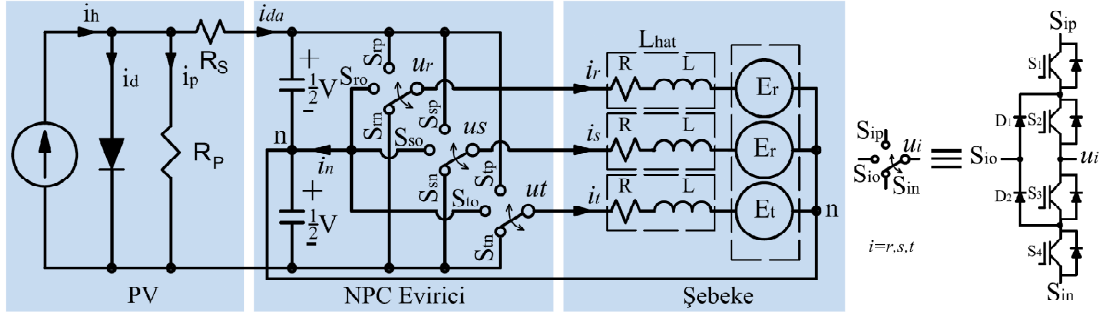
sadece yarısı gerilime maruz kalmaktadırlar. Bu durum P, O ve N durumlarına göre değişmez. Sonuç olarak NPC eviricide her ne olursa olsun gerilim paylaşımı sorunu yaşanmaz ve anahtarlar üzerinde düşen gerilim $V_{DA}/2$ kadar olur [Wu, 2006; Lin ve ark., 2004]. Ancak evirici gerilimini paylaşan kondansatörlerde gerilim dengesizliği problemleri olabilmektedir. Dolayısıyla bu gerilimler eşitlenmedi durumlarda anahtar gerilimleri dengesizle ilişkili oranda artış gösterebilmektedir. Bu durum ilgili bölümde açıklanmıştır.

4.7.1. Üç seviyeli NPC evirici eşdeğer devre modeli

İzoleli DA kaynak gerekmemesi ve eviricinin her bir kolu için hazır modüllerin seri üretiminin yapılması NPC eviricilerin tasarımını kolaylaştırmaktadır. Şekil 4.14’de güneş pillerinden beslenen NPC evirici şeması verilmiştir. Şekil 4.14’de verilen PV kaynaklı NPC evirici sisteminin eşdeğer devresi Şekil 4.15’deki gibi çıkartılabilmektedir.



Şekil 4.14. PV panelden beslenen tek kademeli şebeke etkileşimli NPC evirici



Şekil 4.15. PV kaynaklı şebeke etkileşimli NPC evirici eşdeğer devre modeli

Eşdeğer devre modelinde anahtar konumlarına göre çıkış ifadesi Eş. 4. 2'deki gibi yazılabilir [Zhezhi ve ark., 2009];

$$S_i = \begin{cases} 1 & (u_i = \frac{1}{2}V) \\ 0 & (u_i = 0) \\ -1 & (u_i = -\frac{1}{2}V) \end{cases} \quad (4.2)$$

Şekil 4.15'deki eşdeğer devre için faz gerilimi ifadeleri Eş. 4.3'de verilmiştir:

$$\begin{aligned} u_{rn} &= R i_r + L \frac{d}{dt} i_r + E_r \\ u_{sn} &= R i_s + L \frac{d}{dt} i_s + E_s \\ u_{tn} &= R i_t + L \frac{d}{dt} i_t + E_t \end{aligned} \quad (4.3)$$

Eş. 4.3 matris formunda ifade edilir ise buradan Eş. 4.4 elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} u_{rn} \\ u_{sn} \\ u_{tn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ i_s \\ i_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_r \\ \frac{d}{dt} i_s \\ \frac{d}{dt} i_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_r \\ E_s \\ E_t \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Yük uçlarındaki faz gerilimleri ile evirici faz gerilimleri arasındaki ilişki kullanılarak Eş. 4.5 yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} u_{rn}' \\ u_{sn}' \\ u_{tn}' \end{bmatrix} = \frac{1}{6} V \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_r \\ S_s \\ S_t \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Burada S_r , S_s ve S_t Eş. 4.2'ye göre anahtar pozisyonlarıdır. Eş. 4.4, Eş. 4.5'te yerine yazıldığında Eş. 4.6'da verilen üç seviyeli evirici eşdeğer devre modeli elde edilmiş olur:

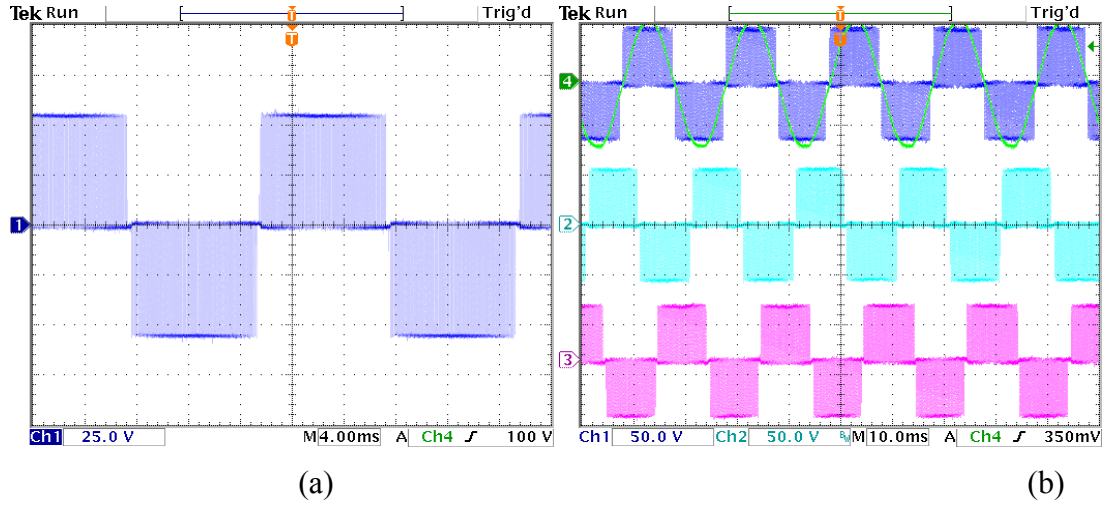
$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_r \\ \frac{d}{dt} i_s \\ \frac{d}{dt} i_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ i_s \\ i_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V}{6L} (3S_r - S') - \frac{E_r}{L} \\ \frac{V}{6L} (3S_s - S') - \frac{E_s}{L} \\ \frac{V}{6L} (3S_t - S') - \frac{E_t}{L} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

burada S' ifadesi Eş. 4.7 ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S' = S_r + S_s + S_t \quad (4.7)$$

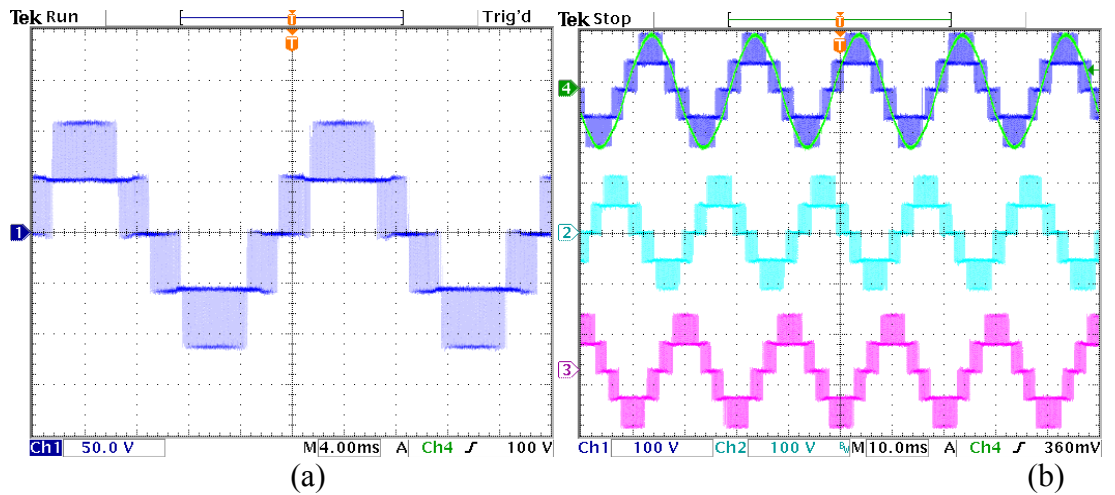
4.7.2. Üç seviyeli NPC evirici çıkış dalga formu

Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici R fazı filtre edilmemiş faz-nötr gerilimi Şekil 4.16 a ile verilmiştir. Şekil 4.16 b'de ise aralarında 120'şer derece faz farkı olan R, S ve T faz-nötr gerilimlerinin filtre edilmemiş hali ile verilmiştir. R fazı için filtre sonrası gerilimin dalga formu yine Şekil 4.16 b'de R fazı gerilimin üstünde verilmiştir. Buradan görüleceği üzere NPC eviricinin faz nötr gerilimi tıpkı iki seviyeli evirici gibidir.



Şekil 4.16. Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici filtre edilmemiş faz nötr gerilimleri
a) Bir faz gösterim b) Üç faz gösterim

Üç fazlı NPC eviricinin fazlar arası gerilimlerine bakıldığında iki seviyeli eviricilerden farkı kolayca anlaşılmaktadır. Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici R-S fazları arası filtre edilmemiş faz-faz gerilimi Şekil 4.17 a ile verilmiştir. Şekil 4.17 b'de ise aralarında 120°'şer derece faz farkı olan R-S, S-T ve T-R faz-faz gerilimleri filtre edilmemiş hali ile verilmiştir. Ayrıca R-S fazı için filtre sonrası gerilimin dalga formu yine Şekil 4.16 b'de kolay ilişkilendirme açısından R-S fazı gerilimin üstünde verilmiştir.

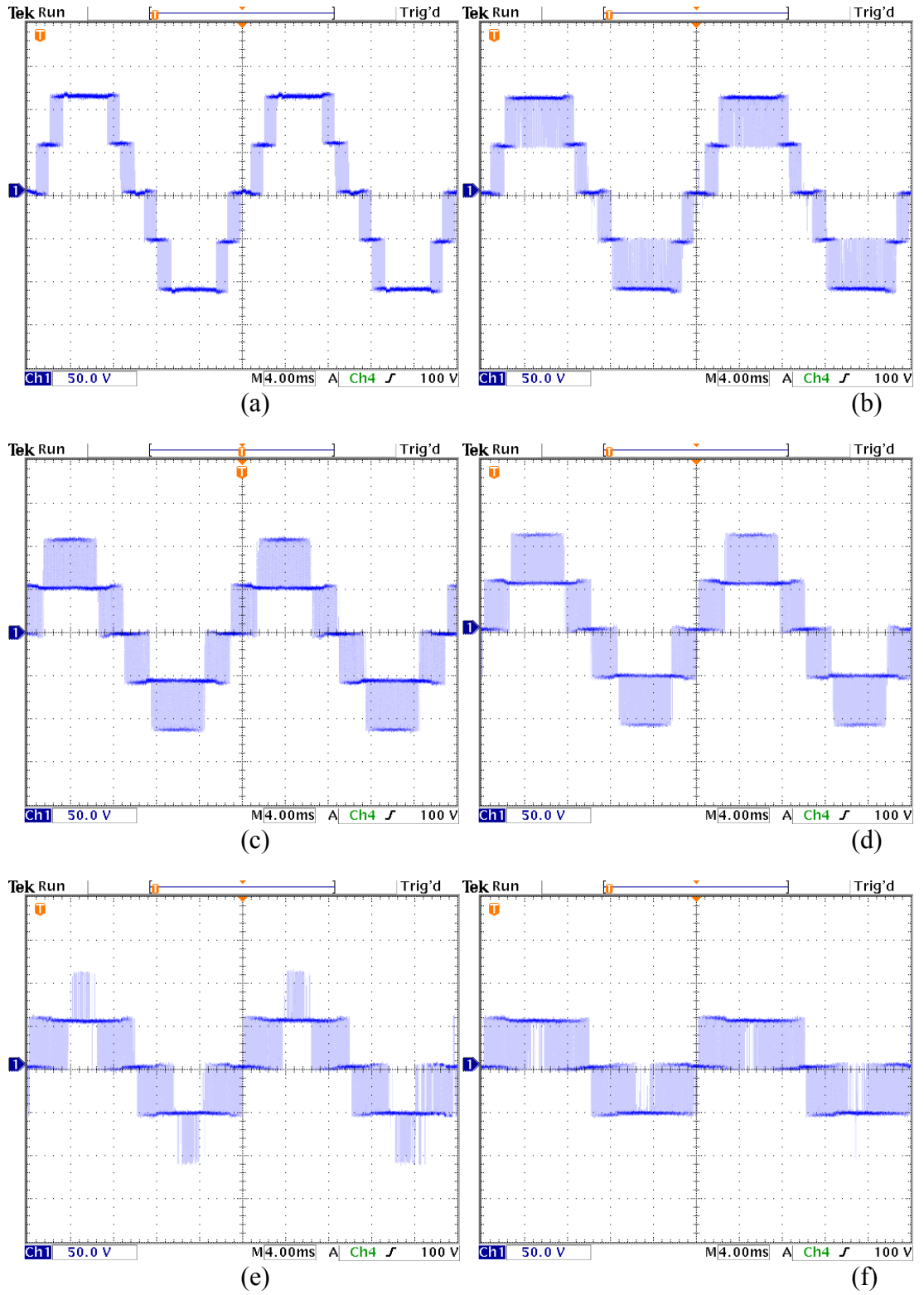


Şekil 4.17. Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici filtre edilmemiş faz-faz gerilimleri
a) Fazlar arası tek gösterim b) Fazlar arası tam gösterim

Şekil 4.17 a ve b'den görüleceği üzere evirici çıkış gerilimleri 0, $V/2$, V , $V/2$, 0, $-V/2$, $-V$, $-V/2$ ve 0 sıralamasında çalışmaktadır. Dolayısıyla bu eviricinin filtre gereksinimi iki seviyeli eviricilerden daha az olmaktadır. İki seviyeli eviricilerde çıkış gerilimi tek kutuplu DGM ile üretilenlerde 0, V , 0, $-V$ ve 0 sırasında, çift kutuplu DGM ile üretilenlerde ise V , $-V$ ve V sırasında devam etmesi bu eviricilerin çıkışındaki gerilim/akım değişiminin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum iki seviyeli eviricilerin filtre gereksiniminin daha yüksek olmasının yanı sıra EMI seviyelerinin de yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Şekil 4.18 üç fazlı üç seviyeli NPC eviricinin filtre edilmemiş çıkış dalga formunun modülasyon indeksi m_a 'nın kademeli olarak düşürüldüğünde çıkış gerilimin değişimini göstermektedir.

Şekilden de görüleceği gibi modülasyon indeksi düştükçe evirici çıkışındaki gerilim 0, $V/2$, V , $V/2$, 0, $-V/2$, $-V$, $-V/2$ ve 0 sırasında iken 0, $V/2$, 0, $-V/2$ ve 0 sırasına dönüşmektedir. Düşük modülasyon indeksinde çalışmada NPC eviriciler iki seviyeli evirici gibi çalışmaktadır [Kumar ve ark., 2008]. Ancak gerilim değişimi yukarıda sıralandığı gibi 0, $V/2$, 0, $-V/2$, 0 olup değişim DA baranın yarısı üzerinden gerçekleşmektedir.



Şekil 4.18. Üç fazlı üç seviyeli NPC evirici çıkış geriliminin m_a 'ya göre değişimi
 a 'dan f 'ye $1 > m_a > 0$

4.7.3. Üç seviyeli NPC evirici orta nokta dengesizliği

İdeal şartlarda NPC eviricinin girişinde bulunan ve DA barayı ikiye bölen kondansatörlerin giriş gerilimini eşit şekilde paylaşmaları gerekir. Bu durumda eviricinin bir kolundaki anahtarlar üzerindeki gerilim düşümleri eşit olmaktadır. Ancak NPC eviricilerde DA barayı ikiye bölen kondansatörler üzerinde gerilim dengesizliği problemleri ile karşılaşmaktadır. Gerilim dengesizliği nötr hattından yüksek frekanslı akımların dolaşmasına neden olmaktadır. Çok seviyeli eviricilerde seviye sayısı arttıkça bu problemler daha karmaşık hale gelmektedir [Pereira ve Martins, 2009]. DA kondansatörleri üzerindeki gerilim farkı bazı durumlarda çok aşırı seviyelere çıkabilmekte, aşırı gerilimden dolayı anahtarlama elemanlarının bozulmasına dahi sebep olabilmektedir [Yamanaka ve ark., 2002]. Bu ise asimetrik sinüs oluşumuna neden olabilmektedir. Dolayısıyla üretilen sinüsün pozitif/negatif dalga tepe değeri diğer tepe değerinden daha yüksek/düşük olabilmektedir.

Bu dengesizlik üretilen akımda harmoniklerin artması, yine üretilen akımda DA bileşen oluşumuna neden olmaktadır. Üretilen bu enerjiyi transformatörler aracılığı ile yüke/şebekeye aktarıldığında transformatörlerin ısınmasına neden olmakta dolayısıyla verimi etkilemektedir. Ayrıca bu enerji doğrudan yüksek krest faktörlü (doğrultucu v.b) yüke uygulandığında genlik değerindeki çok küçük farklar alternansın pozitif/negatif bölgesinde aşırı akım çekilmesine neden olabilmektedir. Gerilim dengesizliğinin giderilmesine yönelik ile birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları her bir kondansatör grubu için ayrı DA kaynak kullanmak, yardımcı bir çevirici kullanarak gerilimleri eşitlemeye çalışmak, çeviricinin anahtarlama stratejisini değiştirmek olarak sıralanabilir [Shen ve ark., 2011; Pulikanti ve ark., 2011; Ko ve ark., 2011]. Dengeleme direnci veya dengeleme devreleri kullanarak gerilimleri eşitlemek, çözüm yolu olarak sunulmuştur [Gediga ve ark., 2007; Stala, 2011]. DGM teknikleri kullanarak yapılan dengeleme algoritmaları sunulmuştur [Lin ve ark., 2004; Ben-Brahim, 2008].

4.8. Şebeke Etkileşimli Eviriciler

Güneş paneli gibi DA kaynakların şebekeye bağlanmasında kullanılan değişik bağlantı tipleri bulunmaktadır. Bunları kendi aralarında transformatör içeren ve transformatörsüz yapılar olarak gruplandırılabilir. Transformatörlü yapılarda şebeke frekanslı transformatörlü ve yüksek frekanslı transformatörlü yapılar bulunmaktadır [Li ve Wolfs, 2008]. Düşük frekanslı transformatörlü yapıların ebatları büyük ve pahalıdır. Ayrıca transformatörden kaynaklanan bir miktar verim düşmesi söz konusudur. Yüksek frekanslı transformatör kullanarak yapılan sistemlerde enerji dönüşüm işlemi çift aşamalı olduğundan verim önemli ölçüde düşmektedir. Yüksek ve düşük frekanslı transformatörlü yapılar kaynakla alıcı arasında galvanik izolasyon sağlarlar. Transformatörsüz yapılarda galvanik izolasyon bulunmamaktadır. Galvanik izolasyon kaynakla yük arasındaki common mode gerilimini ve kaçak akımları önlemektedir [Patrao ve ark., 2011].

Şebeke etkileşimli eviriciler akım kaynaklı ya da gerilim kaynaklı olarak tasarlanabilmektedirler. Bu yapıların denetimi ise akım veya gerilim denetimli yapılarla denetlenebilir. İki yönlü enerji akışına izin vermeleri sebebi ile şebeke etkileşimli eviricilerde genellikle gerilim kaynaklı yapılar tercih edilmektedir. Denetim yapısı olarak şebeke frekansındaki dalgalanmalara daha az duyarlı olan ve şebeke şartlarına daha iyi uyum sağlayan akım denetimli yapılar daha sıklıkla kullanılmaktadır [Altın, 2009].

Şebeke etkileşimli eviricilerin şebeke ile paralel çalışabilmesi için şebeke yöneticilerinin belirlediği standartlara uyma zorunluluğu vardır. Standartlar şebekeye aktarılan enerjinin güç faktörü, toplam akım harmonik bozunumu gibi enerji kalitesi ile ilgili olduğu gibi şebeke empedansının izlenmesi, topraklama, ada modunun tespiti gibi şebeke parametrelerinin izlenip paralel çalışma ortamının uygunluğunun belirlenmesi ile de ilgilidir. Ülkelere göre değişiklik göstermekle birlikte genel olarak kabul görmüş standartlar, IEEE1547, IEEE 929-2000, IEC61727, EN61000-3-2, EN

50330-1, ve NEC 690 standartlarıdır. Çizelge 4.3'de IEEE1547, EN61000-3-2 ve IEC 61727 nolu standartların bilgileri verilmiştir [Kjaer ve ark., 2005].

Çizelge 4.3. PV sistemlerden şebekeye enerji veren sistemler ile ilgili standartlar

Başlık	IEC61727	IEEE1547	EN61000-3-2
Anma gücü	10 kW	30 kW	16 A X 230 V = 3,7 kW
(Harmonik derecesi) harmonik akım limiti	(3-9) %4,0 (11-15) %2,0 (17-21) %1,5 (23-33) %0,6	(2-10) %4,0 (11-16) %2,0 (17-22) %1,5 (23-34) %0,6 (>35) %0,3	(3) 2,30 A (5) 1,14 A (7) 0,77 A (9) 0,40 A (11) 0,33 A (13) 0,21 A (15-39) 2,25/h
	Harmonikler bu aralıkta olsa dahi listelenen tek sıralı harmoniklerden %25 daha az olacaktır.		Tek sıralı harmoniklerin yaklaşık %30'u
Maksimum akımTHD değeri	5,00%		-
Anma gücünün %50'sindeki güç faktörü	0,90	-	
DA akım transfer	Anma çıkış akımının %1,0'inden az olmalı	Anma çıkış akımının %0,5'inden az	<0,22 A, 50W yarım dalga doğrultucuya göre
Normal şartlardaki çalışma gerilimi	%85 - %110 (196V - 253V)	%88 - %110 (97V - 121V)	-
Normal çalışma için frekans aralığı	50 ± 1 Hz	59,3 Hz - 60,5Hz	-

Çizelge 4.4’de IEEE Std 929-2000 nolu (IEEE PV sistemlerin şebeke arayüzleri için tavsiye edilen uygulama - IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems) standarda göre belirlenmiş şebeke bağlantısının açılma zamanına ilişkin bilgiler verilmiştir [IEEE Std 929-2000].

Çizelge 4.4. IEEE Std 929-2000’e göre şebekeden ayrılma zamanları

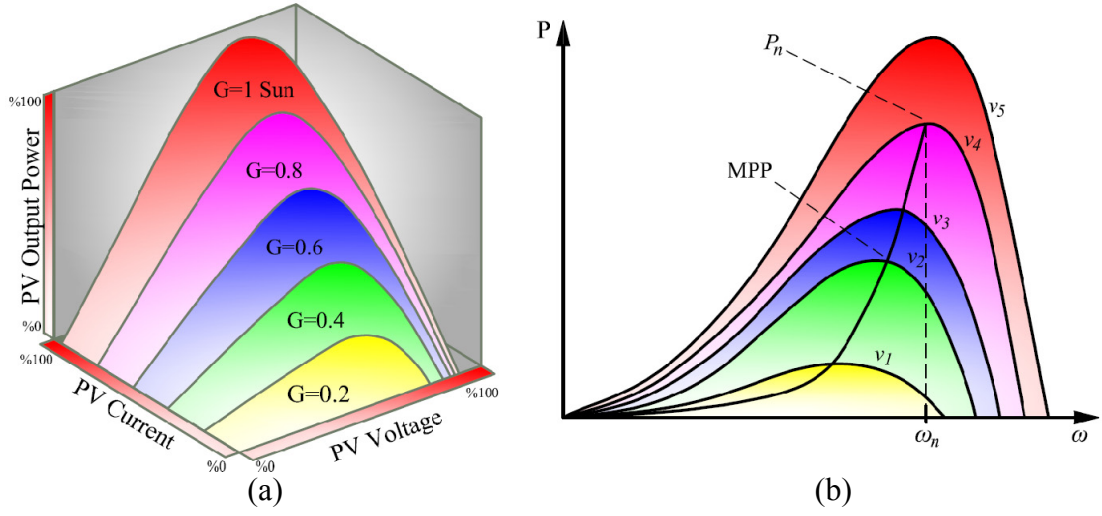
Ortak Baradaki Gerilim (OBG)	En Yüksek Açma Zamanı
$V_{OBG} < V_n \times 0,5$	6 saykıl
$V_n \times 0,5 \leq V_{OBG} < V_n \times 0,88$	120 saykıl
$V_n \times 0,88 \leq V_{OBG} \leq V_n \times 1,1$	Normal çalışma
$V_n \times 1,1 < V_{OBG} < V_n \times 1,37$	120 saykıl
$V_n \times 1,37 \leq V_{OBG}$	2 saykıl

Çizelge 4.4’de verilen V_{OBG} gerilimi şebeke bağlantı noktasındaki gerilimi, V_n gerilimi nominal çalışma gerilimini, ve saykıl ifadesi ise paralel bağlanılacak olan şebekenin periyodunu ifade etmektedir. Tüm gerilimler etkin değer olarak alınmaktadır.

5. EN YÜKSEK GÜÇ NOKTASININ TAKİBİ

MPPT, güneş pilleri çıkışından yüke aktarılan enerjiyi en yüksek düzeyde tutmak için kullanılan bir denetim tekniğidir. Amaç kaynağın verebileceği en yüksek seviyedeki gücü alabilmektir. PV panel verimleri güneşin verebileceği enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürülebilme oranları ile ifade edilirler. Ticari olarak kullanılan PV panel verimleri %12 ile %19 arasında değişmektedir. Bu oranlar sıcaklık, kirlenme vb. etkilere bağlı olarak değişmektedir [Mekhilef ve ark., 2012]. İlaveten, pillerin karakteristik özelliğinden dolayı akım gerilim oranı dengelenmediğinde bu verim oranı düşmektedir. Benzer şekilde rüzgâr türbinlerinin de belirli bir rüzgâr şiddetinde verebileceği güç noktası bulunmaktadır. Aşırı ya da az yükleme türbinden faydalanma oranını azaltacaktır. Dolayısı ile kısıtlı enerjiyi etkili bir şekilde aktarmak günümüz araştırmacılarının ilgi odağı olmuştur.

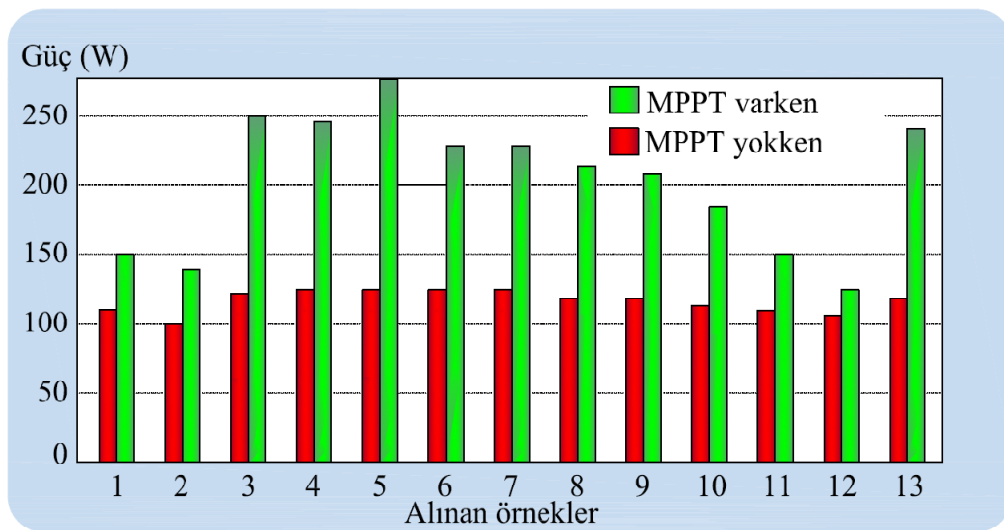
MPPT işlemi genellikle panel çıkışında üretilen elektrik enerjisini şartlandıran güç dönüştürücüsünde uygulanmaktadır. İlk MPPT çalışmaları DA/DA çeviriciler için başlamış ve daha sonra verim artışı ve maliyet üzerindeki olumlu etkileri sebebi ile eviriciler üzerine de uyarlanmıştır [Sefa ve Altın, 2009]. Bu yöntem kaynağın verdiği enerjinin en yüksek olduğu noktayı yakalayan bir denetim yapısıdır. Bu nokta güneş panelleri için ışıma, sıcaklık, PV panel eğimi, PV panel yaşlanması gibi değişkenlerle, rüzgâr türbinleri için ise rüzgâr şiddeti, çarpma açısı, alternatör karakteristiği gibi parametrelere göre değişmektedir. Bu kaynaklardan etkili bir şekilde faydalanabilmek için denetim mekanizması denetim tekniğine bağlı olarak PV panel-rüzgâr türbini değişkenlerini değerlendirip güç dönüştürücüsünün referansını gücün en yüksek olduğu noktaya ulaşmayı sağlayacak şekilde değiştirir. Şekil 5.1 a'da PV sistem çıkış gücünün ışıma şiddetine (G) göre akım gerilim değişim karakteristiğine ait grafik verilmiştir [Sefa ve Özdemir, 2010]. Rüzgâr türbinleri içinde benzer bir grafik çizilebilir. Bu durum Şekil 5.1 b'de açısal hıza göre güce değişimi şeklinde gösterilmiştir [Patsios ve ark., 2009].



Şekil 5.1. Güneş ve rüzgâr türbini MPPT eğrileri

- a) PV MPPT eğrisinin farklı ışınlam şiddetlerindeki değişimi
 b) Rüzgâr Türbini MPPT eğrisinin rüzgâr şiddeti ve ω 'a göre değişimi

PV sistemler için MPPT işlemi sayesinde elde edilen enerjinin denetimsiz olarak alınan enerjiye oranla %45'ler civarında artırılabilir [Santos ve ark., 2006]. Ancak bu değer o anki yük ile PV çıkışındaki enerjinin uyumu ile ilişkilidir. MPPT ve MPPT olmadan çalışan sistem için farklı zamanlarda alınmış örneklere ait çubuk grafik Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. MPPT ve MPPT olmadan üretilen enerjilerin karşılaştırması

Çıkış gücü ışınlam ve sıcaklığa bağılı olarak yalnızca uygun akım-gerilim değerinde en yüksek değere ulaşır. Değişik atmosfer koşullarında en fazla çıkış gücü noktası (MPP) sürekli olarak değişecektir. Enerji dönüşüm işleminin verimli ve etkili olabilmesi amacı ile PV çıkışında denetimli güç dönüştürücüleri kullanılmış ve bu dönüştürücüler değişik teknikler ile denetlenmiştir.

Günümüzde birçok MPPT denetim tekniğı kullanılmaktadır. Bu denetim teknikleri “dolaylı denetim” ve “doğrudan denetim” olarak iki ana grupta ele alınabilir. Dolaylı denetim tekniğinde PV çıkış gerçek gücü sürekli olarak hesaplanmaz. Burada referans denetim sinyalinin oluşturulması işlemi PV hücre özelliğine bağılı olarak belirli aralıklarla yada örnekleme PV hücresi yardımı ile modül açık devre gerilimi, modül kısa devre akımı, ışınlam şiddeti, modül sıcaklığı gibi değerlerinin okunması ile yapılır. Doğrudan denetim tekniğı ile oluşturulan sistemler sürekli olarak PV çıkış gücünü okuyarak önceki çıkış gücü ile karşılaştırıp MPPT noktasına ulaşmayı sağlayacak dönüştürücü referans sinyalini oluşturur.

Bu kısımda günümüze kadar yapılan belli başlı MPPT denetim teknikleri hakkında bilgi verilecektir.

5.1. Dolaylı MPPT

Dolaylı denetim tekniğı PV karakteristiğine dayalı olarak deneysel sonuçlarla oluşturulmuş tabloları, modül açık devre gerilimi, modül kısa devre akımı, ışınlam şiddeti, modül sıcaklığı gibi değerleri direkt yada matematiksel eşitlikler yardımı ile kullanarak MPPT noktasını tahmin etmeye dayalı bir yöntemdir. Bu yöntemle yaklaşık MP noktası bulunur.

5.1.1. Sabit gerilim metodu

Sabit gerilim (CV) diğer ismi ile açık devre gerilim metodu PV panel açık devre gerilimini referans alan bir metodudur. Araştırmalar V_{MPPT} geriliminin V_{OC}

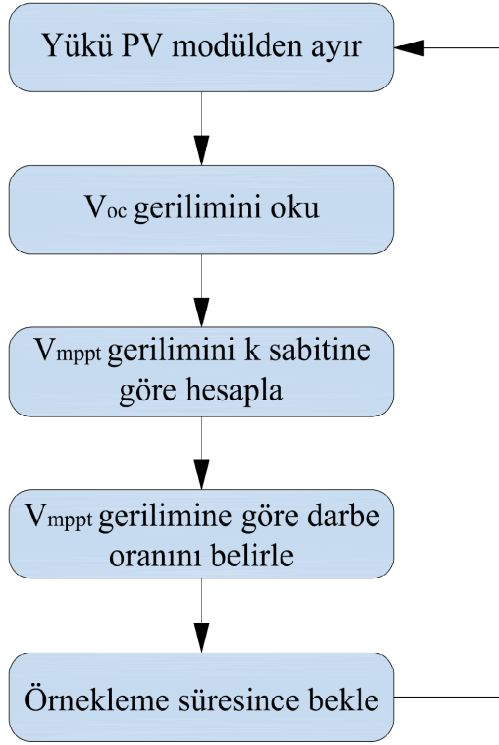
geriliminin doğrusal bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Bu değer üretim tekniği, çevresel koşullar gibi etkenlere bağlı olarak polykristal modüllerde ortalama V_{OC} geriliminin %73-80'i civarındadır [Enslin ve ark., 1997; Teulings ve ark., 1993; Salas ve ark., 2006]. Daha genel bir ifade ile,

$$k = \frac{V_{MPPT}}{V_{OC}} \cong \text{sabit} \quad (5.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada k sabiti değişmediğinden MPPT gerilimi (V_{MPPT}) açık devre gerilimi (V_{OC}) yardımı ile kolaylıkla bulunabilir. Örnekleme işlemi çıkış yükü devrede değilken V_{OC} geriliminin okunması ile gerçekleşir. Sık örnekleme MPPT işleminin hassas bir şekilde sürdürülmesini, dolayısı ile hata oranını azaltacaktır.

Sabit gerilim metodu oldukça basit, karmaşık devreler gerektirmeyen, ucuz ve kullanışlı bir yöntemdir. Ancak referans işareti oluşturabilmek için gereken V_{OC} gerilim bilgisini okuyabilmek için PV modülden yükü ayırma gerekliliğinin yükler için sorun teşkil etmesi, bu esnada güneş enerjisinden faydalanılamaması, gerçek MPPT işleminin sürdürülememesi olumsuz etkileridir.

Sistem güvenilirliği ve yüklerin devreden çıkarılmasını önlemek amacı ile aynı özellikte bir hücre örnekleme elemanı olarak kullanan sistemlerde mevcuttur. Bu durumda bir hücre sürekli devre dışı kalmaktadır. Şekil 5.3'de sabit gerilim metodunun işleyişini gösteren akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.3. Sabit gerilim metodu akış diyagramı

5.1.2. Sabit akım metodu

Sabit akım (CC) diğer ismiyle kısa devre akım metodu sabit gerilim metoduna çok benzer. PV modül MPPT akımı (I_{MPPT}) kısa devre akımı (I_{SC}) ile orantısal bir ilişki içerisindedir. Bu değer üretim tekniği ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmekle birlikte %85’ler civarındadır [Salas ve ark., 2006].

Kısa devre akımı ile MPPT akımı arasındaki orantısal k sabiti sıcaklık ve ışıyım değişikliğinde korunur. Kısa devre akımı ile MPPT akımı arasındaki bağıntı Eş. 5.2 ile ifade edilebilir [Noguchi ve ark., 2002].

$$I_{MPPT}(e) = k \cdot I_{SC}(e) \quad (5.2)$$

Eş. 5.2 kullanılarak MPPT akımı kısa devre akımının ölçülmesi ile bulunur ve Eş. 5.3'deki akım denetimli dönüştürücünün referans işareti oluşturulur.

$$I_{ref} = I_{MPPT} \quad (5.3)$$

Kısa devre akım metodu basit ve karmaşık devreler gerektirmeyen yapıda olmasına rağmen kısa devre akımının ölçülmesi gerekliliği, bu esnada enerji kaybı, k sabiti belirleme işlemi ve panel yüzeyinde meydana gelebilecek kirlilik yaşanma v.b. sebeplerden kaynaklanan k sabiti sapmaları bu yöntemin olumsuz yönlerindendir. Sistemin işleyişini gösteren akış diyagramı ise sabit gerilim metodunda olduğu gibidir.

5.2. Doğrudan MPPT

Doğrudan (online) denetim metodu PV gerilim ve/veya akım değerlerini kullanır. Çalışma noktalarının değiştirilmesi ile en uygun nokta yakalanmaya çalışılır. Bu yöntemin en önemli avantajı, PV üreteç karakteristiği, sıcaklık, ışınlım şiddeti gibi değişkenlerden uygun noktanın yakalanması açısından etkilenmemesidir.

5.2.1. Değiştir-gözle metodu

En sık kullanılan metotlardan biridir. Değiştir-gözle (P&O) yönteminde PV çıkış gücü sürekli olarak izlenir ve denetim değişkeninin hareketi ile gücün hareketi arasında bir bağıntı kurularak referansın azaltmasına ya da artırılmasına karar verilir. P&O algoritması tepeye tırmanma (hill-climbing) algoritması adı ile de anılır. Güç hesaplanarak güç dönüştürücü darbe genişlik oranı gücü artıracak şekilde değiştirilir. P&O algoritmaları kolayca sayısal devrelerle uygulanabilir. Akım ve gerilim değerlerini okumak MP noktasını bulmak için yeterli olacaktır. P&O yöntemi için PV panelin çıkış gücü ve referans değişkeninin hareketi hakkında temel yargılar Çizelge 5.1'de verilmiştir [Esrām ve Chapman, 2007].

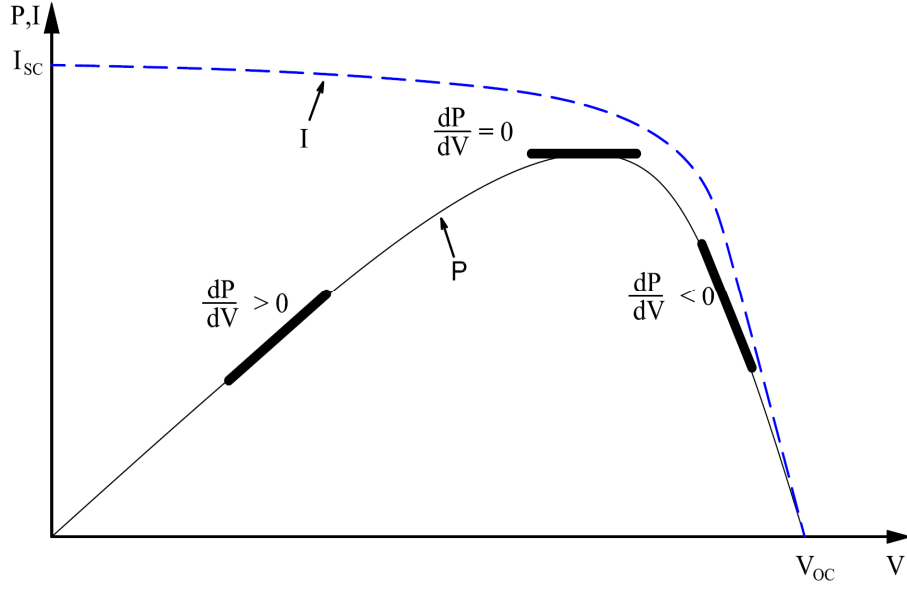
Çizelge 5.1 Değiştir-gözle değişim verileri

Referans değişimi	Güçteki değişim	Sonraki ref. Değişim
Pozitif	Pozitif	Pozitif
Pozitif	Negatif	Negatif
Negatif	Pozitif	Negatif
Negatif	Negatif	Pozitif

Çizelge 5.1’de verilen tablo darbe genişlik oranına göre gücün değişimini esas alarak oluşturulmuştur. P&O MPPT algoritması güce göre gerilim ya da güce göre akım değişimini esas alınarak da uygulanabilir. Kıyaslama işlemi sonucunda, MP noktasına ulaşılmayı sağlayacak bir sonraki darbe genişlik oranına karar verilir. Atmosferik koşulların hızla değişimine karşı tepkisinin yavaş olması ve ani değişimlerde MP noktasını yanlış yönde arama gibi zayıf yönleri bulunmaktadır. Sistem sürekli olarak değiştir gözle işlemini yaptığından MP noktasına ulaşıldığında burada sabitlenemez. MPP civarında sürekli olarak osilasyon olmasından dolayı sistemde bir miktar güç kaybı olur [Liu ve ark., 2004].

5.2.2. Artan iletkenlik metodu

Şekil 5.4’de artan iletkenlik (IC) yöntemi çalışma koşuluna ait grafik verilmiştir [Vechiu ve ark., 2004]. Artan iletkenlik metodunun temeli PV panel çıkış gücü eğiminin “0” olduğu yeri MP, pozitif olduğu yeri MP noktasının solu, negatif olduğu yeri MP noktasının sağı olarak belirlemesine dayalıdır [Esrarn ve Chapman, 2007].



Şekil 5.4. Artan İletkenlik algoritmasının çalışma eğrisi.

Şekil 5.4’de verilen eğri artan iletkenlik algoritmasının temelini oluşturur. Bu eğriden yararlanılarak aşağıdaki çıkarımları yapmak mümkündür [Esrām ve Chapman, 2007].

$\frac{dP}{dV} = 0 \rightarrow$ Çalışma noktası şu an MP noktasında,

$\frac{dP}{dV} > 0 \rightarrow$ Çalışma noktası şu an MP noktasının solunda,

$\frac{dP}{dV} < 0 \rightarrow$ Çalışma noktası şu an MP sağında, çıkarımları yapılır. Buradaki ifadelerden yararlanılarak Eş. 5.4 yazılabilir.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (5.4)$$

Eş. 5.4 kullanılarak,

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \rightarrow \text{Çalışma noktası MP noktasında,}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \rightarrow \text{Çalışma noktası MP noktasının solunda,}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \rightarrow \text{Çalışma noktası MP noktasının sağında, çıkarımları yeniden yapılabilir.}$$

IC metodunun en önemli avantajı hızlı değişen atmosferik koşullara uyum sağlayabilmesi ve MP noktasında meydana gelen osilasyonun P&O metodundan çok daha az olmasıdır. Önceleri hesap işlemleri fazla zaman aldığından tepki hızları yavaş idi. Günümüzde ise mikrodenetleyicilerin hızlı gelişimi bu olumsuz etkiyi azaltmış durumdadır. Ancak IC denetim metodu ile denetlenen devreler biraz daha karmaşık ve pahalıdır. Verimleri ise P&O yöntemi ile yaklaşık olarak aynı fakat CV yönteminden daha yüksektir [Hohm ve Ropp, 2002].

5.3. Diğer metotlar

Yukarıda en yaygın MPPT metotları sıralanmıştır. Bunlardan başka birçok MPPT metodu bulunmaktadır. Aşağıda bu metotlara kısaca değinilmiştir.

5.3.1. Eğri uyarılama metodu

PV hücresi eşdeğer devresi ve üretici verilerinden yararlanılarak sistem modeli matematiksel denklem ya da yakınsama metotları ile oluşturulur. Ancak oluşturulan yapı karmaşık olduğundan analog veya sıradan sayısal devrelerle gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Bir diğer sorun ise değişik ışınlam ve yaşlanma etkilerinde

parametrelerin doğru olarak bulunamayışından kaynaklanan sapmadır [Salas ve ark., 2006].

5.3.2. Tablodan okuma metodu

PV panelden okunan akım ve gerilim bilgisi daha önceden saklanan verilerle karşılaştırılarak MPPT noktasına ulaşılacak hareket hakkında bilgi edinilir. Bu bilgi ile güç dönüştürücüsünün referans işareti belirlenir. Depolama ünitesi tüm atmosferik koşullar için bilgi bulundurmalıdır. Ayrıca bu değerler farklı PV panel çeşitlerinde yeniden oluşturulmalıdır.

5.3.3. Parazitik kapasite metodu

Artan iletkenlik metoduna benzer yapıdadır. Fakat PV çıkış kapasitesi C_{PV} 'nin işleme dâhil edilmesi ile gerçekleştirilir. Denetim devresi yapısının karmaşık olması ve algoritmasındaki matematiksel işlemlerin fazlalığı metodun zayıf yönlerindendir [Salas ve ark., 2006].

5.3.4. Sadece akım metodu

Kısa devre akım metodundan farklı olarak sadece PV panel akımının ölçülmesi ile gerçek MP noktası bulunabilir. Burada I_{MPPT} Eş. 5.5'deki gibi gücün bir fonksiyonu olarak ifade edilir [Duru, 2006].

$$I_{MPPT} = f(P_{MPPT}) \quad (5.5)$$

Sadece akım okuyarak gerçek MP noktasını yakalaması, hızlı değişen atmosferik koşullara uyum sağlayabilmesi olumlu yönlerindendir.

5.3.5. Bulanık mantık ve yapay sinir ağıları metotları

Son yıllarda kullanılmaya başlayan metotlardandır. Aşırı matematiksel modellemeler gerektirmezler. Hızlı değişen atmosferik koşullara uyum sağlayabilirler. Ancak sistemin başarısı tasarımcının kabiliyeti ile sınırlıdır. Hata işareti katsayıları doğru belirlenmediğinde olumsuz sonuçlara yol açabilir [Esrām ve Chapman, 2007].

Bölüm içerisinde adı geçen metotlardan başka benzer metotlarda bulunmaktadır. Güneş pilleri ya da rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerjinin şebekeye aktarılması esnasında MPPT işlemi büyük çoğunlukla evirici öncesine bağlanan DC/DC çeviriciler ile yapılmaktadır. Bu çift aşamalı işlem hem maliyet hem de verim açısından sorun oluşturmaktadır.

5.4. MPPT Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Çizelge 5.2’de en bilinen MPPT yöntemlerinin karşılaştırılmasına ait bilgiler sunulmuştur [Esrām ve Chapman, 2007]. Veriler incelendiğinde bir kısmının panel değişkenlerinden etkilendiği, bir kısmının MPPT hızının yavaş olduğu, bir kısmının da periyodik olarak ayar gerektirdiği anlaşılmaktadır. Buradan hareketle gerçek MPPT yapabilen ve panellerin kirlenme, gölgelenme, yaşlanma vb. değişkenlerinden etkilenmeyen iki yöntem bulunmaktadır. Bunlardan birincisi IC diğeri ise P&O yöntemidir. Ancak IC ve P&O yöntemlerinin karşılaştırıldığında IC algoritması şebeke etkileşimli eviriciler ile daha uyumlu çalışabilmektedir. Bu konu ile ilgili olarak daha ayrıntılı bilgi verilecektir.

Panel bağımlı olan yöntemler incelendiğinde bazı yönlerden avantajlı olmalarına rağmen bir takım matematiksel eşitlikler ya da tablo değerleri kullandıklarından yanılma payları yüksek olabilmektedir. Bu nedenle de şebeke gibi dinamik yüklerde uyum sorunu yaşayabilmektedirler.

Çizelge 5.2. MPPT Yöntemlerinin Karşılaştırılması

MPPT tekniği	PV panel bağımlılığı	Gerçek MPPT?	Analog & Sayısal?	Periyodik ayar?	İzleme hızı	Karmaşık ?	Gerekli bilgi
Değiştir Gözle P&O)	Hayır	Evet	A&S	Hayır	Değişken	Düşük	Akım, Gerilim
Artan İletkenlik (IC)	Hayır	Evet	S	Hayır	Değişken	Orta	Akım, Gerilim
Sabit Gerilim (VOC)	Evet	Hayır	A&S	Evet	Orta	Düşük	Gerilim
Sabit Akım (ISC)	Evet	Hayır	A&S	Evet	Orta	Orta	Akım
Bulanık Mantık Kont.	Evet	Evet	S	Evet	Hızlı	Yüksek	Değişken
Yapay Sinir Ağları	Evet	Evet	S	Evet	Hızlı	Yüksek	Değişken
Tablodan Okuma	Evet	Hayır	S	Evet	Hızlı	Düşük	Değişken
Eğri Uyarlam.	Evet	Hayır	S	Evet	Hızlı	Yüksek	Değişken
Plot Hücre	Evet	Hayır	A&S	Evet	Hızlı	Düşük	Değişken
DA Bara Düşüm	Hayır	Hayır	A&S	Hayır	Orta	Düşük	Gerilim

5.5. ŞEE’de Kullanılan MPPT Tekniklerinin Karşılaştırılması

MPPT yöntemleri hakkında bilgiler genel bilgiler bölüm 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4 içerisinde verilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları evirici yapıları ile kullanılmaya

elverişlidir. Ancak sistemin şebeke ile paralel çalışması durumu çok daha karmaşık hale gelmektedir. MPPT yöntemlerinin uygulanış şekli ve sistem yapısı sistem verimini, maliyetini ve de kararlılığını etkilemektedir. Burada sınıflandırmaya ihtiyaç vardır.

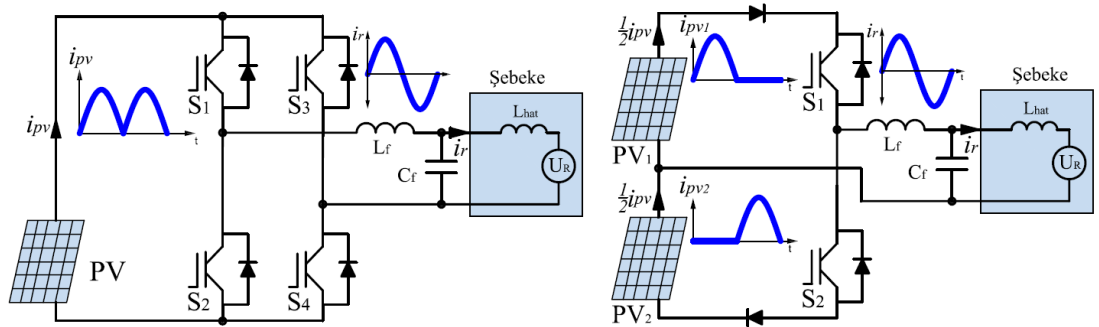
MPPT'li şebeke etkileşimli eviriciler;

- Evirici yapısı ve faz sayılarına,
- Depolama elamanı (akü-ultra kapasitör) veya yardımcı çevirici kullanıp kullanmadıklarına,
- Aşama sayılarına (kullandıkları çevirici sayısına),
- Doğrudan ya da dolaylı MPPT yapabilmelerine,

göre sınıflandırılabilir.

5.5.1. Evirici yapısı ve faz sayılarına göre MPPT'li ŞEE'ler

Güneş panellerinden elde edilen enerjinin dalga formu DA'dır. Panellerin enerjiyi depolayabilme özellikleri olmadığından ve belli bir ışıyım şiddeti ve sıcaklıkta verebileceği güç miktarı sabit bir değer olduğundan çıkışına bağlanan yükün karakteristiği verimi etkilemektedir.



Şekil 5.5. Farklı evirici topolojilerinin PV akımına etkisi

Bir fazlı tam köprü şebeke etkileşimli eviricilerde panelden çekilen akımın dalga formu şebeke frekansının iki katı kadar frekanslı pozitif bölgede yarım sinüs şeklindedir. Yarım dalga eviricide ise şebeke frekansında yarı dolu sinüs şeklindedir. Bu durum Şekil 5.5’de gösterilmiştir [Kjaer ve ark., 2005]. Evirici yapısı üç fazlı köprü tipi olduğunda panelden çekilen akım doğrusala daha çok yaklaşmaktadır. Burada durum üç farklı 1 fazlı tam dalga şebeke etkileşimli evirici akımının 120 şer derece faz kaydırılıp toplanmasıyla elde edilir. Dolayısıyla çekilen akım DA üzerine binmiş şebeke frekansının 6 katında bir AA şeklinde olacaktır.

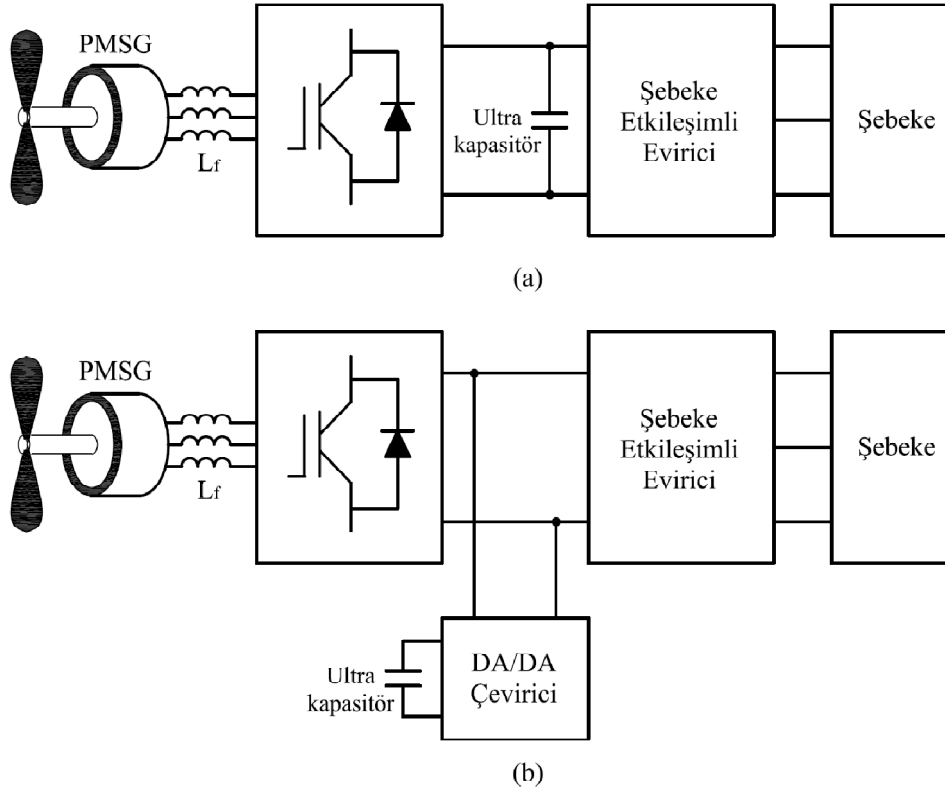
1 fazlı yarım dalga, 1 fazlı tam dalga ya da üç fazlı şebeke etkileşimli eviriciyi YEK’na bağladığımızda çekilen akımın tepe değeri MPP akımını aşmamalıdır. Sonuç olarak akım dalga formundaki DA’dan uzaklaşma oranı verim düşüklüğüne neden olmakta ve şebekeye aktarılan güç miktarının da bu dalga formu ile ilişkili oluşu sebebi ile MPPT işlemi esnasında sinüs işareti yükselirken sanki güç artıyor, sinüs işareti azalırken de sanki güç düşüyor izlenimi verdiği için MPPT algoritmasının yanlış çalışmasına sebep olmaktadır.

YEK’ten çekilen akım dalga formunun ve geriliminin doğrusallaştırılması için devreye filtre amacı ile bobin ve kondansatör eklenebilir. Bu durumunda aynı dalgacık oranını sağlayacak filtre değeri evirici yapısına göre değişmektedir. Bağlanacak filtre değeri için bir fazlı yarım dalgadan üç fazlı eviriciye doğru gidildikçe filtre değeri azalmaktadır.

5.5.2. Yardımcı sistem kullanan MPPT’li ŞEE’ler

Bir önceki bölümde evirici yapısının YEK’nın ürettiği enerjiyi verimli bir şekilde kullanmasında etkili olduğu söylenmişti. YEK’ından çekilen enerjinin doğrusallaştırılması ve ani yüklerde ya da YEK’nın ürettiği güçteki ani değişimlerde sistemi kararlı tutmak amacı ile devreye ultra kapasitör bağlamak, akü grupları eklemek, ya da başka çevirici yada çeviriciler eklemek çözüm olabilmektedir. Ultra

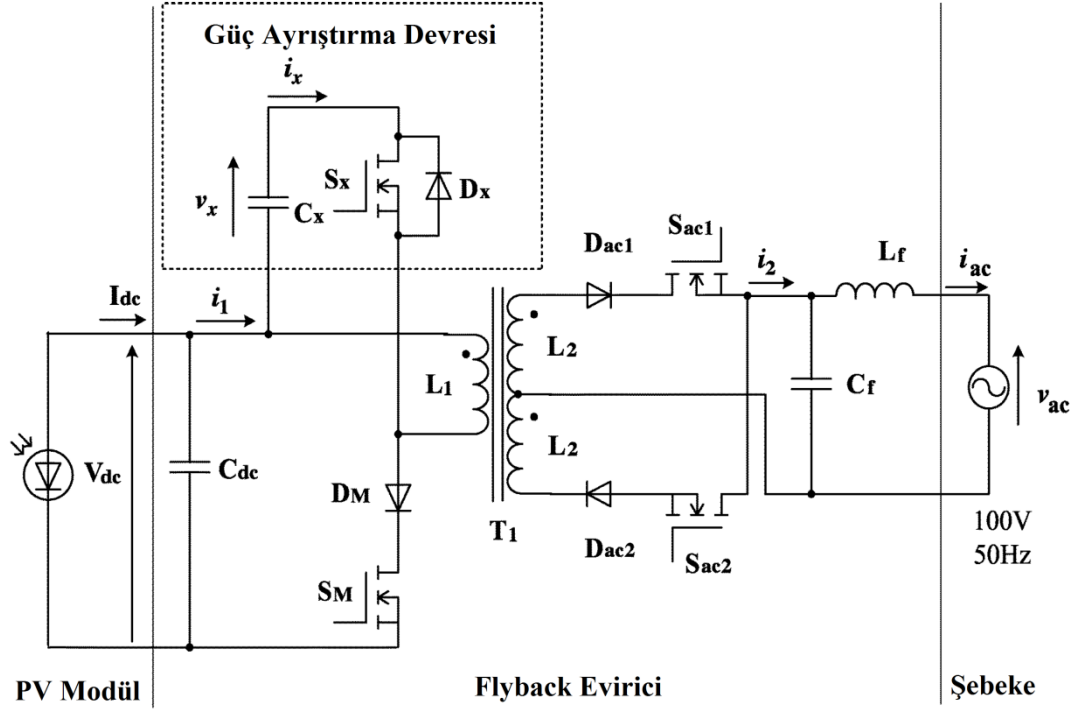
kapasitörler doğrudan yada bir DA-DA çevirici vasıtası ile evirici girişine bağlanabilmektedir [Jayasinghe ve ark., 2010]. Ancak ultra kapasitör veya akü eklemekle sistem maliyeti artmakta ve ebatlarında aşırı büyümeler olmakta ayrıca bu tip elemanların kısa kullanım ömürleri sebebiyle de tercih edilmemektedir [Shimizu ve ark., 2002]. Şekil 5.6’da ultra kapasitör bağlı sistemler görülmektedir.



Şekil 5.6. Ultra kapasitör kullanımı

- a) Ultra kapasitörün DA baraya doğrudan bağlanması
- b) Ultra kapasitörün DA baraya DA/DA çevirici ile bağlanması

Çevirici topolojileri ya da harici anahtar kullanılarak yapılan sistemlerde mevcuttur. Örnek uygulama Şekil 5.7’de verilmiştir [Shimizu ve ark., 2002]. Yapı flyback tipi çevirici olduğundan ancak düşük güçlerde uygulanabilir bir yöntemdir.



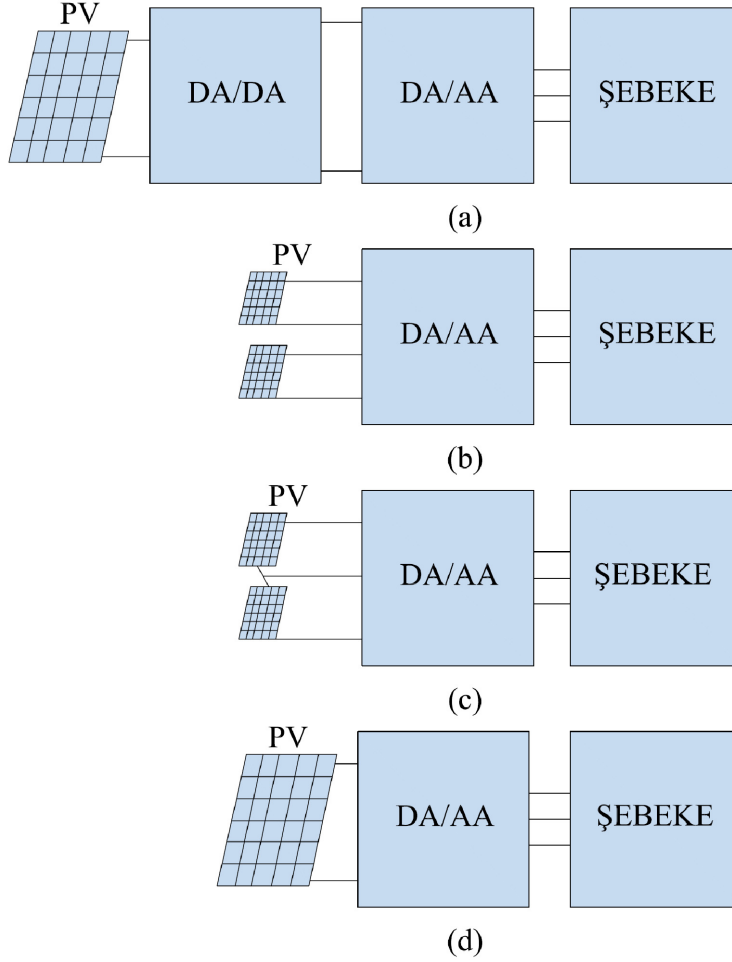
Şekil 5.7. YEK'dan çekilen akımı doğrusallaştırma için ek düzenek

5.5.3. Kullandıkları çevirici sayısına göre MPPT'li ŞEE'ler

YEK'ından üretilen enerjinin şebekeye aktarılması esnasında birkaç çevirici kullanılabildiği gibi tek çeviricide kullanılabilmektedir. Çevirici sayısı aşama olarak nitelendirilmekte olup çevirici sayısına göre tek aşamalı, çift aşamalı, üç aşamalı olarak isimlendirilmektedirler. Şimdiye kadarki çalışmalarda genelde iki veya üç aşamalı sistemler kullanılmıştır. Tek aşamalı sistemler yeni yeni kullanılmaya başlanmış ve literatürde genellikle benzetim çalışmaları ile sınırlı kalmıştır.

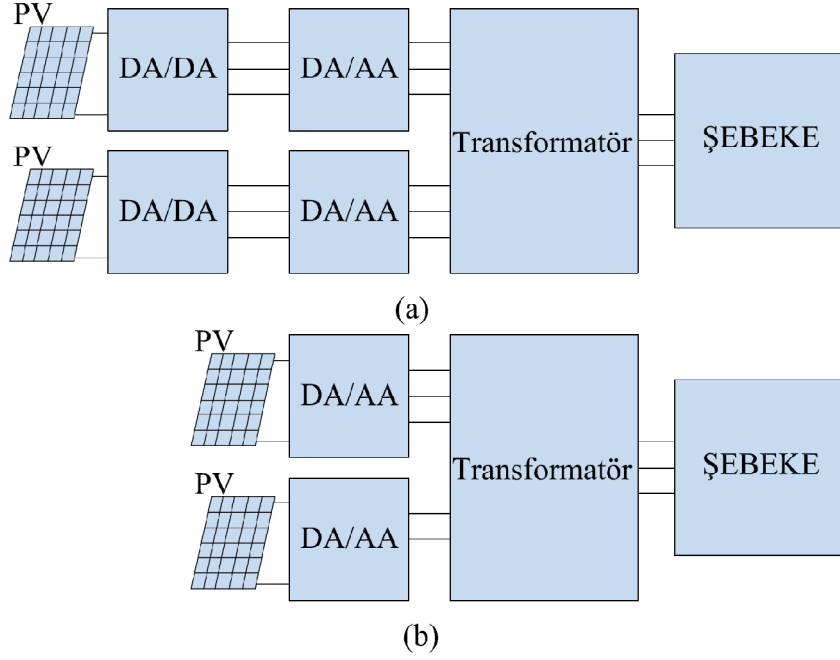
İki veya üç aşamalı çeviricilerde MPPT işlemi bir çeviriciye şebeke etkileşimli çalışma ise başka bir çeviriciye yaptırılmaktadır. Tek aşamalı sistemlerde ise MPPT işlemi ve şebeke etkileşimli çalışma aynı sistem içerisinde yapılmaktadır. Aşama

sayısı arttıkça sistem maliyeti artmakta ve verimi düşmekte bununla birlikte denetimi kolaylaşmaktadır.



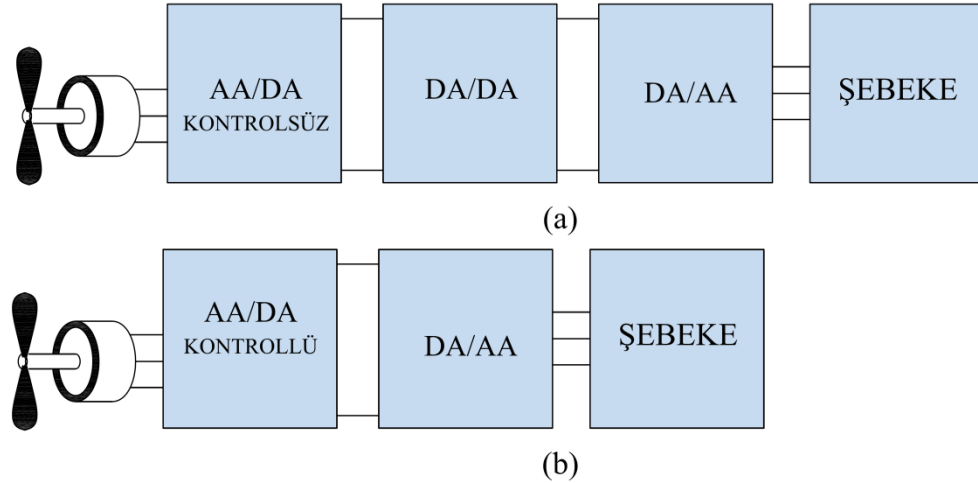
Şekil 5.8. PV kaynaklı şebeke etkileşimli evirici yapıları
a) İki aşamalı b) İzole kaynaklı c) İzole olmayan farklı kaynaklı d) Tek aşamalı

Şekil 5.8'de güneş pili ile beslenen evirici yapıları görülmektedir. Şekil 5.8 a'da iki aşamalı Şekil 5.8 b,c ve d'de tek aşamalı farklı şebeke etkileşimli evirici yapıları görülmektedir. İki aşamalı eviricide MPPT işlemi DA-DA çeviriciye yaptırılmaktadır. DA-AA evirici ise şebekeye istenilen güç faktöründe ve uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dahilinde enerji aktarımından sorumludur. Diğer yapılarda ise bu iki görev DA-AA eviriciye yüklenmiştir.



Şekil 5.9. Farklı yapılarıdaki şebeke etkileşimli eviriciler
a) Çiftli iki aşamalı b) Çiftli tek aşamalı

Güç oranlarını artırabilmek için eviriciler çok seviyeli yada Şekil 5.9'da görüldüğü gibi çiftli evirici (dual inverter) yapısında da tasarlanabilmektedir [Alonso ve ark., 2010]. Bu tür yapıların çıkış karakteristiği çok seviyeli eviricilerde olduğu gibidir.



Şekil 5.10. Rüzgâr kaynaklı şebeke etkileşimli evirici yapıları
a) Üç aşamalı b) İki aşamalı

Fotovoltaik yapılara benzer olarak rüzgâr kaynaklı şebeke etkileşimli eviricilerde de farklı topolojiler mevcuttur. En sık rastlanan iki topoloji Şekil 5.10'da verilmiştir. Bunlardan birincisi üç aşamalı diğeri ise iki aşamalı çeviricilere örnek olarak verilebilir. Burada tek aşamalı çeviriciden bahsetmek mümkün değildir. Çünkü bahsi geçen rüzgâr generatörünün çıkışı değişken frekanslı AA olduğundan en az iki aşama gerekmektedir.

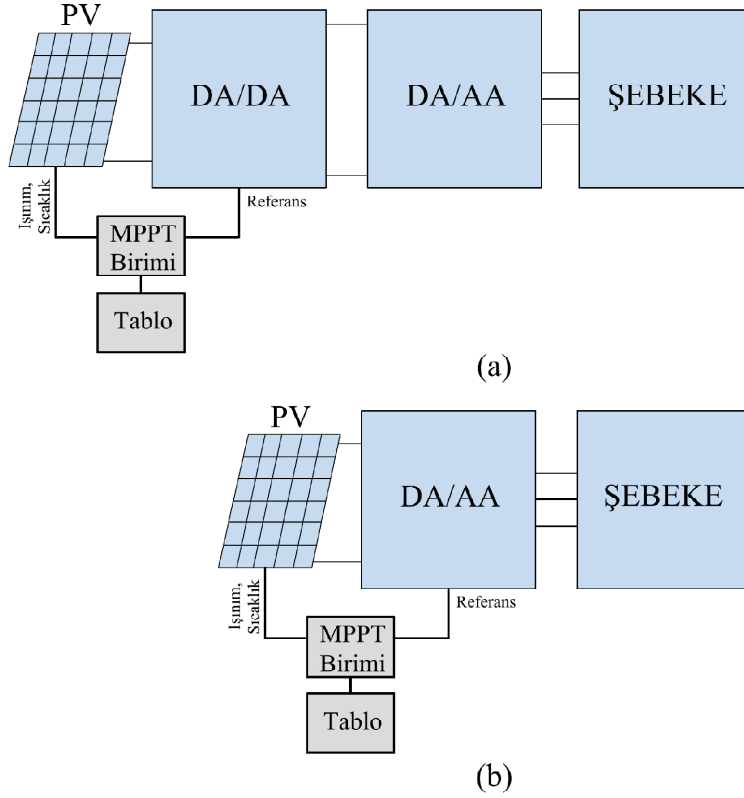
5.5.4. Doğrudan ya da dolaylı MPPT yapabilen ŞEE'ler

Dolaylı (offline yada seeking) denetim tekniği PV karakteristiğine dayalı olarak deneysel sonuçlarla oluşturulmuş tabloları, modül açık devre gerilimi, modül kısa devre akımı, ışıınım şiddeti, modül sıcaklığı gibi değerleri direkt yada matematiksel eşitlikler yardımı ile kullanarak MPPT noktasını tahmin etmeye dayalı bir yöntemdir. Dolaylı denetim tekniğinde PV çıkış gerçek gücü sürekli olarak hesaplanmaz. Bu yöntemle yaklaşık MP noktası bulunur. Işınım şiddeti ve sıcaklık okunarak bulanık mantık denetimli bir yapı örneği sunulmuştur [Chaouachi ve ark., 2010].

Doğrudan (online yada true seeking) denetim metodu PV gerilim ve/veya akım değerlerini kullanır. Çalışma noktalarının değiştirilmesi ile en uygun nokta yakalanmaya çalışılır. Bu yöntemle gerçek MP noktası bulunur. Ancak MP noktası etrafında sürekli osilasyon oluşur. Bu yöntemin en önemli avantajı PV üreteç karakteristiği, sıcaklık, ışıınım şiddeti gibi değişkenlerden uygun noktanın yakalanması açısından etkilenmemesidir. Doğrudan denetim tekniği ile oluşturulan sistemler sürekli olarak PV çıkış gücünü okuyarak önceki çıkış gücü ile karşılaştırıp MPPT noktasına ulaşmayı sağlayacak dönüştürücü referans sinyali oluşturur.

Dolaylı denetim tekniğinde sistem hızı oldukça yüksektir. Bu denetim tekniğinde okunan girdiler karşılığında yapılması gereken işlem referans işaretini ya tablodan ya da denetleyici tarafından kolayca işlenebilen matematiksel eşitlik ile bulmak şeklindedir. Ancak dolaylı denetim tekniğinde sistemin tam modellenememesi,

kirlilik, gölgelenme, yaşlanma gibi etkilerden kaynaklanan parametre değerlerine uyum sağlayamaması sistemi olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla sistem tarafından üretilen ve MPPT noktasını göstermesi gereken referans değeri yanlış hesaplanabilmektedir.

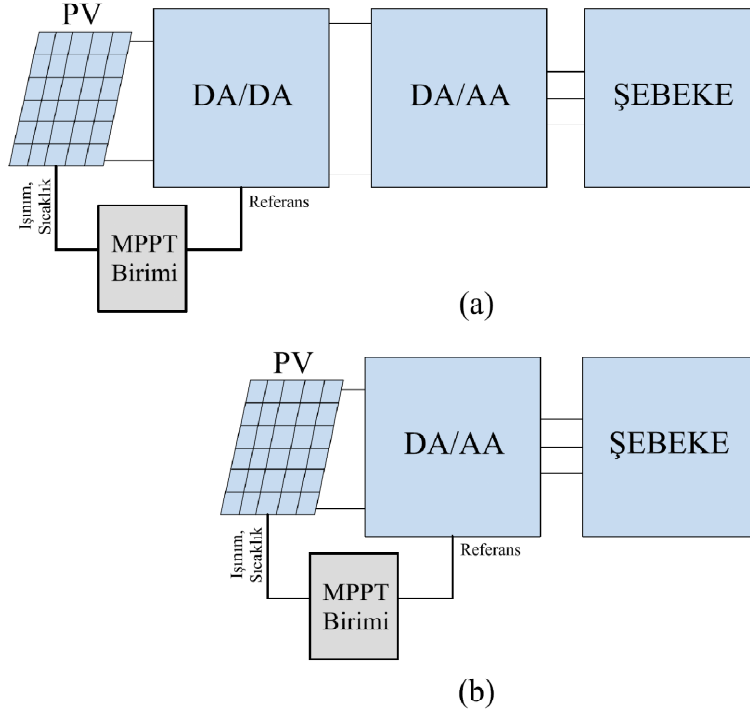


Şekil 5.11. Tablo metodları ile MPPT yapan evirici

- a) Tek aşamalı evirici yapısı
- b) İki aşamalı evirici yapısı

Şekil 5.11’de LUT yöntemi ile MPPT yapan çeviriciler görülmektedir. PV panelden okunan sıcaklık ve ışınım şiddeti ve benzeri bilgileri daha önceden hazırlanmış olan tablo yardımı ile değerlendirilir. Okunan sıcaklık ve ışınım bilgisine karşılık gelen referans sinyal çeviricinin denetim sinyalini oluşturur.

Her ışınlm ve sıcaklık bilgisine karşılık referans bilgisinin tutulması büyük hafıza gereksinimini de beraberinde getirir. Ayrıca dolaylı denetim tekniği grubunda olan bu yöntem kirlenme, yaşlanma gibi çevresel koşullardan etkilenir.

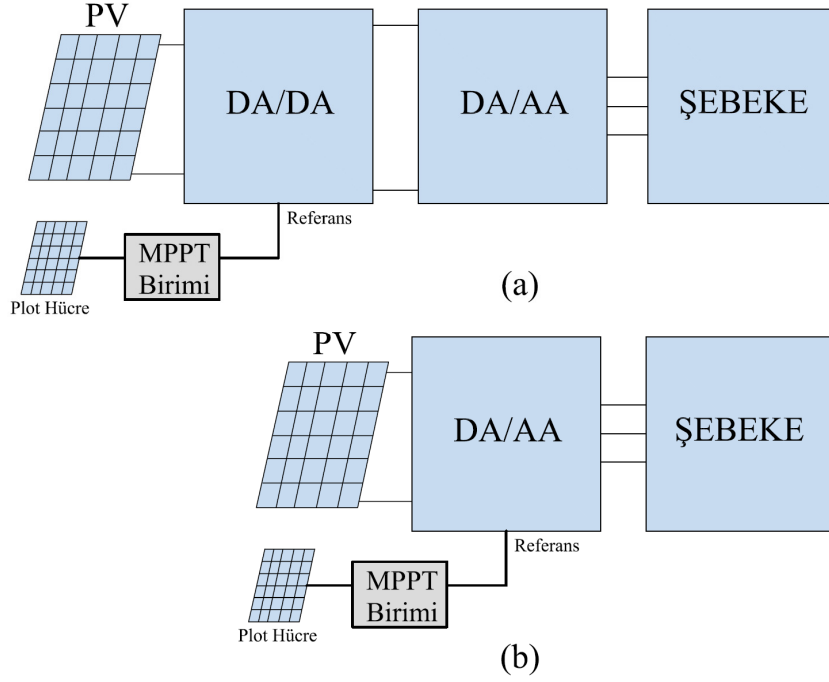


Şekil 5.12. Matematiksel eşitlik metodları ile MPPT yapan evirici

- a) Tek aşamalı evirici yapısı
- b) İki aşamalı evirici yapısı

Şekil 5.12’de eğri uyarlama gibi matematiksel eşitlikleri kullanarak MPPT yapan çeviriciler görülmektedir. PV panelden okunan sıcaklık ve ışınlm şiddeti bilgileri panel üretici bilgilerinden yararlanarak oluşturulmuş matematiksel eşitlikler yardımı ile değerlendirilir. Okunan sıcaklık ve ışınlm bilgisinin eşitlikte yerine konulması ile elde edilen sonuç çeviricinin denetim sinyalini oluşturur.

PV panelin tam modellenememesi referans sinyalin yanlış hesaplanmasına neden olmaktadır. Ayrıca dolaylı denetim tekniği grubunda olan bu yöntem kirlenme, yaşlanma gibi çevresel koşullardan etkilenir.

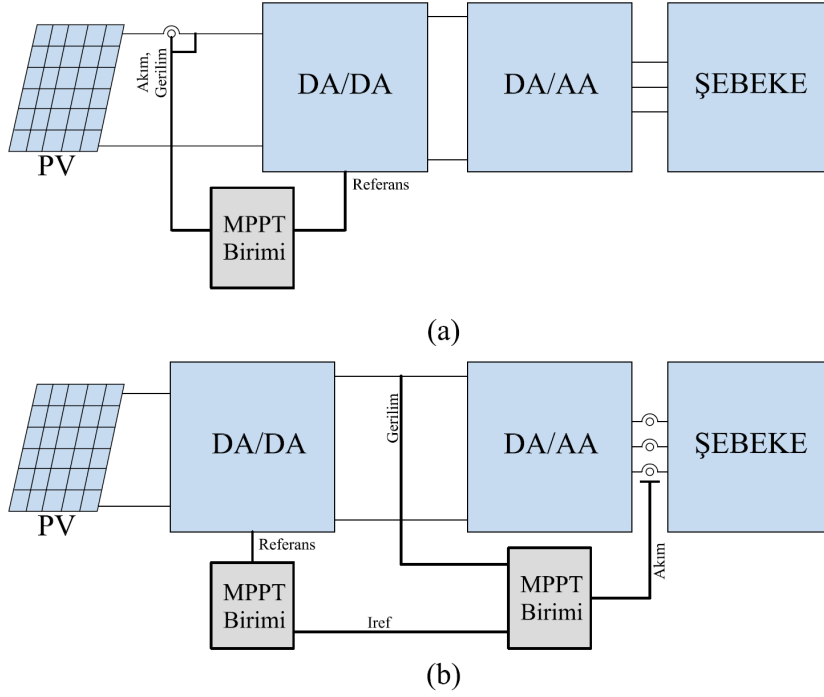


Şekil 5.13. Pilot hücre metodları ile MPPT yapan evirici

- a) Tek aşamalı evirici yapısı
- b) İki aşamalı evirici yapısı

Şekil 5.13’de örnek hücre yada pilot hücre adı ile bilinen yöntem ile MPPT yapan çeviriciler görülmektedir. Örnek hücre PV panelin küçültülmüş bir modelidir. MPPT işlemini genellikle dolaylı yöntem grubunda olan CV ve CC yöntemleri ile yapmaktadırlar. Ancak doğrudan yada dolaylı yöntemlerden her hangi biri de uygulanabilir. Örnek hücre yöntemi ile bulunan referans skala edilerek ana PV panelin referansı belirlenir.

Örnek panel ile ana panel üzerine düşen ışıınım açılarının eşit olmayışı, kirlenme, sıcaklık farkı gibi faktörler referansın yanlış hesaplanmasına neden olur. Bu yüzden bu yöntem dolaylı denetim teknikleri grubundadır.



Şekil 5.14. Sık uygulanan iki aşamalı evirici yapıları

- a) Doğrudan denetimli MPPT yapabilen iki aşamalı evirici
- b) DA bara düşüm metodu ile MPPT yapan evirici

Şekil 5.14 a'da PV panel çıkış gerilimini ve akımını değerlendirip anlık olarak en yüksek gücün çekilmesi için gereken referansı belirleyen yapı görülmektedir. Burada P&O, IC yada FLC yöntemlerinden biri kullanılabilir. Şekil 5.14 b'de verilen MPPT tekniğinde ise gerçek MPPT yapamayan ancak panel bağımsız yöntemlerden olan DA bara düşüm metodu ile yapılan MPPT işlemi görülmektedir. Bu yöntemde DA/DA çevirici (boost çevirici) çıkışındaki gerilim DA/DA çevirici DGM oranı ile sabit tutulur. Bu durumda evirici AA sisteme enerji vermeye başlar. DA bara geriliminin sabit kalamadığı yere kadar enerji aktarılmaya devam edilir. DA bara gerilimi düşmeye başladığında evirici bu güçten fazlasını aktarmaya çalışmaz dolayısıyla en yüksek güç noktası bulunmuş olur [Esram ve Chapman, 2007].

Şekil 5.11 a, Şekil 5.12 a, Şekil 5.13 a ve Şekil 5.14 a ve b'de verilen yöntemlerde DA/DA çevirici kullanılmaktadır. Bu ise sistem toplam verimini düşürmekte ve maliyetini artırmaktadır.

5.6. MPPT Yapabilen Şebeke Etkileşimli Eviriciler

MPPT yapabilen şebeke etkileşimli eviricinin tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekilde sıralanabilir:

PV panelden elde edilen enerjinin şebekeye aktarılması için çoğunlukla iki aşamalı çeviriciler (DA/DA/AA) kullanılmıştır. Şekil 5.8 a ve 5.10 a en sık kullanılan yapıdır. Ancak her bir enerji çevrim işleminde çevirici verimi toplam sistem verimini etkilediğinden tek aşamalı çeviricilerin verimleri iki aşamalı çeviricilere göre %4-10 daha yüksek olduğu rapor edilmiştir[Patel ve Agarwal, 2009]. Dolayısıyla bu yapılarla yapılacak MPPT işleminin verimi düşük olacaktır. Buradan tasarlanacak MPPT yapabilen şebeke etkileşimli sistemin tek aşamalı olmasının hem verimin yüksek olması hem de kurulum maliyetinin düşürülmesinde daha avantajlı olacağı söylenebilir.

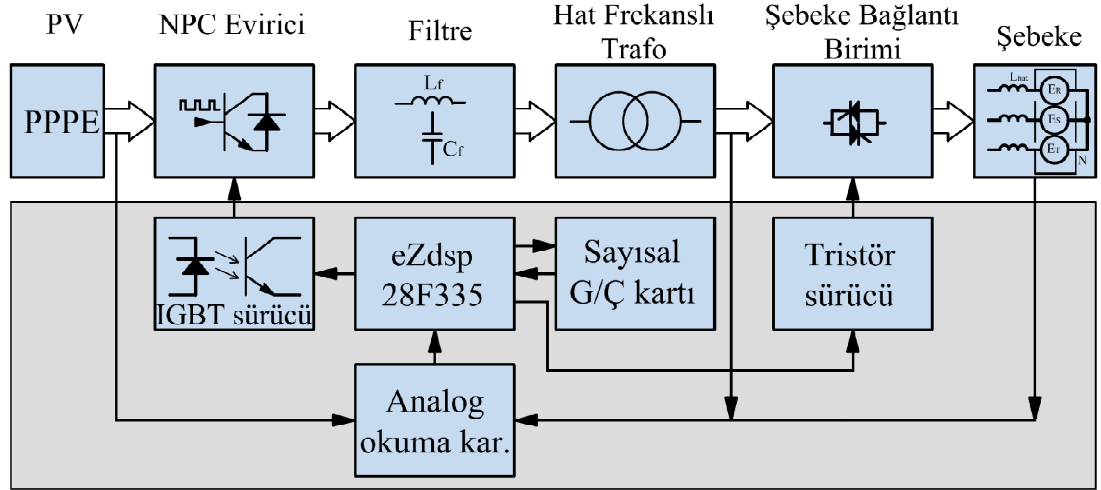
Çok seviyeli eviriciler iki seviyeli eviricilere göre daha fazla donanım (anahtar, kondansatör, sürücü v.b) içermesi, sistemin daha karmaşık olması gibi olumsuzlukları olmasına rağmen çıkış gerilim harmoniklerinin düşük olması, anahtarlama frekansının düşük olması, daha küçük anahtarlarla daha yüksek gerilimlere dolayısıyla güçlere erişimin kolaylaşması, aynı frekans değeri için daha küçük filtre gereksinimi, düşük dv/dt oranı gibi avantajları vardır [Rodriguez ve ark., 2002; Dixon ve Morán, 2006; Nami ve ark., 2008; Suh ve ark., 1998; Lin ve ark., 2004]. Bununla birlikte yapılan çalışmalarda düşük gerilim uygulamalarında da üç seviyeli topolojilerinin iki seviyeli eviricilere alternatif olabileceği, eleman sayıları, filtre boyutları, verimleri gibi değerler incelendiğinde orta ve yüksek frekans bölgesinde çalışmada üç seviyeli topolojilerin şebeke, sürücü, doğrultucu uygulamaları için daha ekonomik olabileceği belirtilmiştir [Teichmann ve Bernet, 2005; Teichmann ve ark., 2005]. Buradan tasarlanacak MPPT yapabilen şebeke etkileşimli sistemin her geçen gün artan güç miktarları ve ticari çok seviyeli modül

tasarımın gelişiminin de etkisi ile çok seviyeli yapılar kullanarak yapılmasının hem ekonomik açıdan hem de verim açısından daha uygun olduğu söylenebilir.

MPPT teknikleri dolaylı ve doğrudan yöntemler olarak iki ana grupta toplanabilir. Doğrudan denetim yapan sistemler gerçek MPPT yapabilir. PV panelin karakteristik özelliklerinden bağımsızdır, her PV panel için rahatlıkla kullanılabilir ve periyodik ayar gerektirmez. PV panelin yaşlanması v.b. etkilerden etkilenmezler, gerçek MPPT yaptıklarından verimleri yüksektir. Dolaylı yöntemler hızlı olmalarına karşın panel bağımlı sistemler olup çevresel etkilerden etkilenir, gerçek MPPT yapamayıp yaklaşık MP noktasını bulurlar. Dolayısıyla bu yöntem veriminin daha düşük olduğu söylenebilir. Buradan tasarlanacak sistemin doğrudan denetim tekniği ile denetlenmesi gerektiği çıkarımı yapılabilir. MPPT yapabilen iki aşamalı şebeke etkileşimli eviricilerde çoğunlukla dolaylı yöntemler kullanılmış olup doğrudan yöntemler kullananların sayısı da azımsanmayacak niceliktedir. Ancak tek aşamalı iki seviyeli ve çok seviyeli şebeke etkileşimli eviricilerde doğrudan yöntemler ile MPPT yapabilen sayısı çok az olup çok seviyeli eviricilerde çalışmalar daha çok kaskat H köprüsü ile yapılmıştır. NPC ile sınırlı sayıda benzetim çalışmaları bulunmaktadır. Kaskat H köprü tipi eviricilerde de izole iki kaynak gerekliliği olması dezavantajlarındanır. Şekil 5.8 c'deki gibi bir yapıda NPC uygulaması yapılmış ancak akım harmonikleri bakımından standartları sağlayamamaktadır [Alonso ve ark., 2010]. Ayrıca bu yapıda iki farklı PV panel grubunun gerektiği görülmektedir. Buradan tasarlanacak sistemin şebeke bağlantı koşullarını sağlayabilen, doğrudan denetimli MPPT yapabilen ve tek bir panel grubu ile çalışabilen bir evirici olması gerektiği söylenebilir.

6. ÜÇ FAZLI ÜÇ SEVİYELİ ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ TASARIMI

Şekil 6.1’de tasarlanan yenilenebilir enerji kaynağından beslenen üç fazlı üç seviyeli nötr noktası tutmalı şebeke etkileşimli evirici genel yapısı verilmiştir.

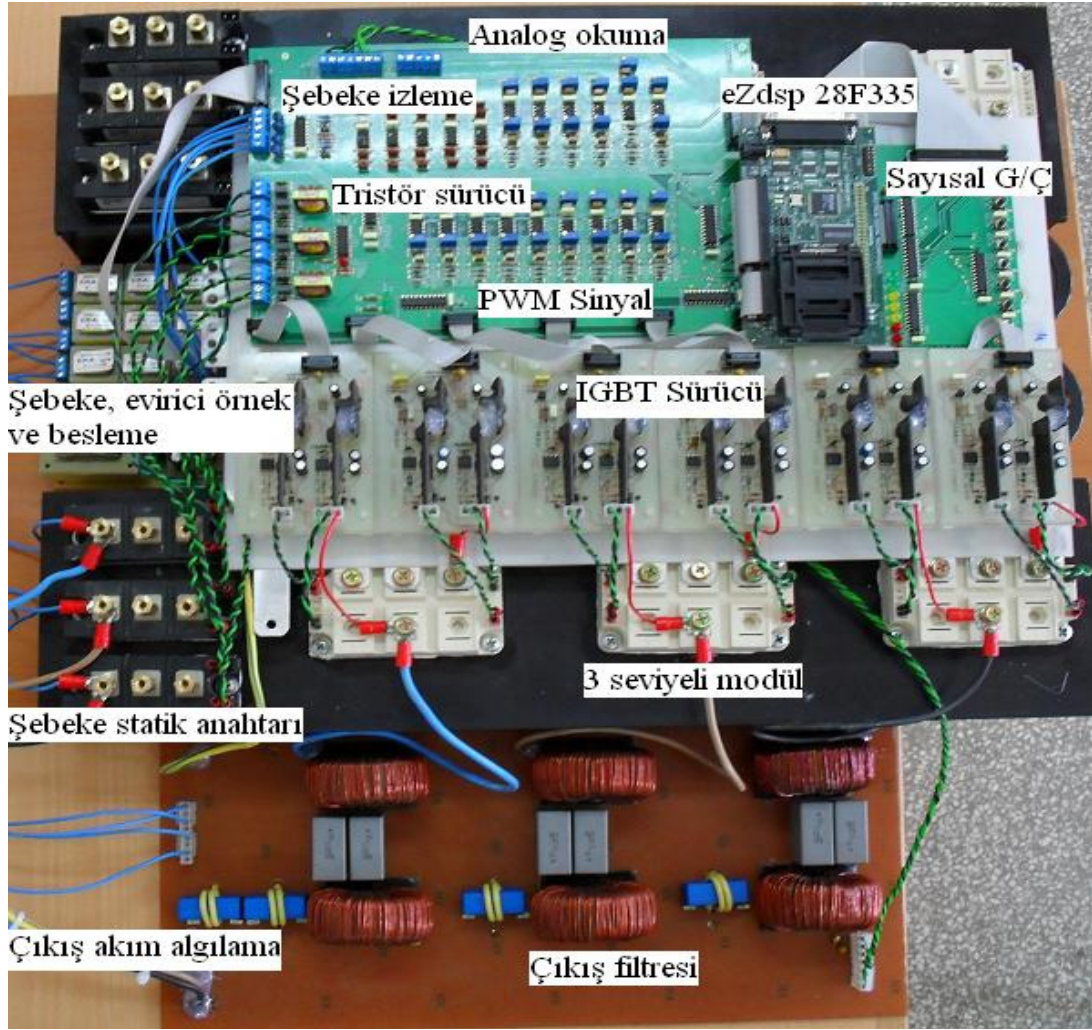


Şekil 6.1. Uygulama devresi prensip şeması

Tasarlanan üç fazlı üç seviyeli şebeke etkileşimli evirici altı kısımda incelenebilir.

1. Besleme kaynağı olarak kullanılan fotovoltaiik emülatör,
2. Evirici güç anahtarlarının bulunduğu güç katı,
3. DA bara ve evirici çıkış filtreleri,
4. Sayısal giriş/çıkış üniteleri ile şebeke ve evirici akım gerilim okuma birimi,
5. eZdsp F28335 denetim kartı
6. Şebeke bağlantı ünitesi.

Şekil 6.2'de tasarlanan sistemin resmi görülmektedir.

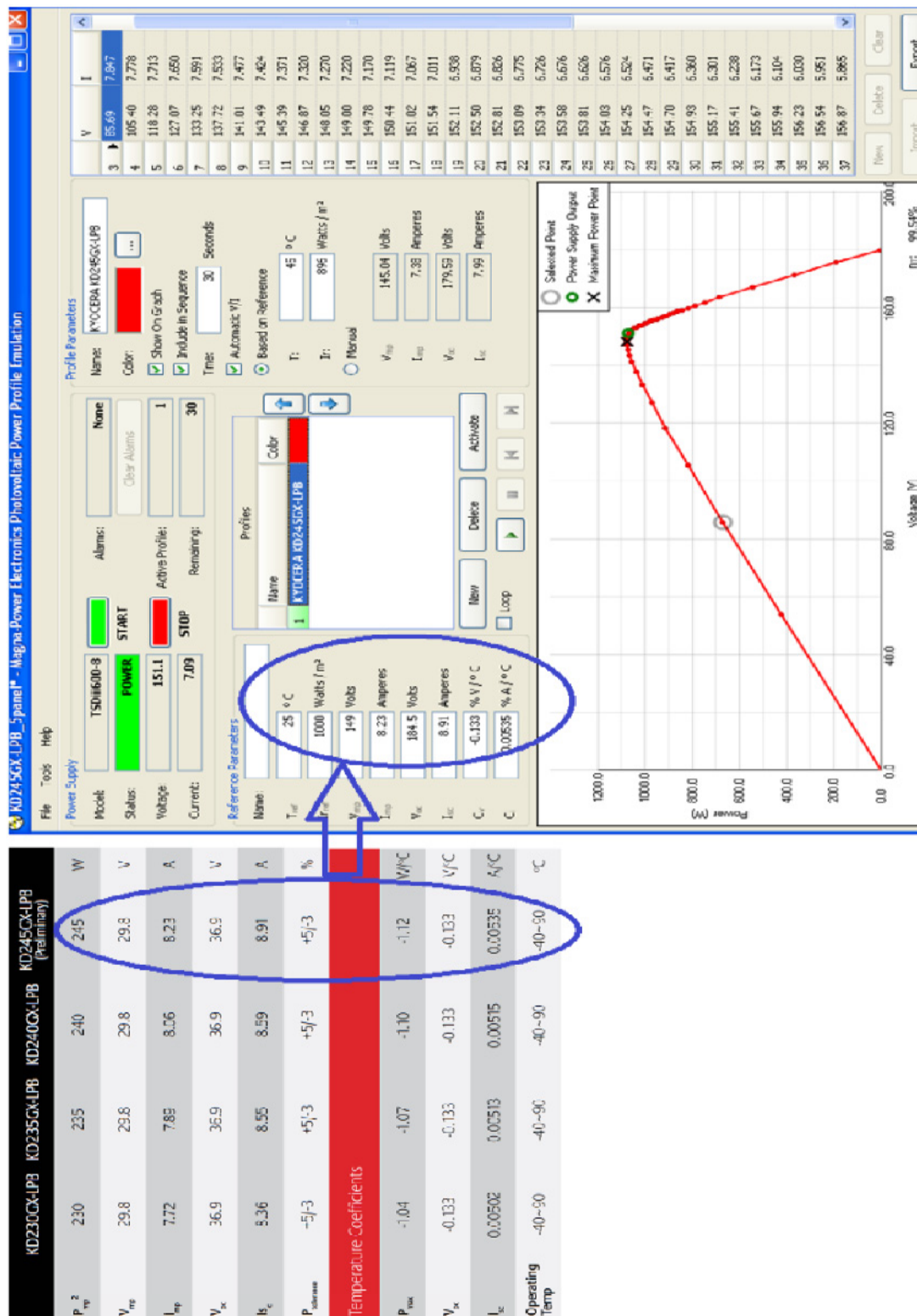


Şekil 6.2. Üç Fazlı Üç Seviyeli Şebeke Etkileşimli Evirici Uygulama Devresi

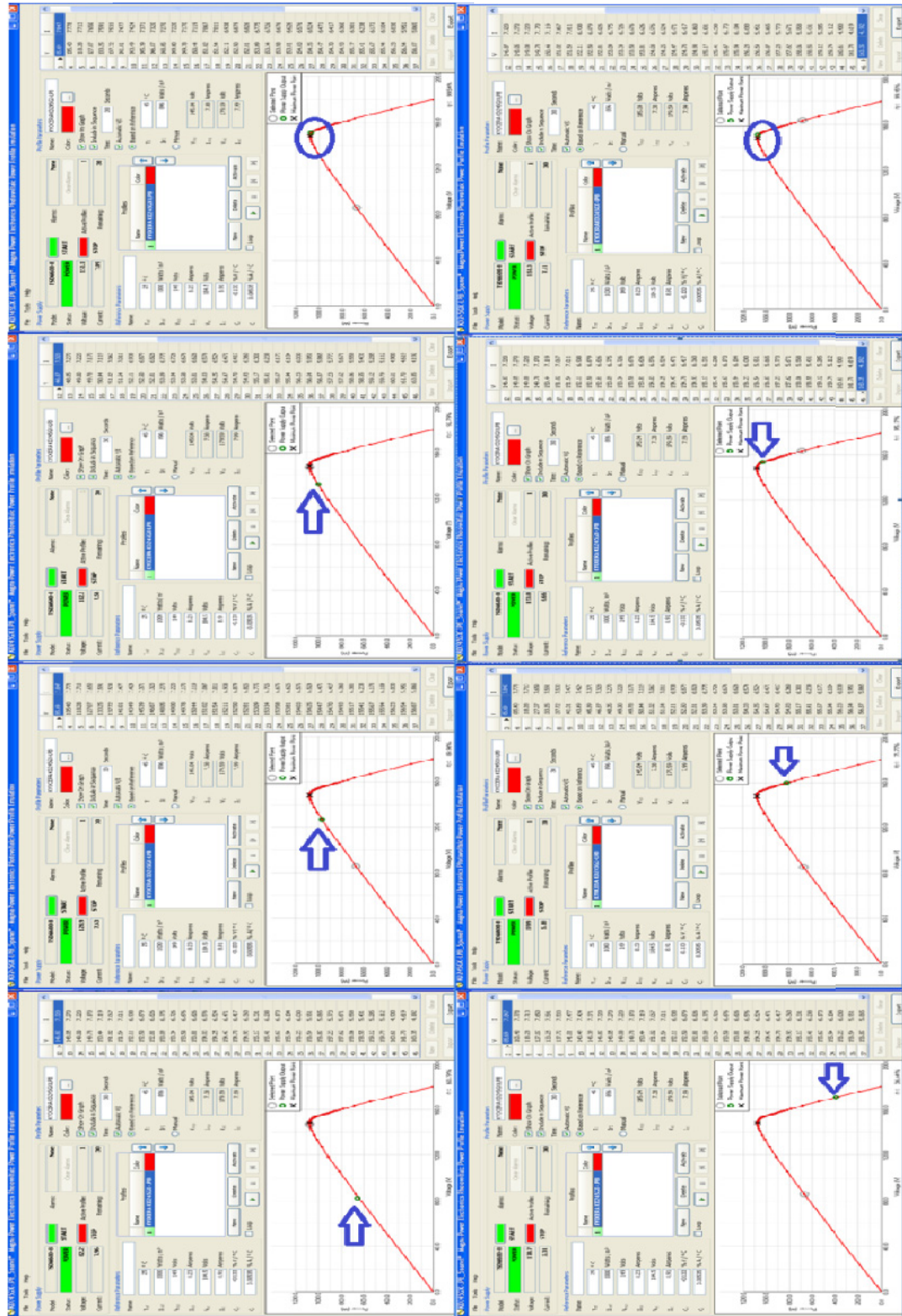
6.1. Fotovoltaik Emülatör

Önceki bölümlerde anlatıldığı gibi PV verimi panel çıkış elektriksel gücünün panel yüzeyine gelen ışıyım şiddetine oranı olarak verilmektedir. Katalog değeri belirlenirken de belirli bir sıcaklıkta panel yüzeyine dik açı ile gelen 1000 W/m^2 ışıyım şiddetindeki çıkış elektrik gücü esas alınmaktadır. Ancak bu değer sabit olmayıp panel sıcaklığı, panele düşen ışıyımın açısı, ışıyım şiddeti, kirlenme, gölgelenme, yaşlanma v.b. etkilere göre değişmektedir. Ayrıca uygulamaya göre bir ya da birden fazla PV panel seri ve/veya paralel bağlanarak çıkış akımı/gerilimi

dolayısıyla gücü artırılmaktadır. Ticari olarak üretilen PV panellerin çıkış gerilimleri ve akımları değişkenlik göstermektedir. Tasarlanan sistemin farklı atmosfer koşullarında, farklı PV panel yapıları ile denenebilmesi ve çalışma noktasının MP noktası olup olmadığının görülebilmesi amacıyla güneş pilleri gibi davranabilen MAGNA-POWER firmasına ait TDS III 600-8 model Güneş Pili Güç Emülatörü (PPPE) kullanılmıştır. Adı geçen DA kaynak tıpkı güneş pili gibi davranabilmektedir. Ticari olarak üretilen güneş panellerinin katalogunda yer alan I_{mppt} , V_{mppt} , V_{oc} , I_{sc} , $T_{katalog}$, $T_{çalışma}$, katalog ışık şiddeti, çalışma ışık şiddeti, sıcaklık ve ışıyım katsayıları vb. değerleri ile bu panellerin kaçar adet seri ve paralel bağlanacağı bilgiler kaynağın bilgisayar arayüz programı yardımıyla girilebilmektedir. PPPE bu girilen değerlere göre bir MPPT eğrisi üretmekte başka bir ifade ile belirlenen güneş pili karakteristiğine göre çıkış gerilimi ve akımını değiştirmektedir. Bilgisayar ara yüzü ile çalışma esnasında ışıyım ve sıcaklık şiddeti parametreleri değiştirilebilmekte böylece farklı atmosfer koşulları oluşturulabilmektedir. Çalışmalar süresince, KYOCERA marka KD245GX-LPB model ve SHARP marka ND-U216C1 model PV panellerin katalog verileri kullanılarak sistemde ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Şekil 6.3'de sol tarafta işaretlenen bölümde KYOCERA KD245GX-LPB modeli güneş panelinin katalog bilgileri görülmektedir. Şekil 6.3'in sağ tarafında görülen bilgisayar ekranı ise PPPE yazılımının arayüzüdür. Burada işaretlenen bölüme katalog verileri girilerek Şekil 6.3'nin sağ alt kısmında görülen MP eğrisinin oluşması sağlanmıştır. Bu eğride yatay eksen PV çıkış gerilimini dikey eksen ise PV çıkış gücünü göstermektedir.



Şekil 6.3. PV panel verilerinin PPPE'e girilmesi



Şekil 6.4. PPPE çıkış gerilimi ve gücünün MP eğrisini üzerindeki değişimi.

Şekil 6.4 de PPPE'ün tasarlanan sistemle çalışması görülmektedir. Emülatör çıkış gerilimi ve gücü anlık olarak bilgisayar ara yüzünden görülmektedir. Buradan çalışma noktasının MP eğrisin hangi bölgesinde olduğu takip edilebilmektedir. Şekil 6.4'ün üst kısmındaki dört resimde çalışma noktası MP noktasının solunda iken evirici denetim işaretinin değiştirilmesi ile birinci şekilden dördüncü şekle doğru MP noktasına ulaşıldığı görülmektedir. Yine Şekil 6.4'ün alt kısmında bulunan dört resimde ise MP eğrisinin sağındaki bölgede çalışılırken yine evirici denetim işaretlerinin değiştirilmesi ile birinci şekilden dördüncü şekle doğru MP noktasına ulaşıldığı izlenmektedir.

6.2. Güç Katı

Nötr noktası tutmalı evirici güç katı anahtarlama elemanları, statik açma-kapama birimi, soğutucu blok, bara sistemi, filtre ve snubber kondansatörlerinden oluşmaktadır.

Anahtarlama elemanı olarak SKM 200 MLI 066 T modeli IGBT modül kullanılmıştır. Bu modül NPC eviriciler için üretilmiştir. NPC eviricinin bir kolunda bulunan dört IGBT ve 2 tutma diyodu ile dört serbest dönüşüm diyodunu içermektedir. Ayrıca modül sıcaklığı ölçümü içinde bir PTC içermektedir. IGBT'ler 200 A, 600 V'dur. Soğutucu olarak alüminyum soğutucular kullanılmıştır. IGBT modüller ile tristör modüller bu soğutucu üzerine yerleştirilmiştir. DA bara üzerine DA gerilimi filtrelemek amacıyla 2 adet ALS30 serisi BHC 450 V, 3300 uF kondansatör kullanılmıştır. Anahtarlama elemanlarının korunması amacı ile her bir IGBT modül için 1 uF 1000 V C tipi snubber kondansatörü takılmıştır. DA kondansatörleri, IGBT ve besleme kaynağının birleştirilmesi için bir DA bara oluşturulmuştur. DA bara (-) barası, (+) barası ve nötr barasından oluşmaktadır. Bu baralar sandwich bara sistemi ile oluşturularak kapasitif etki üretilmiştir ve böylece güç anahtarlarının mümkün olan en yakınındaki kapasitif etki artırılmıştır.

6.3. Filtreler

Uygulama devresinde iki adet filtre bulunmaktadır. Bunlardan birincisi DA gerilimi süzmek için kullanılan DA bara kondansatörleri, diğeri ise evirici çıkış filtresidir.

6.3.1. DA bara kondansatörü

Tasarlanan sistem gücü $P=1000$ W, DA bara geriliminin en yüksek değeri $V_{oc}=V_{max}=183,5$ V nominal çalışma gerilimi $V_n=V_{mpt}=151$ V, en düşük çalışma gerilimi V_{min} ise en yüksek akımın çekildiği değer olan V_n değeri ile aynı seçilirse DA baraya bağlanacak kondansatör değeri için Eş. 6.1'e göre hesaplanabilir. F değeri ise evirici çıkış frekansı olan 50 Hz'nin 6 katı olacağından 300 Hz olarak bulunur ve bu değer Eş. 6.1'de yerini yazıldığında Eş. 6.2 elde edilir.

$$C = \frac{\frac{1}{F}}{\frac{V_n^2}{P} \cdot \ln\left(\frac{V_{max}}{V_{min}}\right)} \quad (6.1)$$

$$C = \frac{\frac{1}{300}}{\frac{151^2}{1000} \cdot \ln\left(\frac{183,5}{151}\right)} = 0.000749,5 \text{ Farad} = 749,5 \text{ uF} \quad (6.2)$$

Kondansatörlerin üzerinde depolanan enerji gerilimin karesi ile değiştiğinden ve çalışma gerilimi 151 V iken deney düzeneği için kullanılan kondansatörün farklı uygulamalarda da çalışabilmek amacı ile 450 V değerinde seçilmesi nedeni ile 749,5 uF kondansatörün sağladığı enerjiyi sağlayacak 450 V'luk kondansatörü için Eş. 6.3 yazılabilir.

$$C_{DA} = C \cdot \frac{450^2}{151^2} = 749,5 \frac{450^2}{151^2} = 6660 \text{ uF} \quad (6.3)$$

Eş. 6.3 ile elde edilen kapasite değeri gerekli minimum kapasite değerini vermektedir. Bunun yanında kondansatörlerin ripple akım hesabının da yapılması gerekmektedir. Doğru sonuç ancak hem kapasite yönünden hem de ripple akım yönünden uygun olan kondansatör seçimi ile mümkün olacaktır. Gerekli ripple akım değerini bulmak için Eş. 6.4'den faydalanılabilir [BHC Aerovox, 2013].

$$I_{ripple} = \sqrt{\frac{F.A^2.B^2}{100.(B^2-A^2)+(F.A^2)}} \quad (6.4)$$

Burada A 100 Hz'deki ripple akım, B 10 kHz'deki ripple akım, F ise kondansatör ripple frekansıdır. ALS 30 serisi 450 VDA BHC kondansatörünün üretici bilgilerinde 85 C°'deki A ve B değerleri 13,8 A ve 21,2 A olarak verilmiştir. F değeri ise evirici çıkış frekansı olan 50 Hz'nin 6 katı olacağından 300 Hz olarak bulunur ve bu değer Eş. 6.5'de yerine yazılırsa;

$$I_{ripple} = \sqrt{\frac{300.13,8^2.21,2^2}{100.(21,2^2-13,8^2)+(300.13,8^2)}} = 17.58 \text{ A} \quad (6.5)$$

olarak bulunur. Bulunan bu değer 85 C°'deki sıcaklığa göre hesaplandığından ayrıca bir katsayı ile çarpmaya gerek yoktur. İhtiyaç duyulan I_{ripple} akımı en yüksek I_{mppt} akımından küçük olduğundan kondansatör kapasite hesabından çıkan değer belirleyici olmaktadır. 6660 uF değerine en yakın kondansatör değeri olan 2 adet 3300 uF 450 VDA kondansatör seçilmiştir.

6.3.2. Evirici çıkış filtresi tasarımı

Eviriciler için kullanılan farklı yapıda filtreler bulunmaktadır. En fazla kullanılan filtre yapıları LC ve LCL filtrelerdir. Standart eviricilerde LC filtre kullanımı yaygındır. Ancak bu filtrelerin rezonans frekansı şebeke frekansı ile değişir [Raoufi ve Lamchich, 2004; Sefa ve ark., 2011]. Bu ise şebeke etkileşimli evirici

uygulamalarında sorun oluşturmaktadır. LCL filtreler şebeke empedans değişimlerine karşı daha dayanıklıdır. Dolayısıyla şebeke etkileşimli eviriciler için oldukça idealdir. Daha düşük frekans değerinde filtre boyutları küçülerek daha az harmonik bozunum oluşturlar [Sefa ve ark., 2011; Serpa ve ark., 2007; Raoufi, ve Lamchich, 2004]. Üçüncü mertebeden bir filtre olan LCL filtrenin rezonans frekansı şebeke empedans değişiminden çok az etkilenir ve bu değer filtre değeri ile doğrudan ilişkilidir. Rezonans frekansının anahtarlama frekansının yarısından küçük çıkış frekansının 10 katından büyük olması istenir. Eş. 6.6 ve Eş. 6.7’de f_l şebeke frekansı, f_r rezonans frekansı ve f_s ise anahtarlama frekansdır. Eşitliklerde LCL filtre için rezonans frekansı ve anahtarlama frekansı arasındaki ilişki verilmiştir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \quad (6.6)$$

$$10f_l \leq f_r \leq f_s/2 \quad (6.7)$$

Belirli bir güç için devre empedans hesaplanabilir. Bu empedans değerindeki endüktans ve kapasitans değerleri çıkış frekansının da bir fonksiyonu olarak Eş. 6.8 ve Eş. 6.9 daki gibi hesaplanabilir.

$$L = \frac{Z}{2\pi f_l} \quad (6.8)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f_l Z} \quad (6.9)$$

Şebeke etkileşimli eviricilerde evirici çıkışındaki filtre kondansatörü güç katsayısını düşürdüğünden hesaplanan kondansatörü değerinin % 5’i kadarlık bir kondansatörün takılması önerilmektedir [Liserre ve ark., 2005; Sefa ve ark., 2011]. Benzer bir şekilde evirici çıkışındaki endüktans değerinin büyük olması gerilim düşümünün

artmasına neden olur. Bu ise DA baradan elde edilebilecek en yüksek çıkış AA gerilim seviyesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu sebepten aynı AA gerilimi elde edebilmek için ya DA bara seviyesi yükseltilmeli yada bu endüktans değeri düşürülmelidir. Ayrıca endüktans değerinin yüksek olması evirici veriminin düşmesine de neden olmaktadır. Bu etkileri ortadan kaldırmak amacı ile evirici çıkışında kullanılacak endüktans değeri en fazla hesaplanan değerin %10'u kadar seçilir [Lee ve ark., 2007; Sefa ve ark., 2011].

6.4. Giriş/çıkış Üniteleri

Denetim yazılımının ihtiyaç duyduğu ve ürettiği sinyaller şu şekilde gruplanabilir:

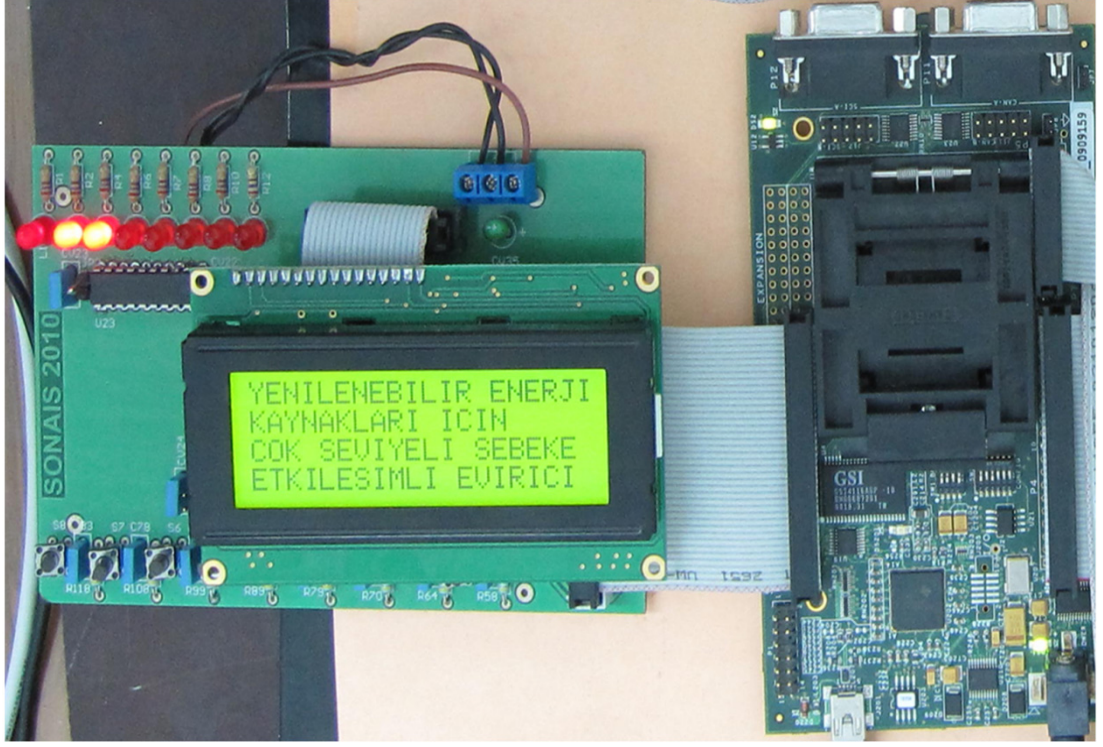
- Açma kapama ve gösterge sinyalleri
- Analog işaretler
- IGBT sürme sinyalleri
- Kesme işaretleri

Bu gruplandırmalar ayrı ayrı anlatılacaktır.

6.4.1. Açma kapama ve gösterge sinyalleri

Denetleyici programı dahilinde başlatma, durdurma, parametre girişleri ile çalışma konum bilgisi ledleri ve LCD için giriş çıkış kartı tasarlanmıştır. Şekil 6.5'de tasarlanan kart resmi görülmektedir.

Tasarlanan kart ile çevresel birimlerden gelen sayısal işaretler mikrodnetleyicinin algılayabileceği seviyeye dönüştürülmüştür. Aynı şekilde mikrodnetleyicinin sayısal işaretleri çevresel birimlerin çalışabileceği seviyeye dönüştürülmüştür.



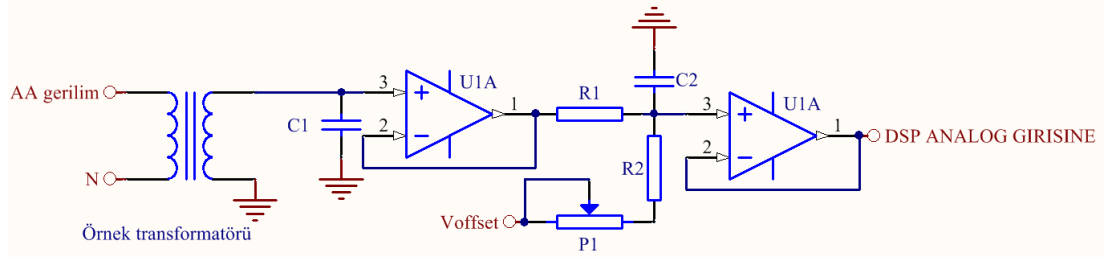
Şekil 6.5. Giriş çıkış ve gösterge kartı

6.4.2. Analog işaretler

Tasarlanan sistemle evirici denetimi için başta evirici akımları olmak üzere evirici gerilimleri, şebeke gerilimleri, evirici DA bara pozitif ve negatif gerilimleri, evirici DA akımı, nötr akımı ve nötr gerilimi bilgileri analog olarak okunmaktadır. Bu amaçla analog okuyucu devreler tasarlanmıştır. Devre yapıları AA veya DA sinyalleri okuma ve akım veya gerilim okumada farklılık göstermektedir.

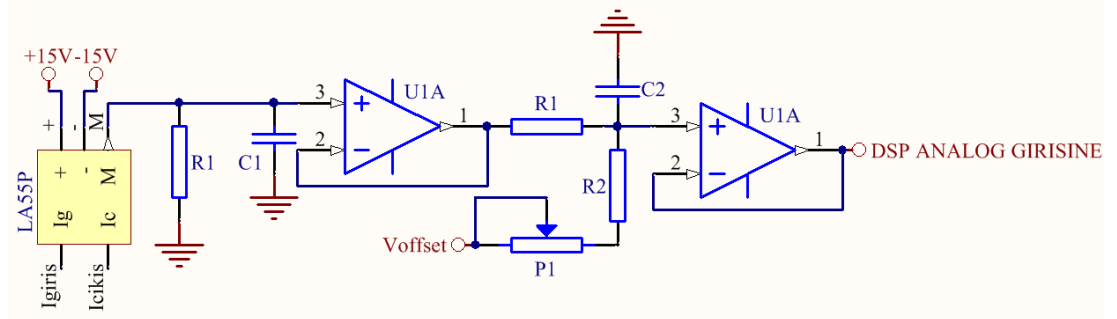
Şebeke gerilimleri ve evirici gerilimleri AA sinyallerdir. Mikrodenetleyicilerin negatif sinyal okuma gibi bir özellikleri olmadığından Şekil 6.6'daki gibi bir devre tasarlanmıştır. Tasarlanan devre ile AA sinyal ilk önce transformatör yardımı ile düşürülmüştür. Transformatör aynı zamanda elektriksel izolasyon sağlamıştır. Analog okuma devrelerinin yükleme etkisini kaldırmak amacıyla devreye gerilim izleyici kısmı ilave edilmiştir. Analog sinyalin negatif kısmı toplama devresi ile

pozitif bölgeye çekilmiştir. Çıkış sinyali ise mikrodenetleyici analog girişine uygulanmıştır. Şekilde verilen AA gerilim ifadesi uygulama devresinin her bir faz gerilimini ifade etmektedir.



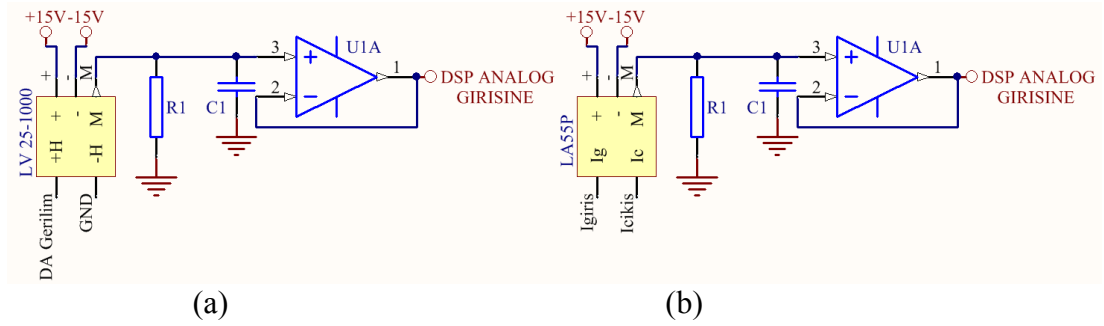
Şekil 6.6. AA gerilim okuma devresi

Benzer biçimde evirici akımını okumak amacı ile Şekil 6.7'deki devre kullanılmıştır. Burada AA gerilim okuma devresinden farklı olarak giriş transformatörü yerine akım algılayıcı kullanılmıştır. Akım algılayıcı olarak ise LA 55P kullanılmıştır. Şekilde verilen I ifadesi uygulama devresinin her bir faz akımını ifade etmektedir.



Şekil 6.7. AA akım okuma devresi

DA gerilim ve akım okumada akım ya da gerilimin yönünün değişme durumu olmadığından tek yönlü akım okuma devresi kullanılabilir. Böylece daha az sayıda eleman içeren Şekil 6.8'deki devre kullanılmıştır.

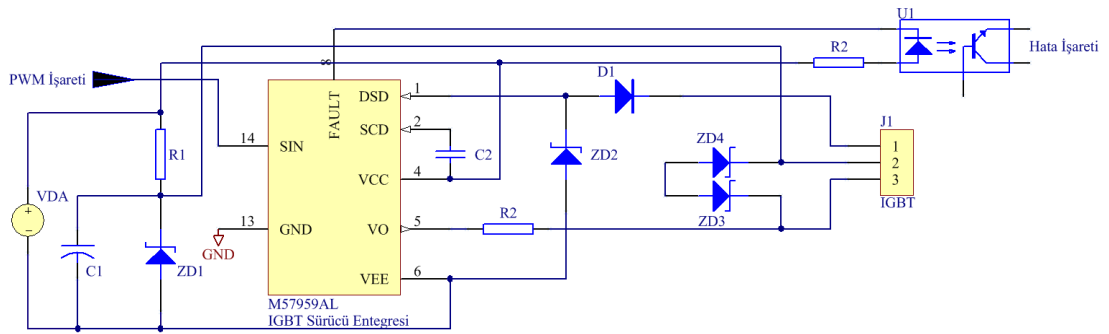


Şekil 6.8. DA okuma devreleri
a) gerilim okuma b) akım okuma

Devrede kullanılan yükselteçler (TL082) yüklemeye etkisinin yok edilmesi ve ters gerilimlerin bloke edilmesi amacı ile kullanılmıştır.

6.4.3. IGBT sürme işaretinin oluşturulması

Üç fazlı NPC evirici için 12 adet sürme işaretine gerek duyulmaktadır. Bu işaretler mikrodenetleyici tarafından üretilerek sürücüler vasıtasıyla IGBT kapılarına uygulanmıştır.



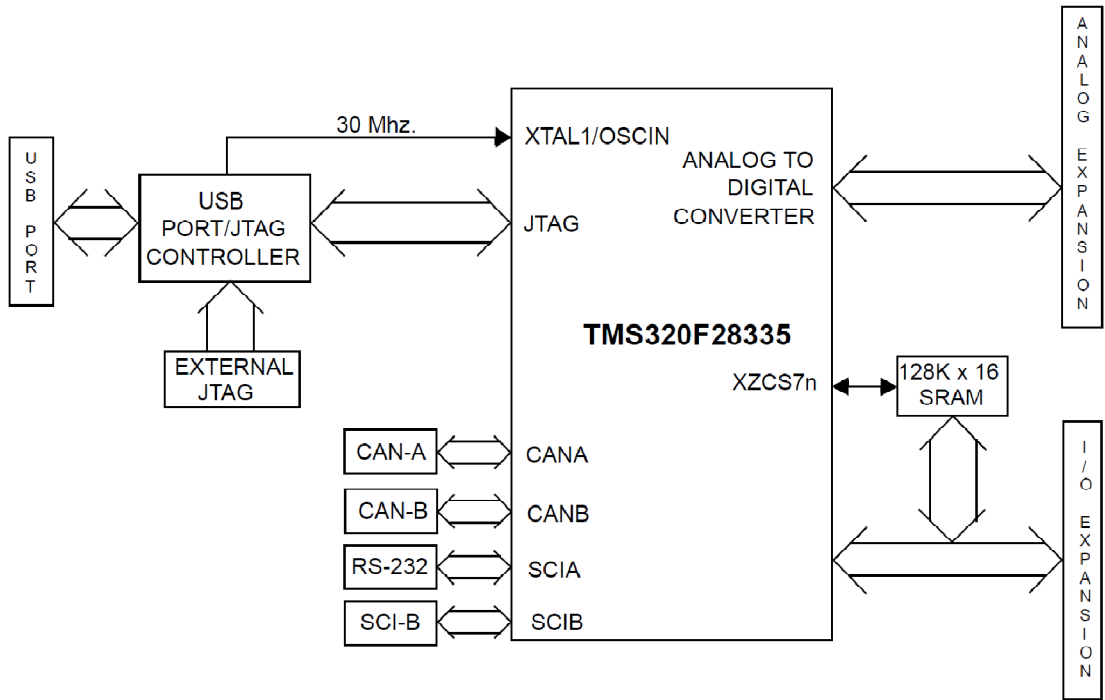
Şekil 6.9. IGBT sürme devresi

Şekil 6.9'da verilen ve her bir IGBT için kapı sürücü olarak kullanılan devre ile birincil olarak mikrodenetleyici ile güç katı arasında optik izolatör ile elektriksel yalıtım sağlanmakta, böylece güç devresindeki yüksek frekansta anahtarlama dolay meydana gelen gürültünün denetim devresine sirayeti önlenmektedir. İkincil

olarak mikrodenetleyici tarafından üretilen sürme DGM işareti IGBT'nin sağlıklı çalışabileceği iletim ve kesim gerilimine dönüştürülür. Üçüncül olarak ise kısa devre algılaması yapılarak bu gibi durumlardan mikrodenetleyicinin yalıtımlı bir şekilde haberdar olması sağlanır.

6.5. Denetçi Kartı

Evirici denetiminde Spectrum Digital firmasına ait eZdsp™ F28335 kartından yararlanılmıştır. Üzerinde bulunan TI TMS320F28335 işlemcisinin donanım gereksinimlerini karşılama, işlemci giriş çıkış pinlerinin dışarı alınması gibi işlevleri olan kart ayrıca programlama kartı olarak da görev yapmaktadır. Üzerinde bulunan emülatör ile de bilgisayar haberleşmesi yapabilmektedir. Bu sayede yongaya programın yazılması işleminin yanı sıra çalışan programın parametrelerinin bilgisayardan izlenmesi de yapılabilmektedir. Şekil 6.10'da denetçi kartının blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.10. eZdsp F28335 denetçi kartı blok diyagramı

Bilgisayar bağlantısı için kart üzerinde bulunan onboard emülatör kullanılabileceği gibi harici bir emülatör de kullanılabilmektedir. Bilgi alışverişinin daha sağlıklı yapılabilmesi amacı ile gürültü bağışıklılığı onboard emülatörden daha iyi olan Blackhawk USB2000 Controller bilgisayar usb çıkışı ile eZDSP F28335 kartı usb girişi arasında kullanılmıştır.

6.6. Şebeke Bağlantı Ünitesi

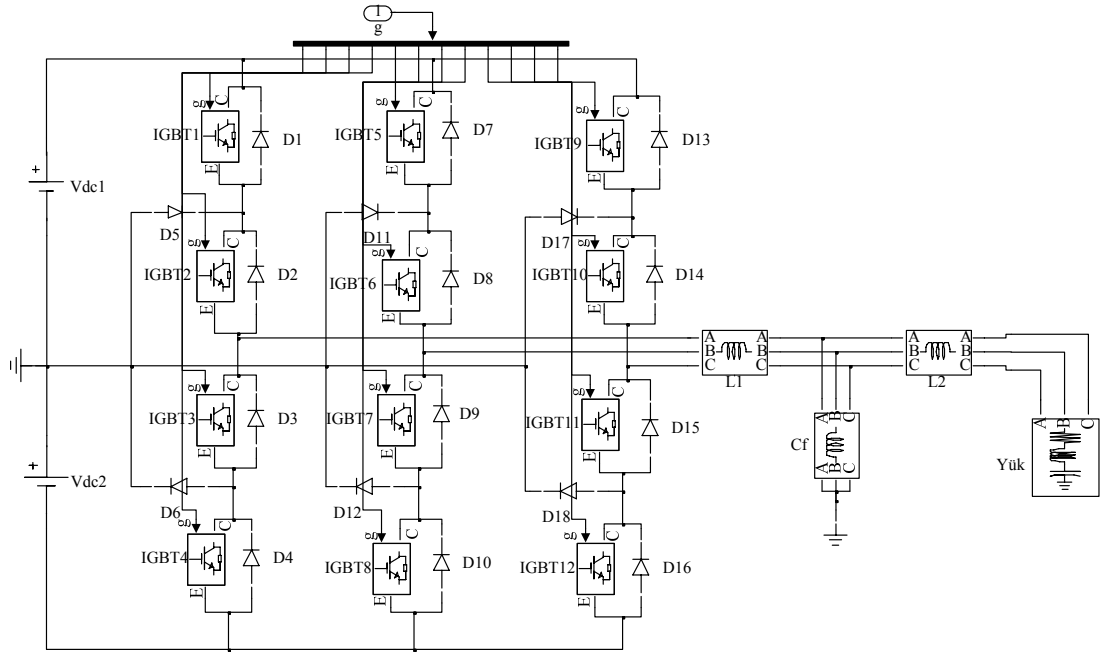
Şebeke ile çalışma yada şebekeden ayrılma işlemlerinin hızlı bir şekilde yapılabilmesi amacı ile evirici çıkışı ile şebeke arasında durağan anahtar kullanılmıştır. Statik anahtar olarak IXYS MCC 132-16 tristör modüller her bir faz için kullanılmıştır. Tristör modülleri korumak amacıyla 100 Ohm 220 nF RC tipi snubber kullanılmıştır. Tristör sürücüsünde yüksek frekanslı darbe transformatörü kullanılarak ekonomik yolla elektriksel izolasyon sağlanmıştır.

Tristörü iletme geçirmek için tristör kapı girişinden bir DA akım uygulanmalıdır. Kapıya akım bir kez uygulandıktan sonra kaldırılrsa dahi tristör iletimde kalmaya devam eder. Elemanın iletme geçmesini sağlayabilmek için kapı akım darbesinin genliğini tristör karakteristiği belirler [Mohan ve ark., 1995]. Tristörler ile AA anahtar oluşturmak için iki adet tristör ters paralel bağlanır. Tristörden geçen AA akım yön değiştirdiğinde (sinüs işareti için pozitif alternanstan negatif alternansa geçtiğinde) tristör kesime gider. Bir sonraki alternansta tekrar iletme geçemez. Ayrıca tristörlerin üzerinden akım akmadığı ya da tutma akımından daha düşük akım aktığı durumlarda kapı darbesi kaldırılırsa tristör istemsiz olarak kesime gidebilmektedir. Bu durumu engellemek amacı ile iletimde kalınacak süre boyunca başlangıçta yüksek genlikli bir akım darbesi uygulanır, ardından da düşük genlikli bir akım ile kapı sürekli beslenir.

7. BENZETİM VE UYGULAMA SONUÇLARI

7.1. Benzetim

Tasarlanan eviricinin benzetim çalışması iki şekilde yapılmıştır. İlk olarak Matlab/Simulink’de lokal şebekeye senkron çalışan PI denetimli üç fazlı üç seviyeli evirici benzetimi yapılmıştır. Evirici gerilim kaynaklı gerilim denetimli olarak tasarlanmıştır. Bu yapı ile çok seviye ve evirici sinyalleri incelenmiştir. İkinci olarak Matlab/Simulink’de MPPT yapabilen şebeke ile paralel senkron çalışabilen gerilim kaynaklı akım denetimli üç seviyeli şebeke etkileşimli evirici benzetim çalışmaları yapılmıştır.

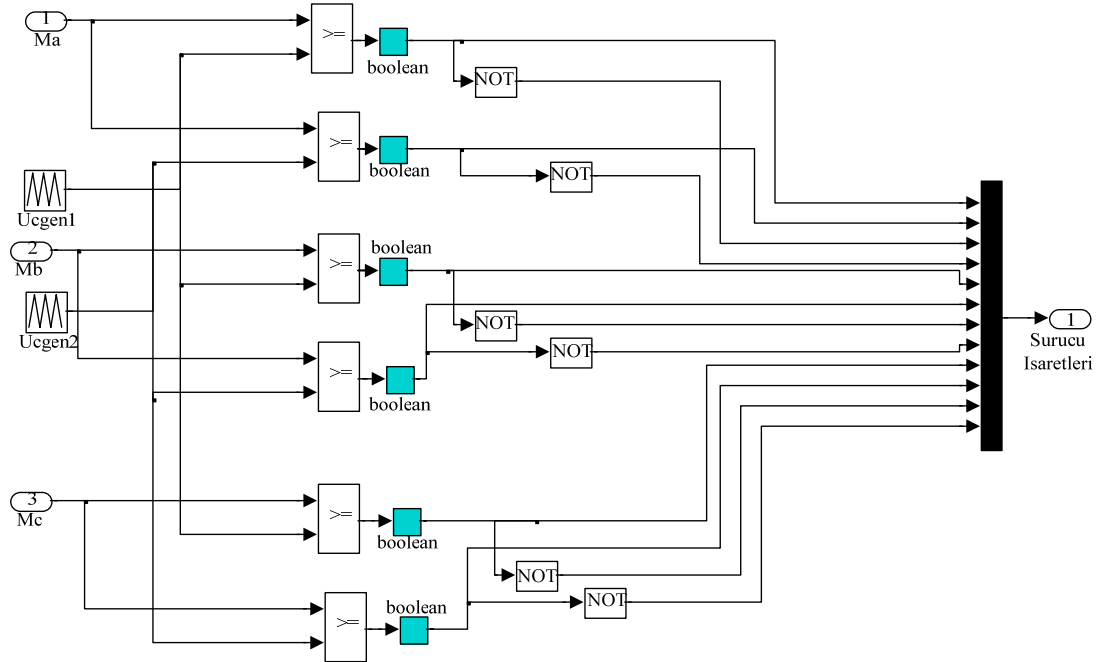


Şekil 7.1. Üç fazlı üç seviyeli evirici Matlab/Simulink benzetim devresi

Matlab/Simulink programında PI denetimli üç fazlı üç seviyeli evirici benzetimleri yapılmıştır. Benzetim çalışmaları nötr noktası tutmalı çok seviyeli evirici topolojisi ile yapılmıştır. Benzetim devresi Şekil 7.1’de görülmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılan bu yapıda şebeke gerilimleri referans alınarak gerilim

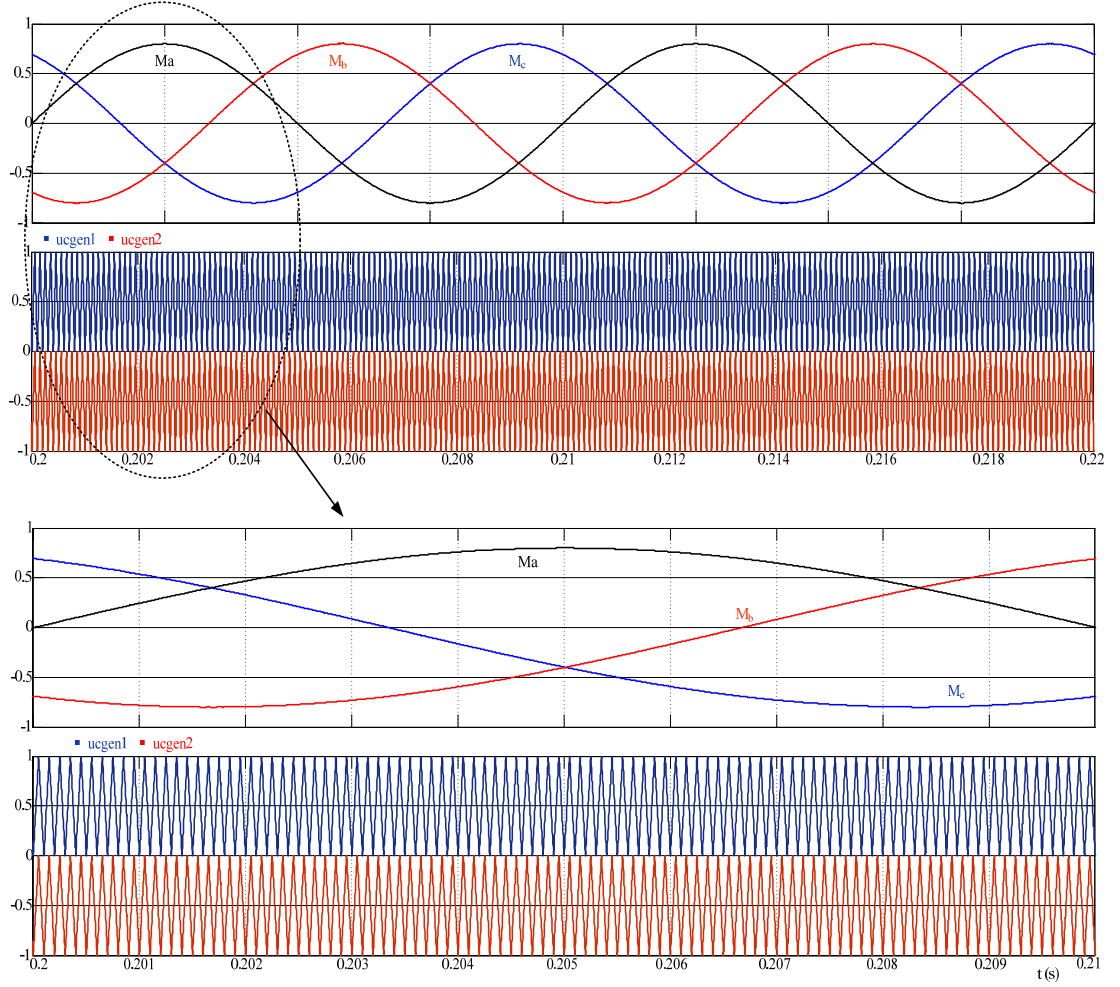
denetimli bir evirici tasarlanmıştır. Evirici yapısı hem RMS gerilim seviyesinin denetlenmesi yöntemi ile hem de anlık değerlerin denetlenmesi yöntemi ile ayrı ayrı denenmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca anahtarlama işaretleri, anahtarlar ve diyotlar üzerinde düşen gerilimler, tasarlanan sistem için çıkış filtresi gereksinimleri ile bu filtrelerin topolojileri incelenmiştir. Denetim algoritması için PI denetçisi tek olarak tasarlanıp dq-abc dönüşümü yapılarak üç fazın denetimi sağlanmıştır.

Şekil 7.1’de verilen benzetim devresi için anahtarlama işaretlerinin üretimi, denetçi yapıları, çıkış kalitesi ile ilgili grafikler sırası ile verilecektir. Şekil 7.2’de anahtar işaretlerinin üretimini gösteren şema verilmiştir. “Ucgen1” ve “Ucgen2” ifadeleri ile verilen işaretler üçgen taşıyıcı işaretlerini göstermektedir. Şekilde “Ucgen1” ifadesi ile verilen sinyal genliği 0 ile 1 arasında değişmektedir. İlk sinyalin terslenmiş hali olan “Ucgen2” sinyali ise 0 ile -1 arasında değişmektedir. “Ma”, “Mb” ve “Mc” ifadesi ile verilen sinyaller ise her bir faza ait modülasyon sinyalleridir. Bu işaretlerin karşılaştırılmasından elde edilen sonuç olan T1’den T12’ye kadar olan sinyaller üç seviyeli eviricinin her bir anahtarına giden anahtarlama işaretleridir.



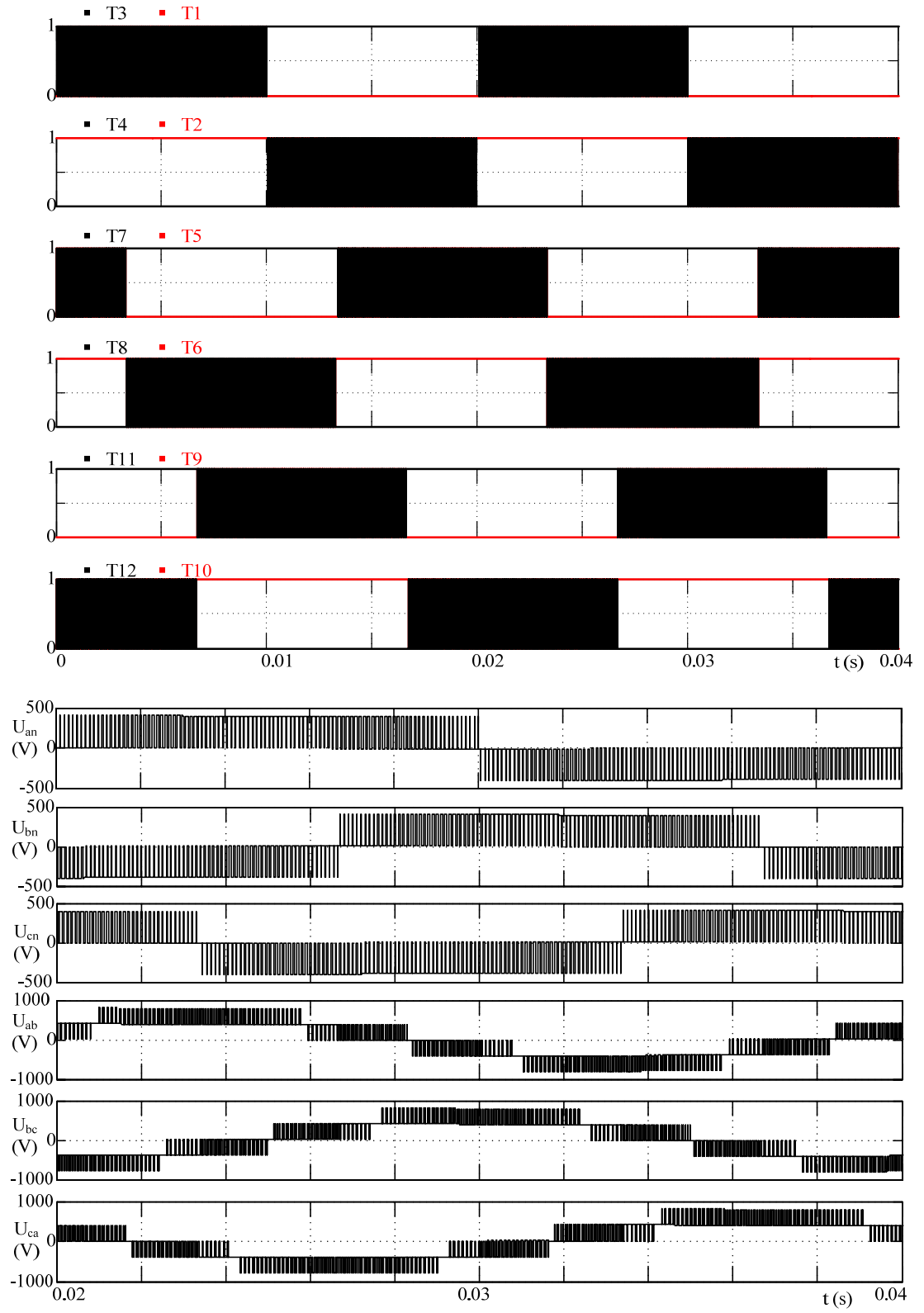
Şekil 7.2. Benzetim çalışması denetimi ve anahtarlama işaretlerinin üretimi

Şekil 7.2’de verilen karşılaştırma işleminin ayrıntılı hali Şekil 7.3’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere iki seviyeli eviricilerden farklı olarak iki taşıyıcı işareti bulunmaktadır. NPC eviricilerde seviye sayısı arttıkça taşıyıcı işaretlerinin sayısı da artmaktadır.



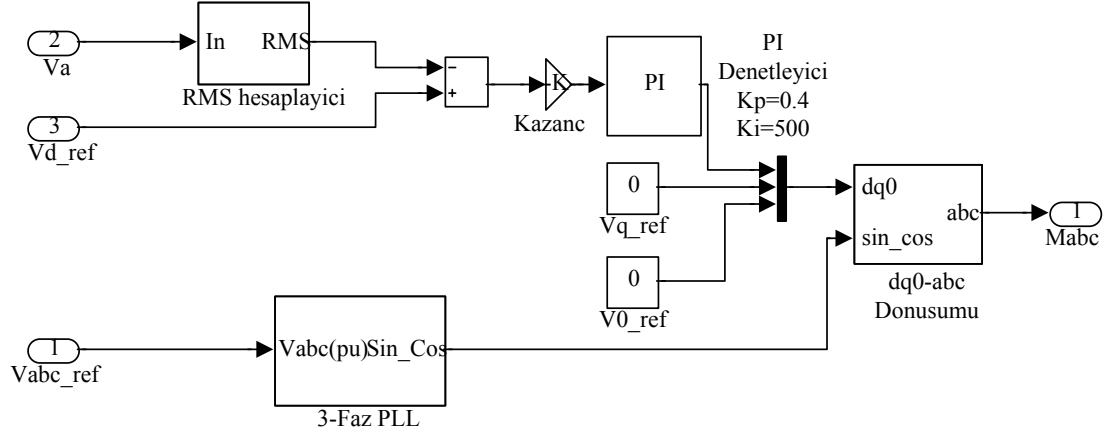
Şekil 7.3. Taşıyıcı ve modülasyon işaretlerinin gösterimi

Şekil 7.4’de karşılaştırma sonucu elde edilen ve toplam 12 adet anahtara uygulanacak olan anahtarlama işaretleri ve üretilen gerilimin faz nötr ile fazlar arası filtre öncesi durumları görülmektedir.



Şekil 7.4. Üç seviyeli evirici anahtar işaretleri

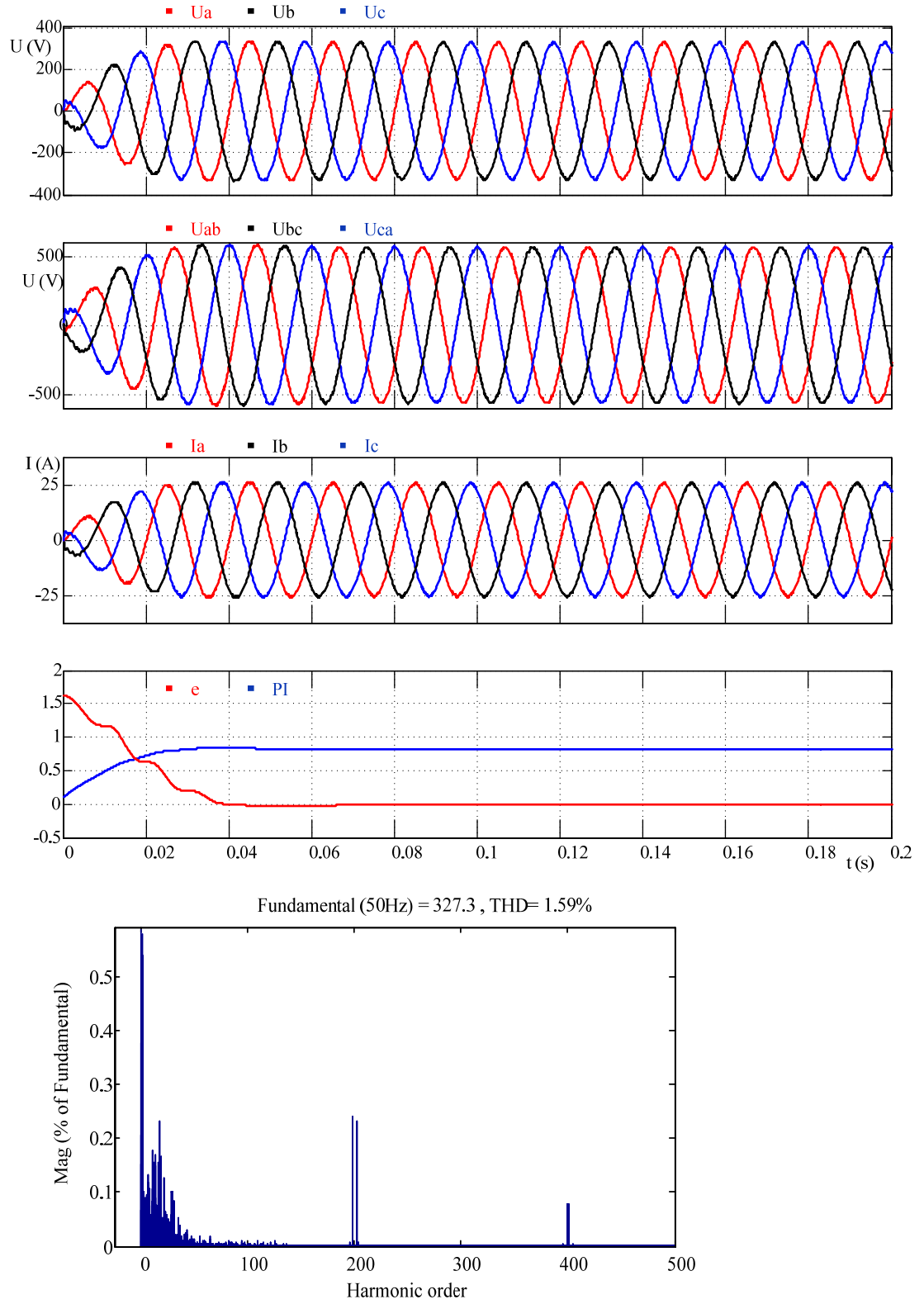
Her bir kol anahtarları dikkate alındığında (T1,2,3,4-T5,6,7,8-T9,10,11,12) bu işaretlerin aralarında 120'şer derece açı bulunmaktadır. Evirici bir kolunun incelendiğinde T1 ile T3 ve T2 ile T4 birbirleri ile tümleyen olarak çalışmaktadır. Diğer kolların durumu da benzer şekildedir.



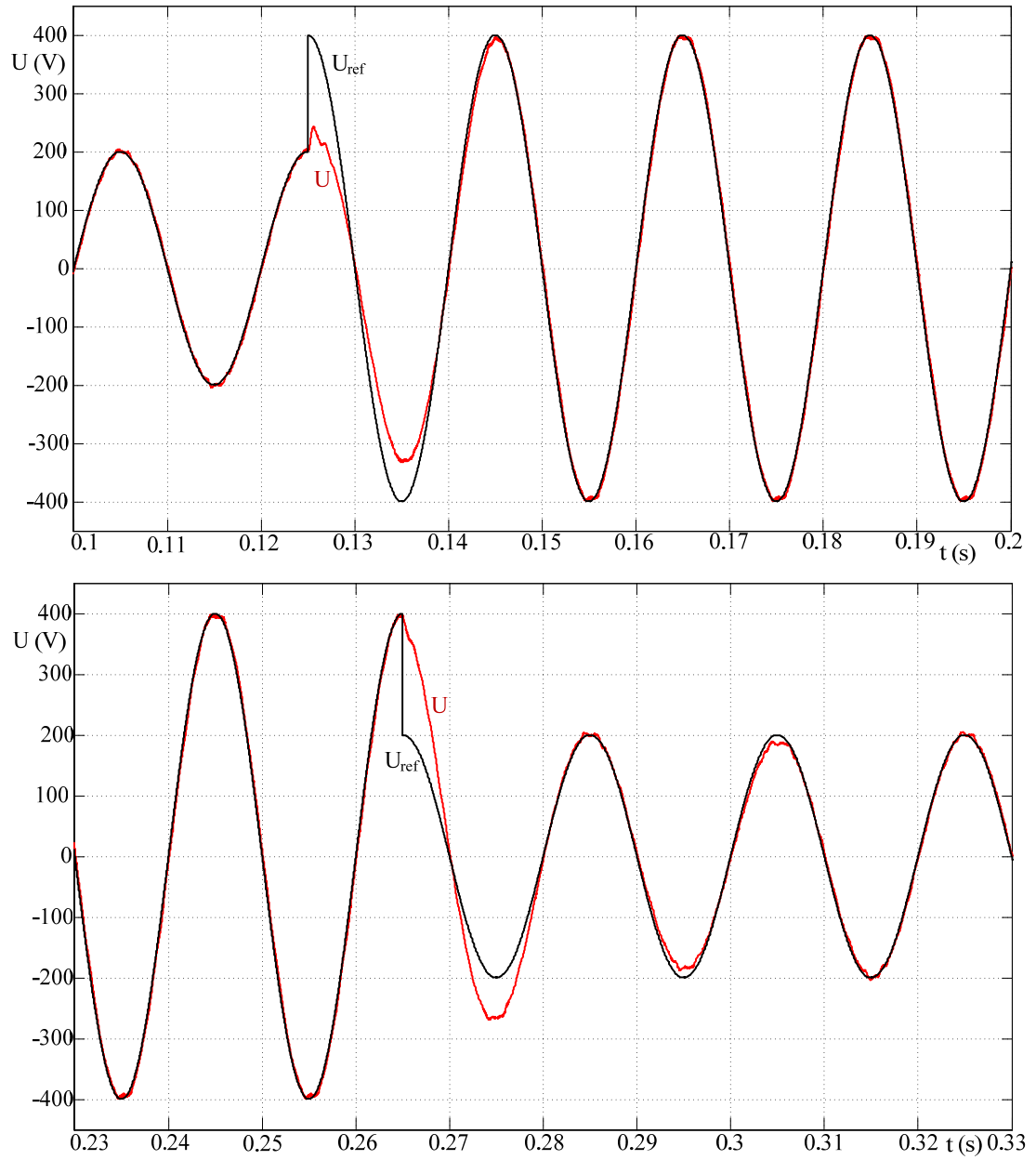
Şekil 7.5. Etkin değer denetimi

Şekil 7.5’de evirici çıkış gerilimin etkin değeri alınarak bu değer geri besleme işareti olarak kullanılmasına ilişkin denetim yapısı görülmektedir.

Benzetim devresinin etkin değer ile denetlendiğinde evirici parametrelerine ait bilgiler Şekil 7.6’da verilmiştir. Burada U_{an} , U_{bn} , ve U_{cn} faz nötr arası gerilimler, U_{ab} , U_{bc} ve U_{ca} ise fazlar arası gerilimler, I_a , I_b , I_c faz akımları, PI ile gösterilen sinyal denetçi çıkışını e ise hatayı göstermektedir. Bu durumdaki evirici toplam çıkış gerilim harmoniği %1,59 olarak ölçülmüştür.

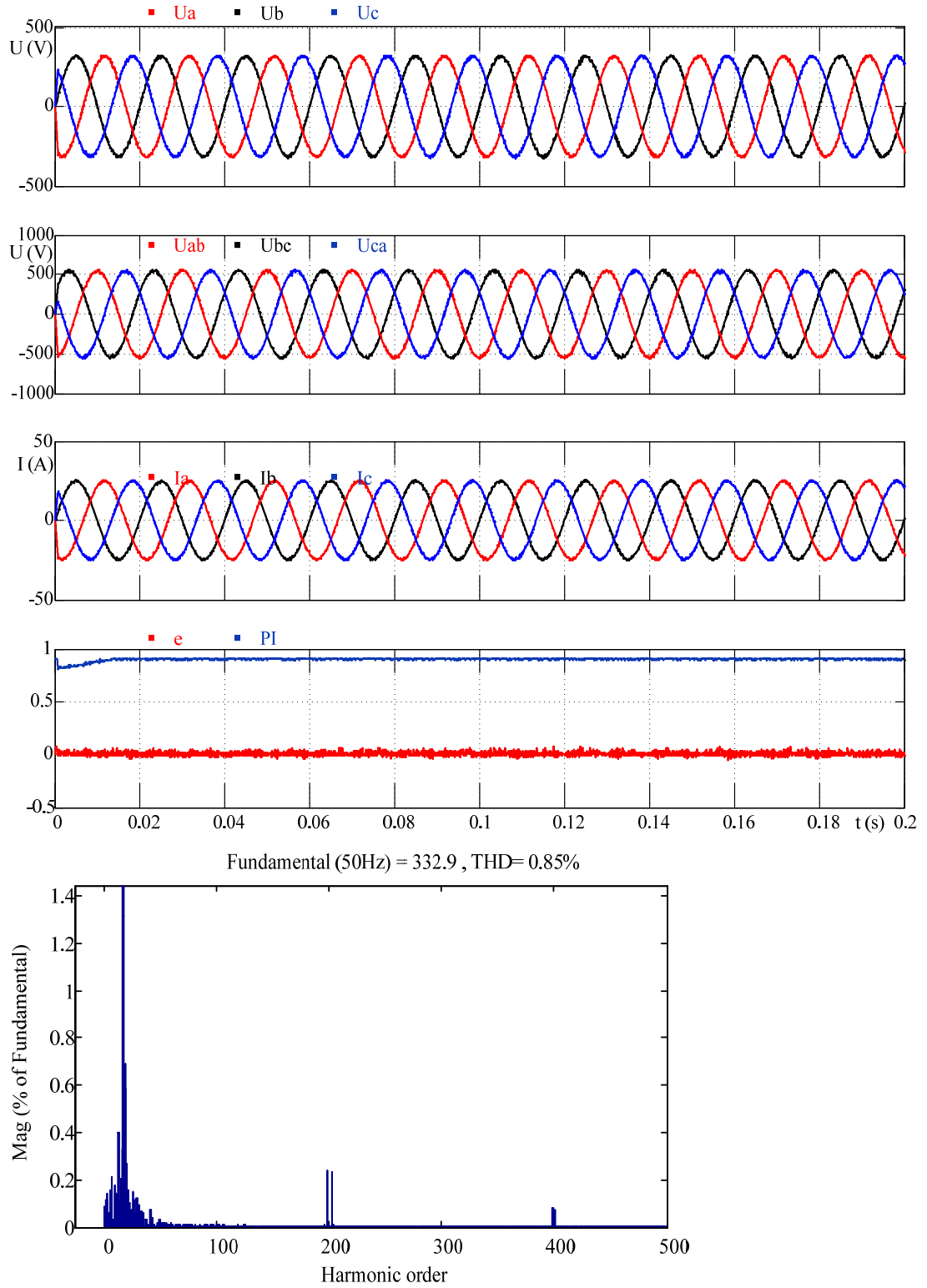


Şekil 7.6. Etkin değer örnekleme yöntemi ile sistem çıkış parametreleri

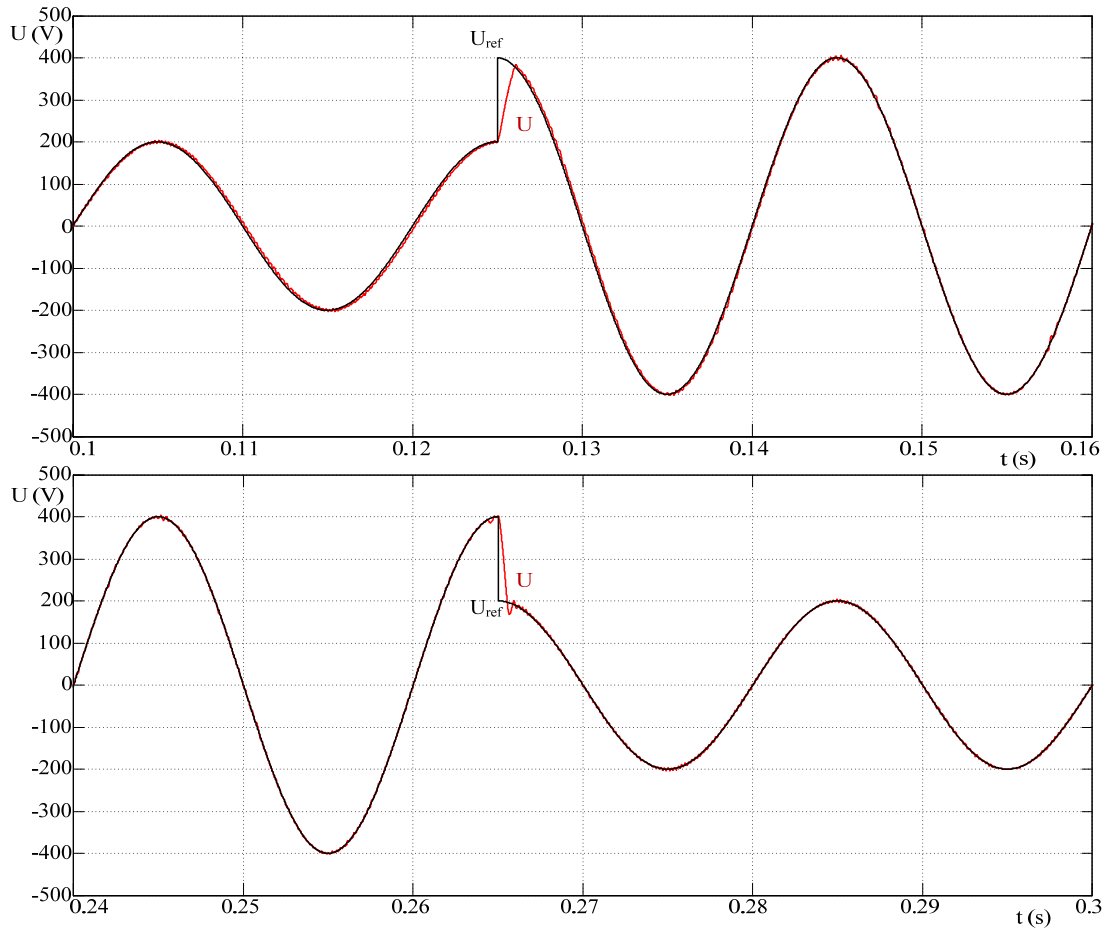


Şekil 7.7. Etkin değer örnekleme ile aşağı ve yukarı ani referans değişimi tepkisi

Şekil 7.7’de U_{ref} ile gösterilen sinyal referans gerilimi U ile gösterilen sinyal ise evirici çıkış gerilimini ifade etmektedir. Referans gerilim ilk önce 200 V’dan 400 V değerine ardından da 400 V değerinden 200 V değerine değiştirilerek eviricinin referans tepkisi incelenmiştir. Her iki durumda da sistemin referansı yakalaması 20

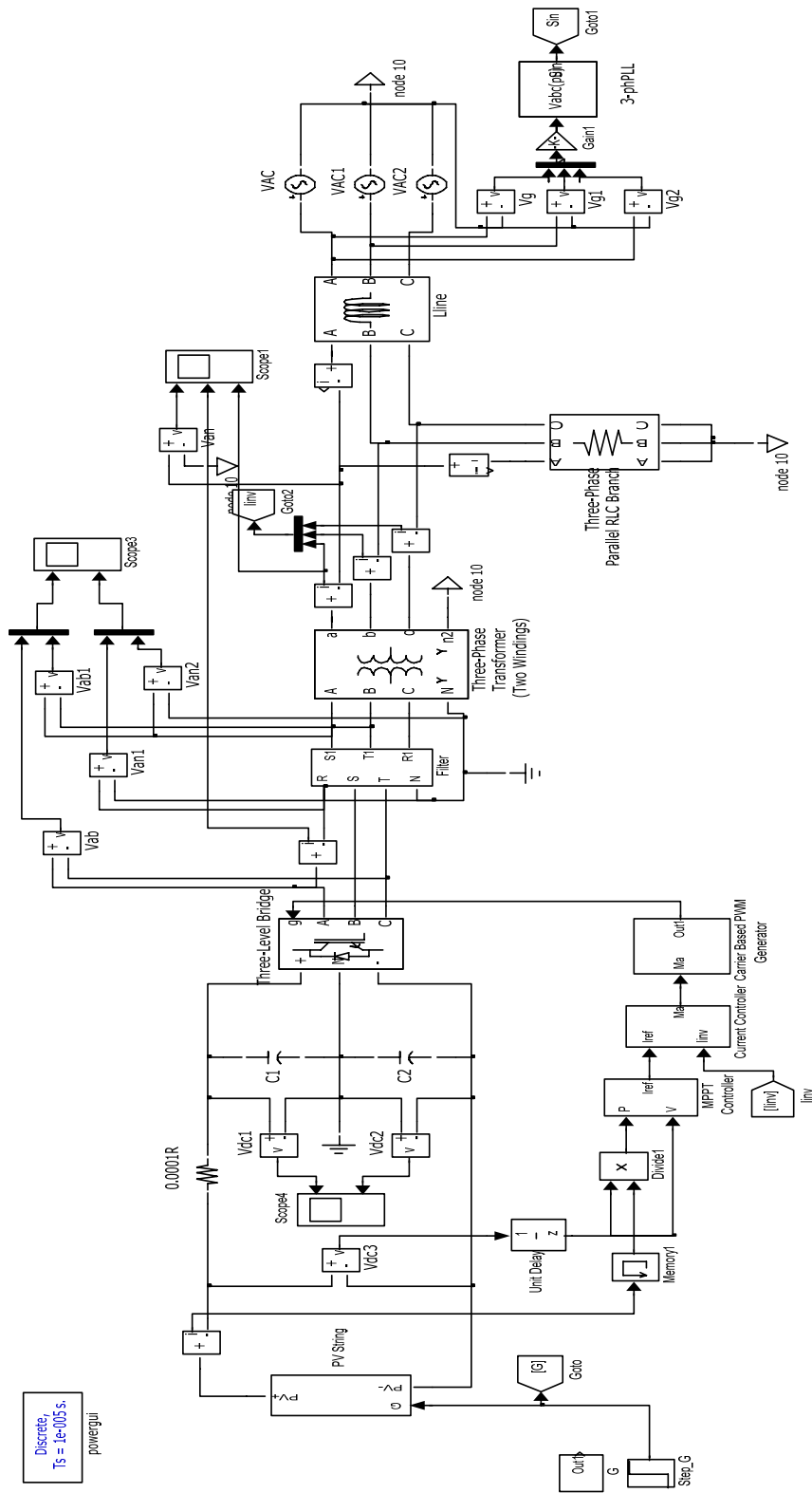


Şekil 7.9. Ani değer örnekleme ile sistem çıkış parametreleri



Şekil 7.10. Ani değer denetimi ile referanstaki değişime tepkisi

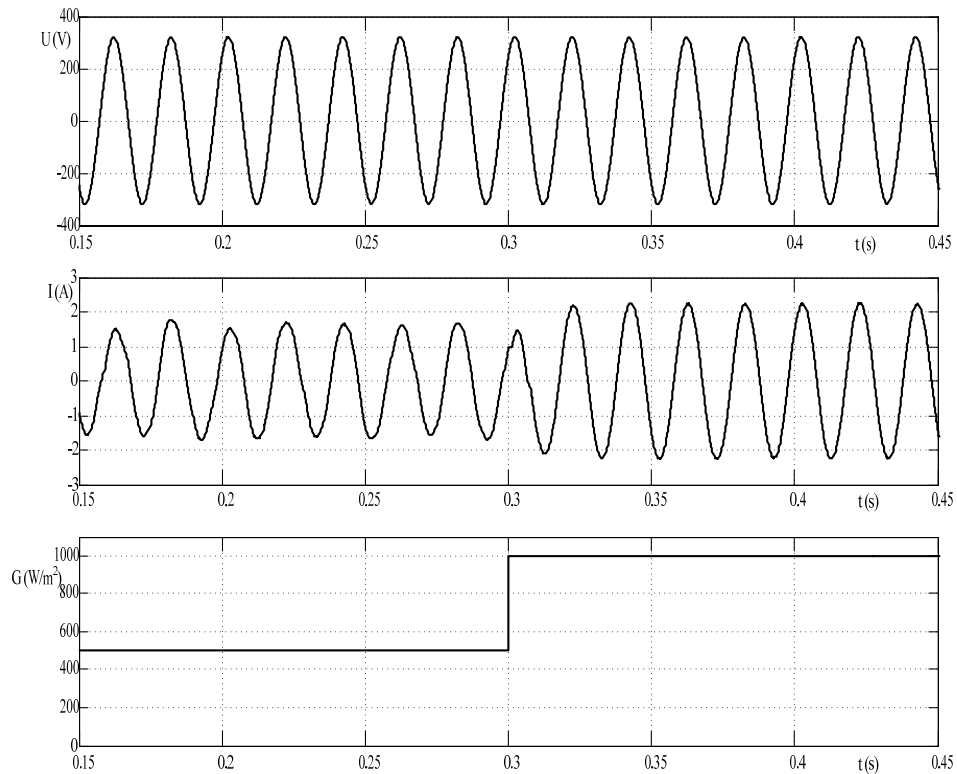
Etkin değerler kullanılarak yapılan denetimin tepki süresinin yavaş kalması ve harmonik seviyelerinin daha yüksek çıkması beklenen bir durumdur. Doğrusal olmayan yüklerde evirici parametreleri daha da kötüleşecektir. RMS değer ile ani değer denetimlerini ayrı ayrı göstermekteki amaç evirici referansını belirleyen ve MPPT teknikleri konusunda anlatılan doğrudan MPPT yöntemleri ile etkin değer denetiminin birlikte çalışmaya daha uygun olduğu ancak bu durumda sistem tepkisinin yavaşlayacağı ve harmonik seviyelerinin artacağını belirtmektir. Öte yandan ani değerler ile yapılan denetimin evirici parametreleri açısından daha iyi sonuç vermesine karşın sıradan doğrudan MPPT denetim teknikleri ile çalışmaya elverişli değildir.



Şekil 7.11. Üç fazlı üç seviyeli NPC MPPT’li ŞEE modeli

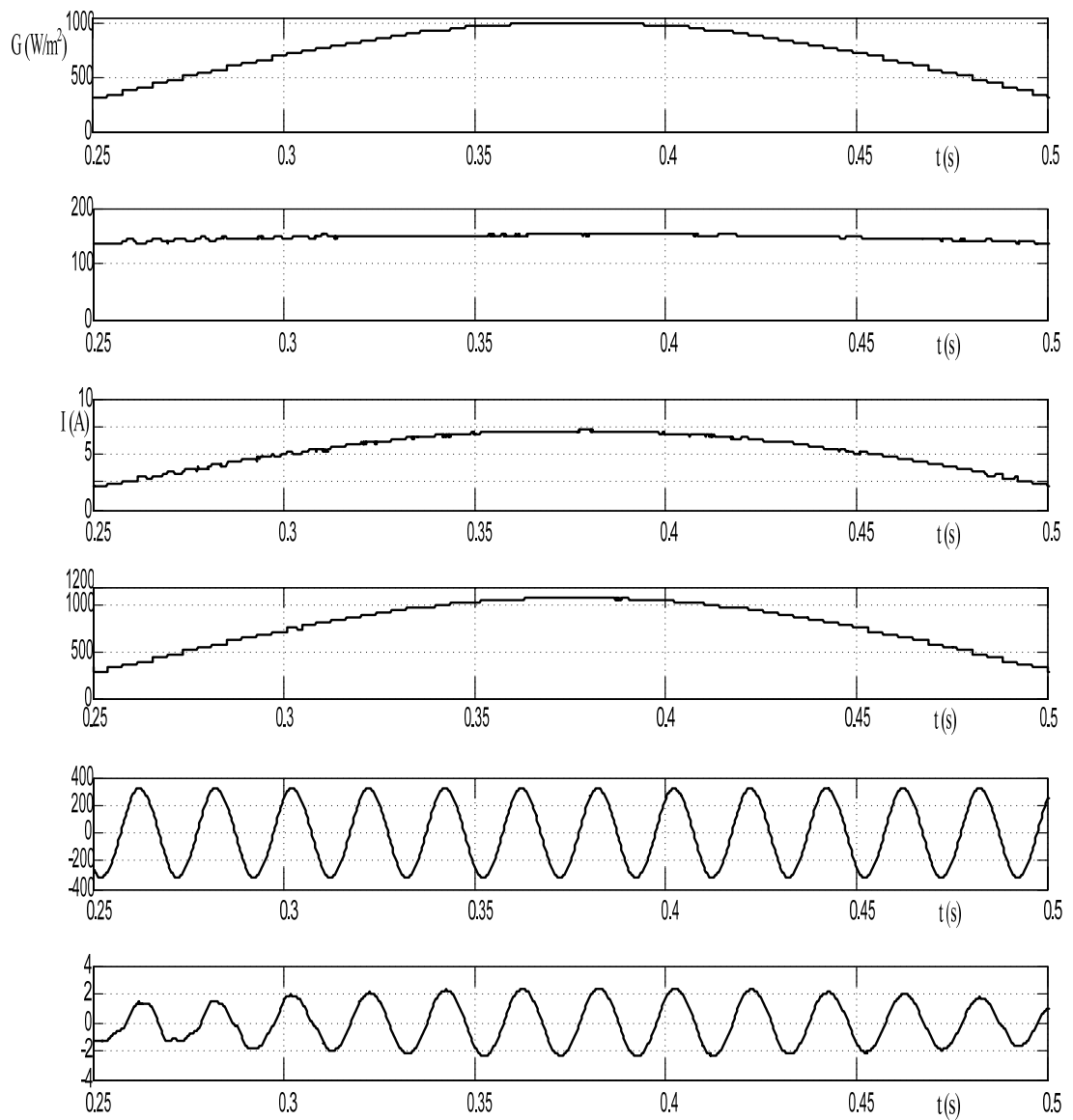
Üç fazlı üç seviyeli NPC şebeke etkileşimli MPPT yapabilen evirici Matlab/Simulink modeli Şekil 7.11’de verilmiştir. Sistem PV, üç fazlı üç seviyeli NPC evirici, hat frekanslı transformatör, filtre ve şebeke bileşenlerinden oluşmaktadır. Denetim mekanizması ise şebeke ile senkronizasyon için PLL, PV panelden her an en yüksek gücü elde etmek amacı ile MPPT denetçisi, şebekeye sinüs dalga formunda ve birim güç faktöründe enerji transfer edebilmek için PI denetim algoritmalarından oluşmaktadır. Şekil 7.11’de verilen benzetim devresi Şekil 7.1’deki benzetim devresinden farklı olarak MPPT yapabilmektedir. Tasarlanan evirici önceki benzetimde olduğu gibi gerilim kaynaklı olarak tasarlanmış olup şebeke ile paralel senkron çalıştırıldığında gerilim kaynaklı akım denetimli olarak çalışabilmektedir.

Benzetim çalışması uygulama çalışmasında olduğu gibi 1000 W gücünde tasarlanmış olup uygulama devresinde kullanılan PV model değerleri esas alınarak çalıştırılmıştır.



Şekil 7.12. Işınım şiddeti adım tepkisi ile evirici çıkış parametrelerinin değişimi

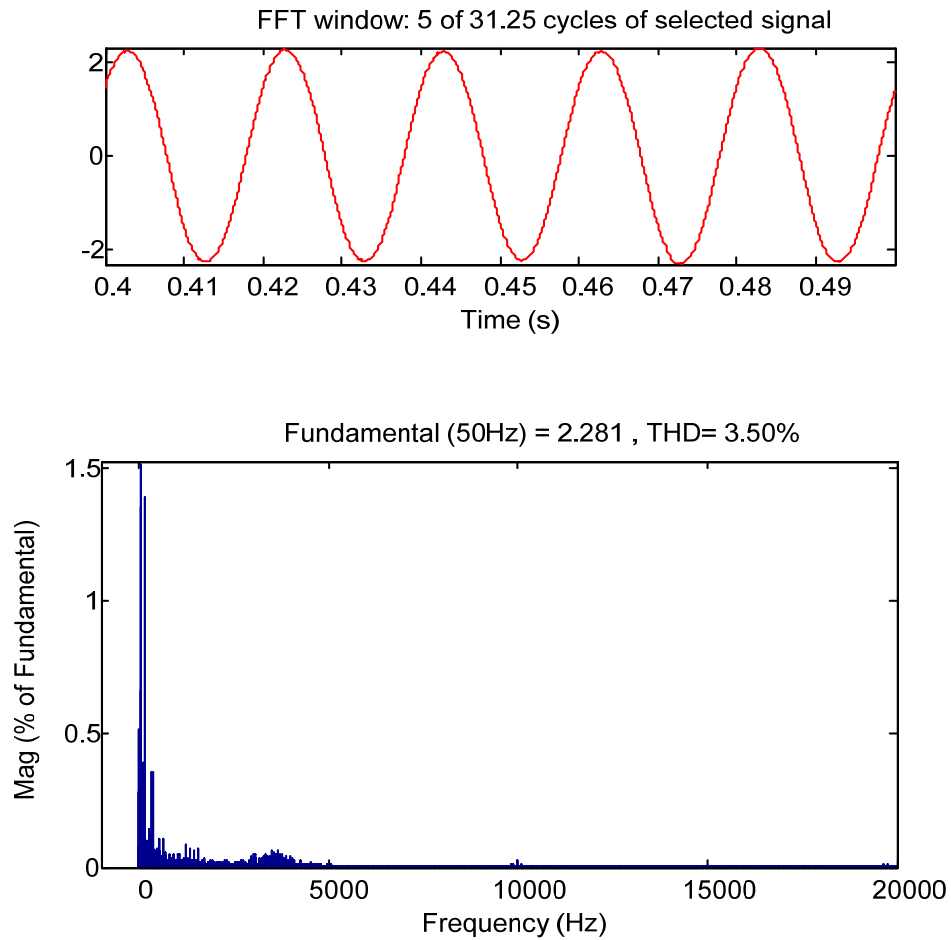
Şekil 7.12’de U şebeke gerilimi, I şebekeye aktarılan akım ve G ise PV panel ışınlm şiddeti olmak üzere ışınlm şiddeti 500 W/m^2 iken ani olarak 1000 W/m^2 değerine artırıldığında evirici senkronizasyon ve akım değışkenleri izlenmiştir. Bu durumda eviricinin ani değışen atmosfer koşullarında çalışması modellenmeye çalışılmıştır. Şebeke gerilimi ile senkronizasyonda herhangi bir sapma olmazken evirici çıkış akım dalga formunda toparlanma süresi dışında bir bozulma olmamıştır.



Şekil 7.13. Farklı atmosfer koşullarında evirici çıkış parametrelerinin değışimi

Şekil 7.13’de ışınlm şiddeti 300 W/m^2 den 1000 W/m^2 ve ardından 300 W/m^2 ye kademeli değıştirilmiş ve bu duruma ait ışınlm, gerilim, akım ve güç değeri izlenmiştir. Burada eviricinin farklı atmosfer koşullarında çalışması modellenmeye çalışılmıştır. Çıkış parametrelerinden görüldüğü gibi evirici akımında düşük güçlerde meydana gelen bozulmalar hariç bir bozulma olmazken senkron paralel çalışmaya devam etmiştir.

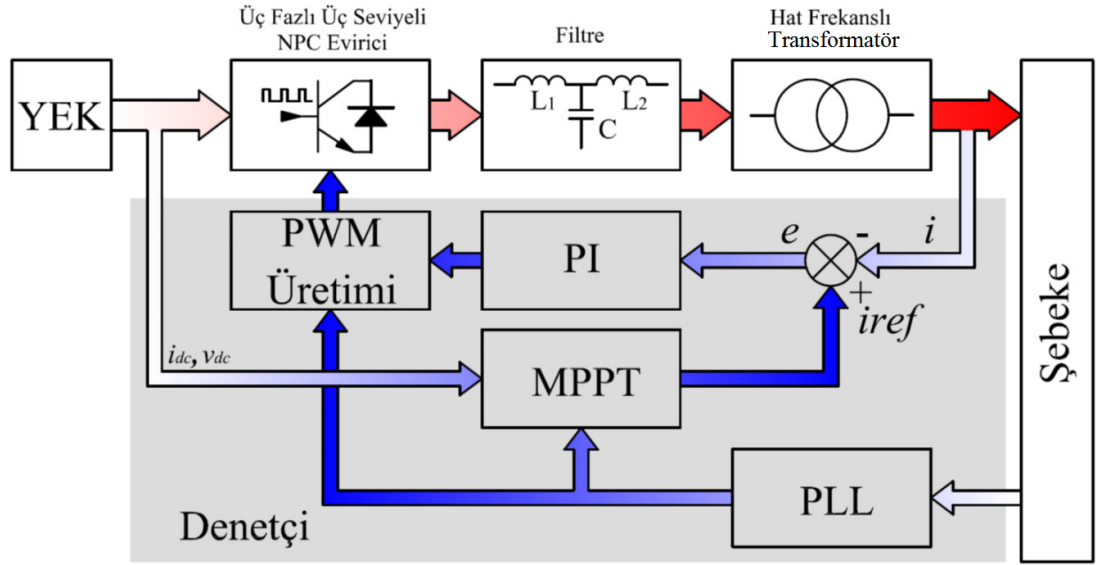
Eviricinin kararlı çalışma durumunda toplam akım harmonik seviyesini gösteren grafik Şekil 7.14’de verilmiştir. Şekilden görüleceğı üzere toplam harmonik bozunumu %3,5’ler seviyesinde olup şebekeye uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dahilindedir ($< \%5$).



Şekil 7.14. Evirici akımının kararlı durumundaki toplam harmonik bozunumu

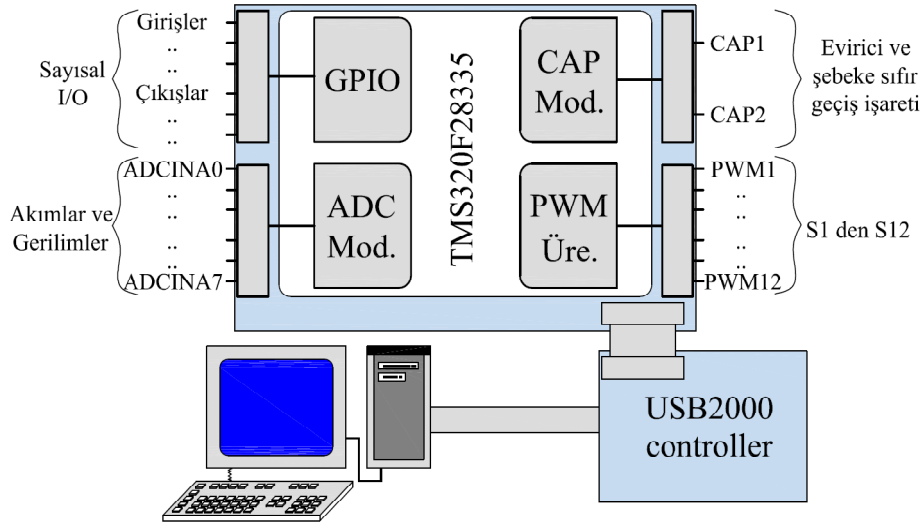
7.2. Uygulama

Şekil 7.15’de uygulama devresi prensip şeması görülmektedir. Sistem PV panel çıkışından aldığı akım ve gerilim bilgisine göre PV panelin üretebileceği en yüksek güç noktasını tayin eden MPPT ünitesi, şebeke ile senkronizasyon ve paralel çalışmayı sağlayan PLL ünitesi, şebeke verilen akımın dalga formunu denetleyen PI denetleyiciden oluşmaktadır. Sistemin donanımsal özellikleri tasarım bölümünde anlatılmıştır.

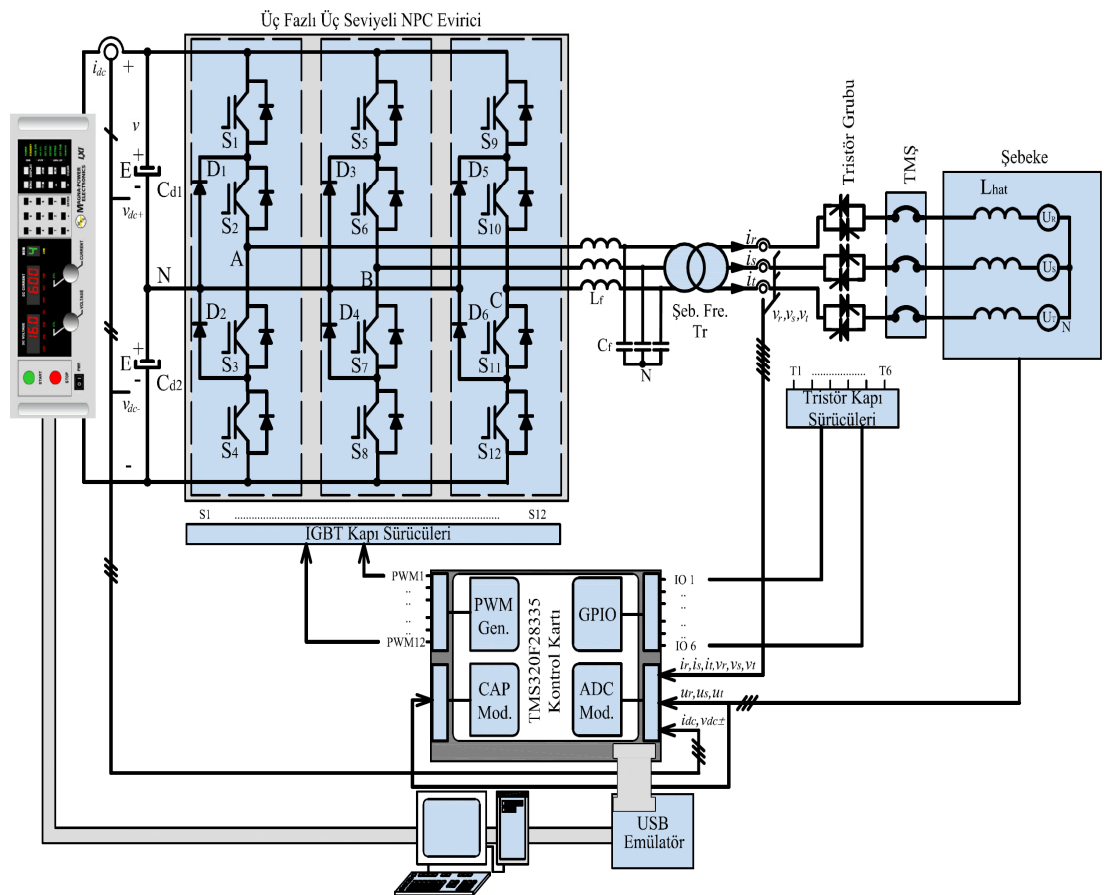


Şekil 7.15. Uygulama devresi prensip şeması

Şekil 7.15’de bulunan denetçi bölümü eZDSP28335 kartını, mikrodenetleyicisini ve denetim algoritmasını ifade etmektedir. Şekil 7.16’da bu denetçinin giriş çıkışları gösterilmiştir. Şekil 7.15’de evirici çıkış filtresi LCL olarak gösterilmiş olup L_2 bobini çıkış transformatörünün L etkisini ifade etmektedir.

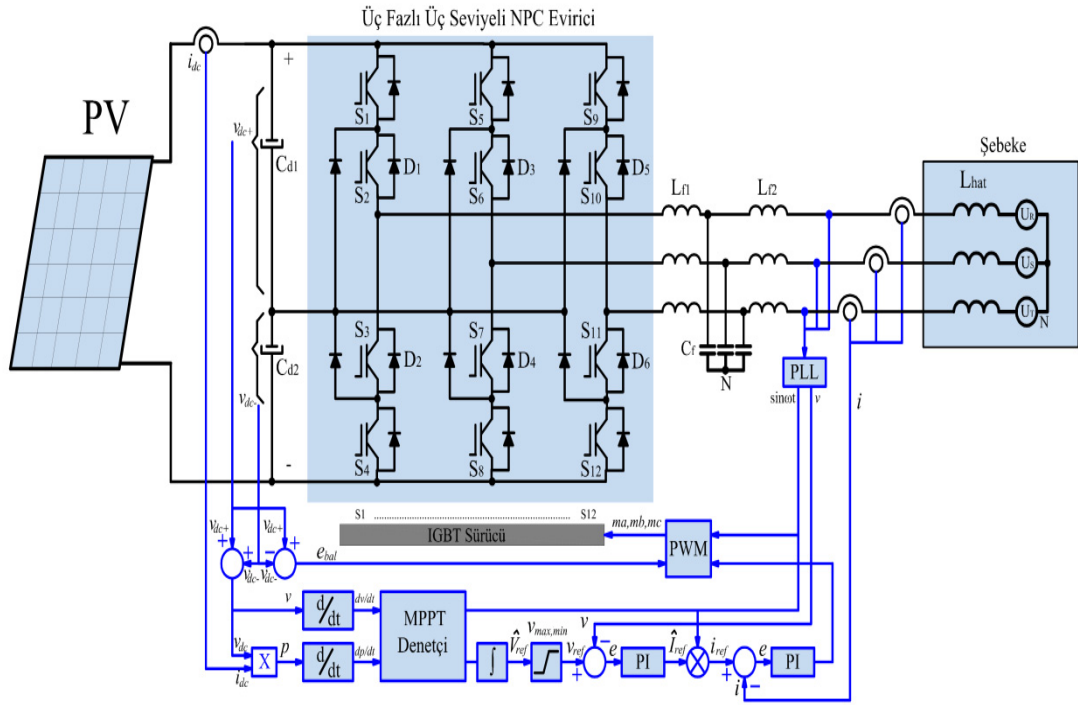


Şekil 7.16. Uygulama devresi prensip şeması



Şekil 7.17. Uygulama devresi detaylı şeması

Şekil 7.17’de PV panel modelini oluşturmak için kullanılan fotovoltaiik emülatör ve bilgisayarla olan bağlantısı görülmektedir. Burada emülatörün hangi PV panel ya da paneller gibi davranacağı bilgisayar arayüz yazılımından girilmektedir. Yine aynı şekilde üç fazlı üç seviyeli NPC evirici yapısı görülmektedir. Evirici giriş gerilimi DA kondansatörler vasıtası ile ikiye bölünmüş ve kondansatörlerin orta noktası NPC eviricinin orta noktasına bağlanmıştır. Bu nokta daha sonra nötr noktası ile irtibatlandırılmıştır. NPC eviricide bulunan güç anahtarlarının ihtiyaç duyduğu 12 adet DGM sinyali mikrodnetleyici tarafından üretilmiştir. Bu sinyalleri üretmek için şebeke akımları, gerilimleri ile PV panel çıkış akımı ve gerilimi mikrodnetleyici tarafından okunmuştur.

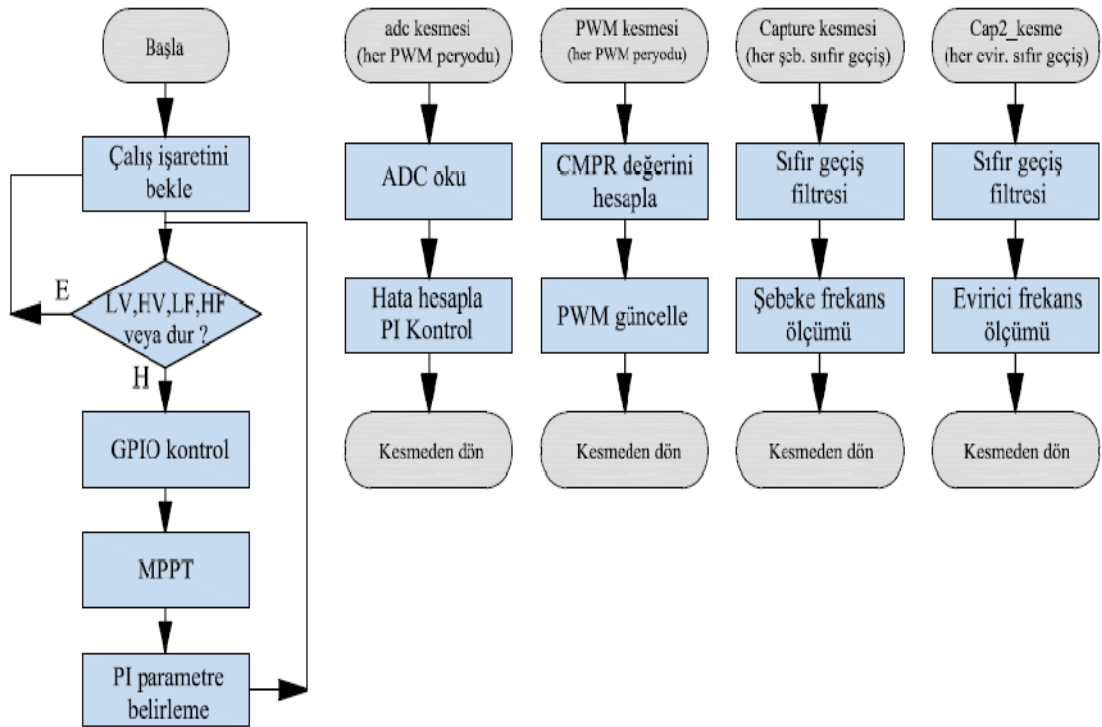


Şekil 7.18. Uygulama devresi denetim diyagramı

Üç fazlı üç seviyeli şebeke etkileşimli evirici denetim yazılımı denetim çipi olan TMS320F28335'in üreticisi Texas Instruments firması tarafından geliştirilen C tabanlı Code Composer Studio (CCS) v.5 ile yazılmıştır. Şekil 7.18’de tasarlanan

sistemin denetim blok diyagramı verilmiştir. Denetim algoritması evirici akım denetimi, PLL denetimi, DA dengeleme denetimi ve MPPT denetimi olmak üzere farklı döngülerden oluşmaktadır.

Şekil 7.19’da yazılım genel akış şeması verilmiştir. Program iki farklı yapıdan oluşmaktadır. Şeklin sağ tarafında bulunan analog okuma rutini, DGM rutini ile PI denetimi işlemlerinin uygulanma periyodu anahtarlama frekansı (10 kHz) ile aynı örnekleme periyotlarında yapılmıştır. Dolayısıyla her DGM üretiminde mevcut analog okumalar ve PI denetimini neticesinde bulunan modülasyon indeksi kullanılmıştır. Şebeke ve evirici frekansları her periyota okunarak şebeke ile paralel çalışmanın devamlılığı sağlanmıştır. Ana döngüde ise giriş çıkış işlemleri, düşük gerilim (LV), yüksek gerilim (HV), düşük frekans (LF), yüksek frekans (HF) v.b. denetimler ile PI katsayılarının belirlenmesi ve her şebeke periyodunda MPPT denetimiyle adım aralığının belirlenmesi işlemleri yapılmıştır.



Şekil 7.19. Algoritma özeti

7.3. Tasarlanan NPC Eviricinin Akım Denetimi

Şebeke etkileşimli eviriciler akım denetimli yada gerilim denetimli olarak tasarlanabilirler. Ancak gerilim denetimli çalışmada şebekeye enerji aktarabilmek için evirici geriliminin şebeke gerilimi ile aynı formda ve neredeyse aynı (çok küçük daha yüksek) genlikte olması gerektiğinden şebeke gibi güçlü bir kaynak ile paralel çalışırken senkronizasyonda oluşabilecek çok küçük hatalara karşı dayanıklı değildirler. Oysa akım denetimi bu hataları daha çok tolere edebilen bir denetim tekniğidir ki bu yüzden akım denetimli çalışma tercih edilmiştir. Bu çalışmada evirici akımının denetlenmesi için PI akım denetleyici tasarlanmıştır. Şebeke gerilimleri üzerinde oluşabilecek küçük farklılıklar şebeke ile paralel çalışan eviricinin dengesiz yüklenmesine sebebiyet verdiğinden ve tasarlanan eviricinin farklı faz yüklenmelerine imkan tanınmasına olanak sağlamak amacı ile her bir faz için ayrı bir denetçi kullanılmıştır. Tasarlanan PI denetleyici Eş. 7.1 ile ifade edilmiştir.

$$m_{a,b,c}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (7.1)$$

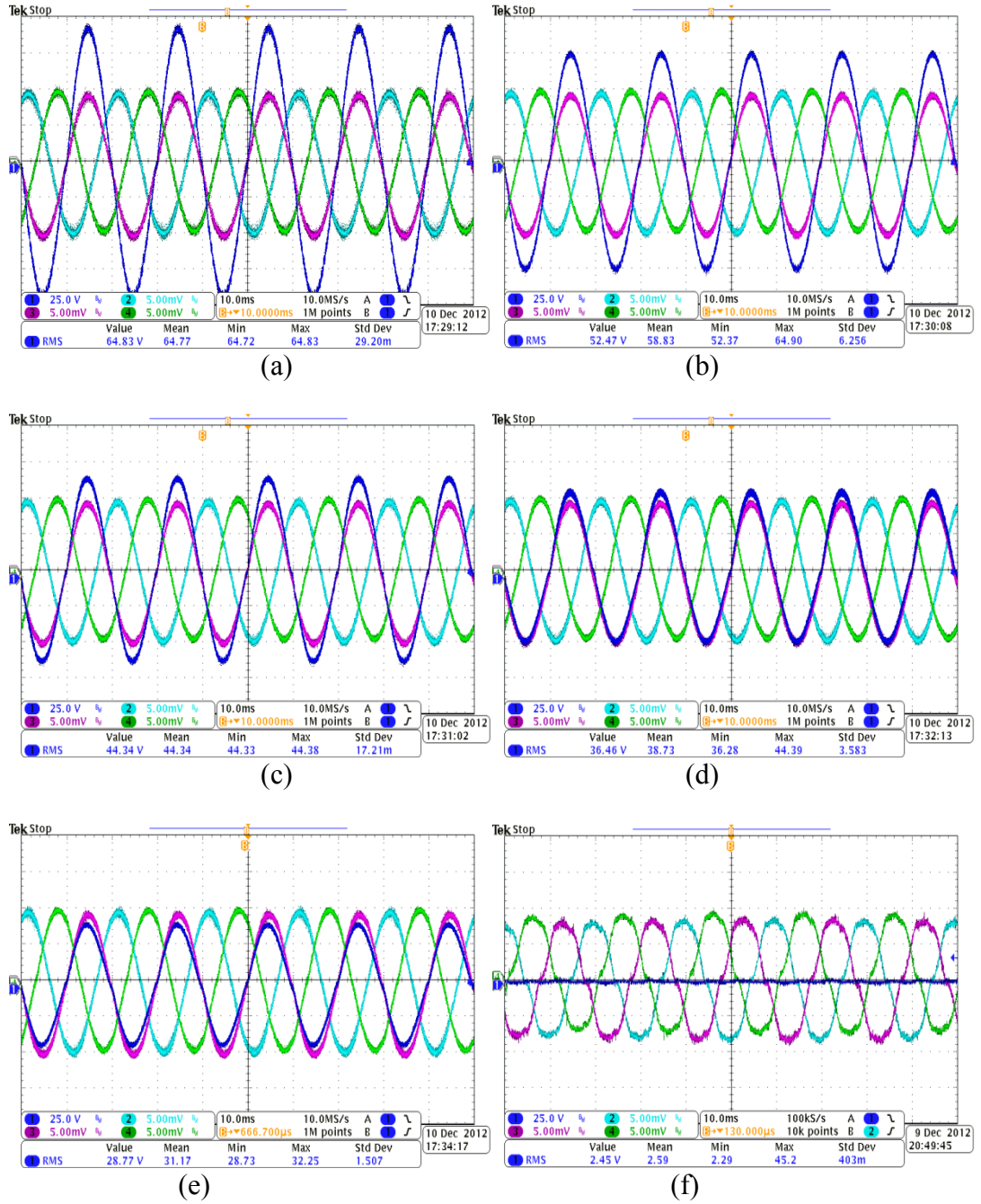
eşitlikte verilen ifadelerden $e(t)$ akım sinyalindeki hatayı, K_i integral kazancını, K_p oransal kazancı, ve $m_{a,b,c}(t)$ her bir çıkış sinyalini göstermektedir. Denetçi katsayıları olan K_p ve K_i katsayıları sistemin matematiksel modeli ve Ziegler-Nichols tarafından önerilen değerler kullanılarak tesbit edilmiştir [Ziegler ve Nichols, 1942]. Kapalı çevrim sistemlerde denetçi parametrelerinin bulunması için Ziegler ve Nichols tarafından önerilen formüller Çizelge 7.1'de verilmiştir. Bu değerlerler baz alınarak K_i için 110 ve K_p için 0,93 olarak bulunmuştur.

Çizelge 7.1. Denetçi parametrelerinin Ziegler ve Nichols metodu ile bulunması

	K_p	K_i
PI denetçi	$0,45K_{pu}$	$P_{pu}/1,2$

Şebeke etkileşimli çalışmada akım gerilim kaynaklı akım denetimli evirici yapısı kullanılacaktır. Akım denetimli çalışmanın performansını, PI denetçinin optimizasyonu ve test edilmesini sağlamak amacı ile algoritmada verilen çalışma prensibine göre çalışan evirici lokal olarak akım denetimli olarak çalıştırılmıştır. Şekil 7.20’de lokal akım denetimli çalışma durumuna ait osiloskop görüntüleri verilmektedir. Burada 1. kanal gerilim 2, 3 ve 4. kanal ise akım için kullanılmıştır. 2, 3 ve 4. kanallarda 1 mA/A dönüştürme oranında olan problar kullanılarak evirici akımı gösterge edilmiştir. Evirici çıkış akımı 7,2 A rms değerine ayarlanarak çalıştırılmıştır.

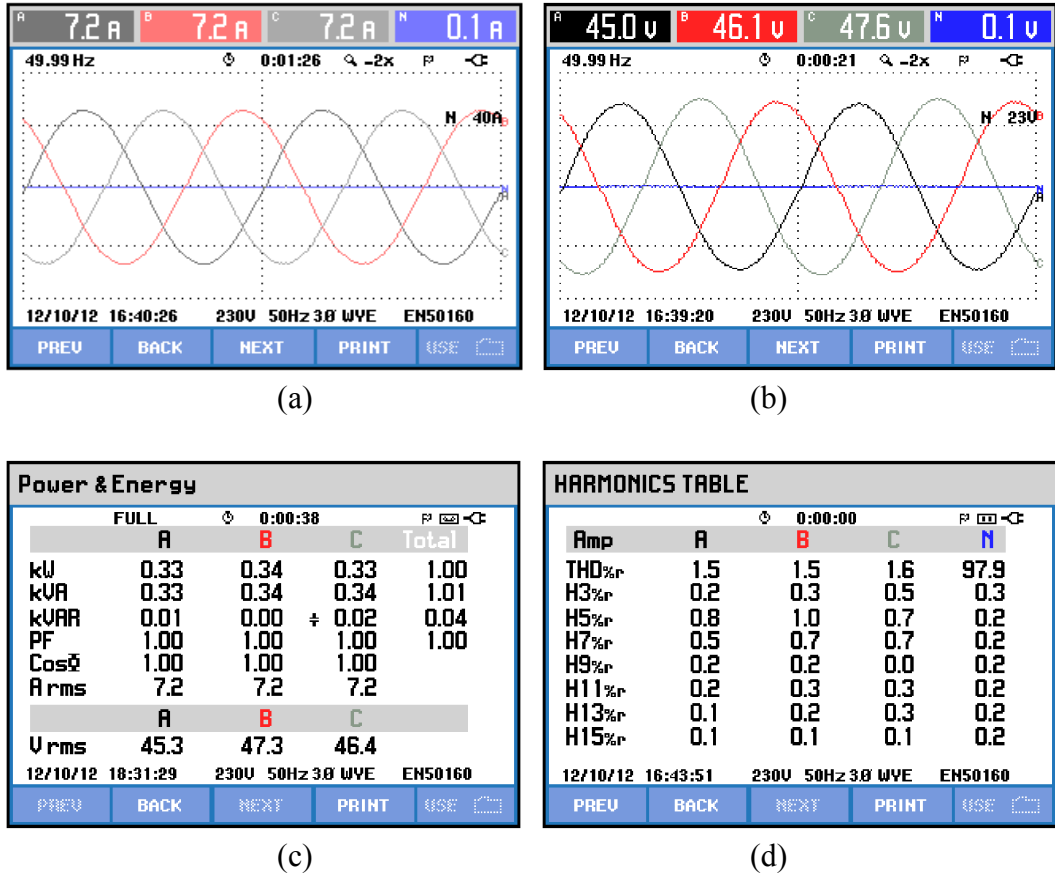
Evirici çıkışı omik yük ile Şekil 7.20 a,b,c,d,e,f’de sırasıyla sürekli olarak yüklenmiş en sonunda da kısa devre edilmiştir. 2, 3 ve 4. kanallardan görüleceği üzere evirici çıkış akımı rms değeri 7,2 A (7 mA) seviyesinde sabit kalmıştır. Evirici çıkış akımını ayarlanan değerde kalabilmek için çıkış gerilimi sürekli olarak düşmüştür. Son nokta olan kablo dirençleri ihmal edildiğinde kısa devre değerinde ise gerilim sıfıra giderken akım hala 7,2 A değerinde sabit kalabilmiştir.



Şekil 7.20. Akım denetimli lokal çalışma
a'dan f'ye evirici yükünün artırılarak en son kısa devre edilmesi

Evirici çıkışının her bir fazı ayarlanan akım değerinde sabit kalabilmiş ve sinüsoidal dalga formunu geniş bir aralıkta koruyabilmiştir. Burada evirici akım denetiminin farklı yüklerde dolayısıyla gerilimlerde ayarlanan değerde çalışabilmiştir.

Şebeke etkileşimli evirici 1000 W gücünde tasarlanmıştır. Anma gücünde akım ve gerilim dalga şekilleri ile bu esnadaki güç ve güç kalitesi bileşenleri Şekil 7.21'de sırası ile verilmiştir.



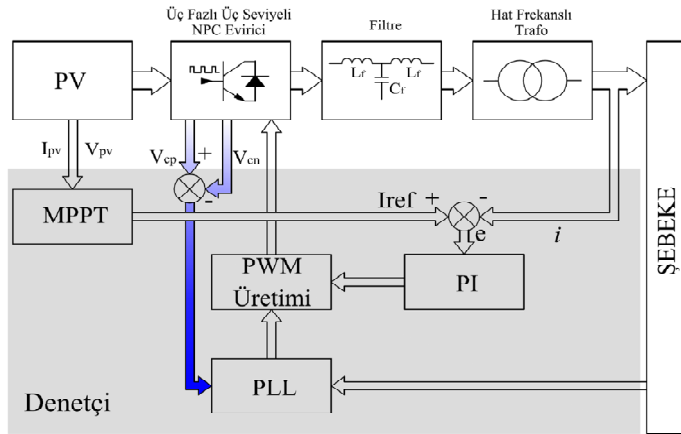
Şekil 7.21. Evirici lokal çalışma akım, gerilim dalga formu ve harmonikleri
a) Evirici akımları b) Evirici gerilimleri c) Evirici güçleri d) Evirici akımı toplam harmonik bozunum değerleri

Şekil 7.21'den de görüleceği gibi lokal çalışma akım harmoniği %1,5 değeri civarında olup faz akımları dengelidir. Gerilim dalga formundan gerilimlerin eşit olmadığı görülmektedir. Evirici akım denetimli çalıştığı, her bir faza bağlı olan yüklerin direnç değerlerinin aynı olmadığı düşünüldüğünde evirici aynı miktarda akım üretebilmek için çıkış gerilimini farklılaştırmaktadır.

7.4. Tasarlanan NPC Eviricide DA Nötr Akımı ve DA Bara Dengeleme

NPC evirici bölümünde bu tip eviricilerin girişindeki DA barayı ikiye bölen kondansatörler üzerinde gerilim dengesizliği problemleri ile karşılaşıldığı ve bu dengesizliğin nötr hattından akımların dolaşmasına neden olduğu, gerilim farkının bazı durumlarda çok aşırı seviyelere çıkabildiği ve bu gerilimden dolayı anahtarlama elemanlarının bozulmasına dahi sebep olabildiği açıklanmıştır. Bu dengesizlik asimetrik sinüs oluşumuna neden olabilmekte bunun sonucunda ise üretilen akımda DA bileşen oluşmaktadır.

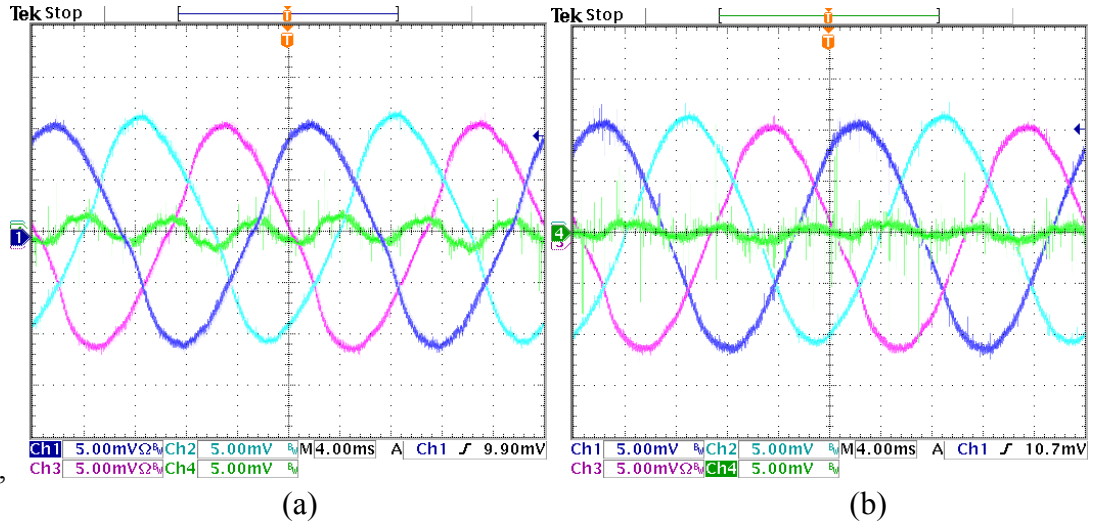
Bu çalışmada DA bara kondansatörleri üzerlerindeki gerilimler ayrı ayrı okunarak dengesizlik geri bildirim işareti denetim algoritmasına dahil edilerek bu dengesizlik giderilmiştir. Bu amaçla Şekil 7.22’de verilen şemada V_{cp} üst kondansatör gerilimini, V_{cn} alt kondansatör gerilimini göstermektedir. Alınan bu gerilimler arasındaki fark MPPT algoritması tarafından üretilen referans değerin pozitif ve negatif alternans değerini eşitleyici etki yapmaktadır.



Şekil 7.22. DA bara dengesizliğinin giderilmesi

Şekil 7.23 a ve b’de Ch1,2,3,4 sırası ile R, S, T ve Nötr akımlarını göstermektedir. Şekil 7.23 a’da DA dengeleme yapılmadığı durumdaki nötr akımı Şekil 7.23 b’de ise DA bara dengelemesi yapıldığı durum görülmektedir. Şekil 7.23 b’den

görülebileceği gibi nötr akımlarında önemli derecede düşüş olmuştur. Evirici çıkış akım harmoniklerinin tamamen yok edilememesi çok düşük bir miktarda nötr akımının dolaşmasına neden olmaktadır.



Şekil 7.23. Nötr akımı dengesizliğinin giderilmesi
a) Dengeleme yapılmadan önce b) Dengeleme yapıldıktan sonra

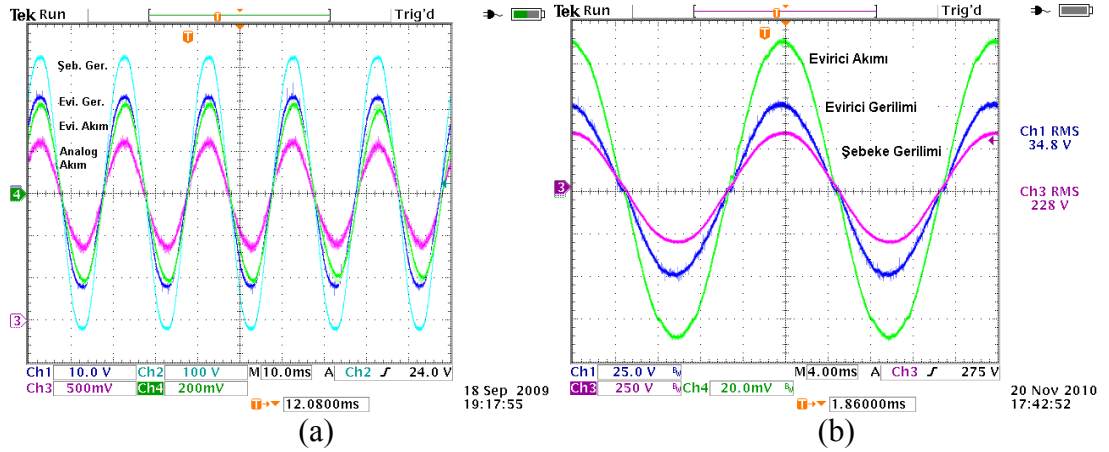
7.5. Tasarlanan NPC Eviricinin Şebeke ile Senkron Çalıştırılması

Şebeke etkileşimli eviricinin şebekeye enerji transfer edebilmesi için şebeke ile paralel senkron çalışması gerekmektedir. Bir başka deyişle şebeke frekansı ve faz açısı ile evirici frekansı ve faz açısının aynı olması ve bu eşitliğin hiç bir şartta bozulmaması gerekmektedir. Şebeke etkileşimli eviriciler şebeke ile evirici frekans ve faz açısında oluşabilecek farklara alternatörler gibi dayanıklı değildirler. Şebeke ile paralel çalışan alternatörün frekansı artırılmaya çalışıldığında üzerine yük almakta bir başka deyişle şebekeye daha fazla enerji transfer etmeye çalışmakta frekansı azaltılmaya çalışıldığında ise üzerindeki yükü yani şebekeye aktaracağı enerjiyi azaltmaktadır. Alternatör şebekeye bağlandıktan sonra senkronizasyonda problem olmamaktadır. Şebeke etkileşimli eviricilerde oluşabilecek faz ve frekans hatalarının sonucu kalıcı arızalara sebebiyet verebilmektedir. Bunun en önemli nedenlerinden biri anahtarların aşırı akımlara dayanıklılığının alternatör gibi sistemlerden kat kat az

olması ikincisi ise gerilim kaynaklı eviricilerde ters enerji akışı (şebekeden eviriciye) ve bununla birlikte gelen DA bara seviyesindeki yükselmenin sonucunda kullanılan kondansatör anahtar v.b. elemanların anma gerilimlerinin aşılması ile bozulmasıdır.

Şebeke etkileşimli eviricilerin şebeke ile senkronizasyonun sağlanması için Phase Lock Loop -PLL (Faz Kilitleme Döngüsü -FKD) algoritmaları kullanılmaktadır. FKD tarafından belirlenen faz ve frekans bilgisi denetçi referans işaretinin oluşturulmasında geri besleme işaretleri ile birlikte kullanılmaktadır. Başka bir deyişle FKD geri besleme işaretinin oluşturulmasında önemli rol oynamaktadır.

Tasarlanan sistemde şebeke ve evirici frekansı sıfır geçiş işareti TMS320F28335'in capture fonksiyonu kullanılarak algılanmıştır. Bu sinyal gürültülere karşı filtre edilmiştir. DGM sinyalleri için sinüs tablosu oluşturulmuştur. Geri beslemenden gelen işaret ve sıfır geçiş işaretleri tablo ilişkilendirilmiş ve olması gereken darbe genişlik oranı, frekans ve faz açısı değerleri belirlenmiştir.

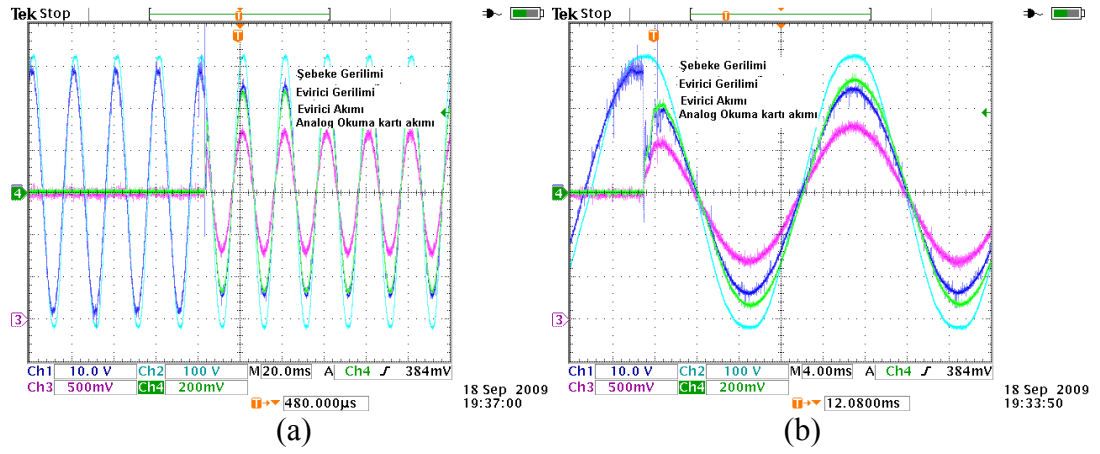


Şekil 7.24. Şebekeden bağımsız senkron çalışma durumları
a) Uzun süreli gösterim b) Yakınlaştırılış gösterim

Şekil 7.24 a'da şebekeden bağımsız çalışan eviriciden elde edilen akım ve gerilim dalga formları görülmektedir. Şekilde şebeke gerilimi, evirici gerilimi, evirici akımı ve geri besleme işareti görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere evirici lokal çalışma

modunda şebekeyi takip ederek senkron kalabilmektedir. Şekil 7.24 b’de lokal çalışan eviricinin şebeke ile senkronizasyonunun daha ayrıntılı şekli görülmektedir. Görüldüğü gibi senkron çalışmada faz farkı 0’dır.

Evirici Şekil 7.25 a ve b’de şebeke ile senkron çalışan eviricinin adım tepkisi görülmektedir. Görüldüğü üzere evirici adım tepkisinde senkronizasyondan kopmamış 10 ms’den daha kısa sürede toparlanmıştır.



Şekil 7.25. Şebekeden bağımsız senkron çalışma durumları
a) Uzun süreli gösterim b) Referans değişim anı

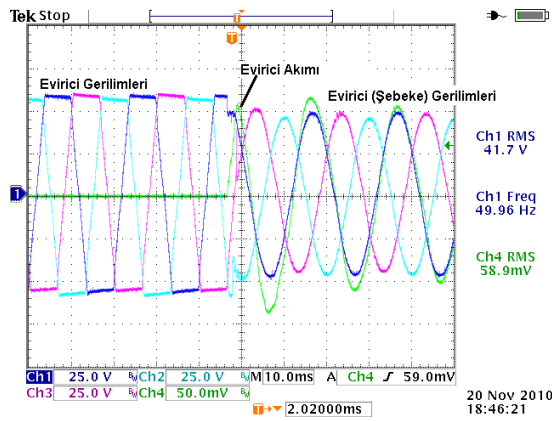
7.6. Tasarlanan NPC Eviricinin Şebeke ile Paralel Senkron Çalıştırılması

Tasarlanan şebeke etkileşimli evirici gerekli lokal ve lokal senkron çalışma testleri yapıldıktan sonra şebekeye paralel bağlanmıştır. Şebekeye enerji aktarabilmek için üretilen gerilim seviyesinin şebekeden daha büyük olması gerekir. Bu amaçla üretilen gerilim bir transformatör yardımı ile şebeke gerilim seviyesine dönüştürülmüş ve şebekeye aktarılmıştır.

Evirici gerilim kaynaklı akım denetimli olarak tasarlandığından lokal olarak çalıştırılırken verilen referans akım değerinin çıkıştaki yükün talep ettiğiinden fazla olması durumunda verilen referans akıma hiçbir zaman ulaşamayacağından evirici

modülasyon işareti sürekli artacak ve en sonunda alabileceği en yüksek değeri alacaktır. Bu ise çıkış işaretinin enerjinin talep edilmediği veya az talep edildiği durumlarda sinüs dalga formundan uzaklaşıp kare dalgaya dönüşeceği anlamına gelmektedir. Bu durumu engellemek için evirici gerilim kaynaklı akım denetimli çalışma modunu bu gibi durumlarda terk ederek gerilim kaynaklı gerilim denetimli çalışmaya çevirecek şekilde tasarlanmıştır. Özetle evirici akım denetimli çalışmayı çıkış gerilimin eşik değerini geçtiği durumlarda terk ederek gerilim denetimli çalışmaya çevirecek şekilde tasarlanmıştır. Ancak eviricinin şebeke ile paralel çalışmaya başladıktan sonra şebeke bağlantısının var olup olmadığının denetimi, şebekenin hangi şartlarda var kabul edileceği ve ada modunun tespiti bu çalışmanın konusunu aştığından irdelenmemiştir.

Şekil 7.26’da evirici boşa çalıştırılırken şebeke ile paralel çalışması için herhangi bir anda şebekeye bağlanmıştır. Bir bakıma %0-%100 adım tepkisi olarak değerlendirilebilecek bu durum şu şekilde açıklanabilir;

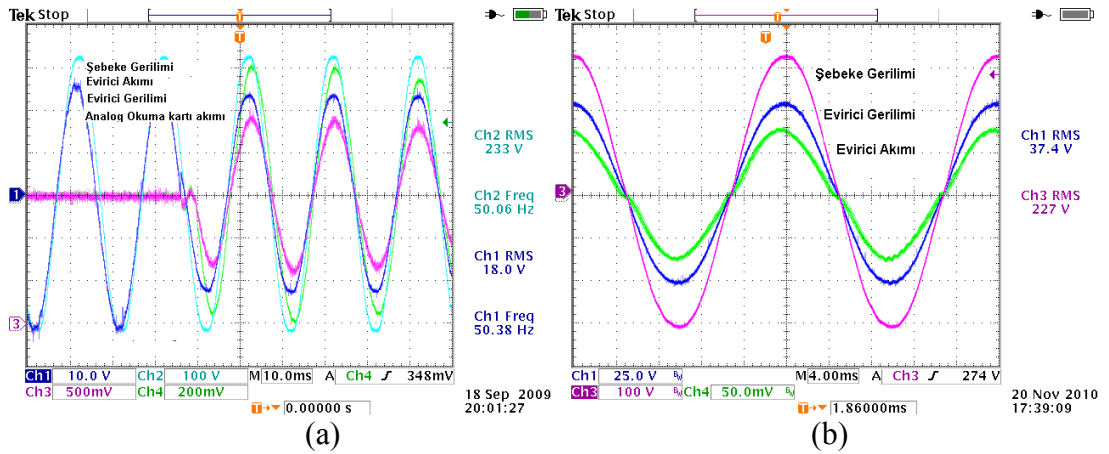


Şekil 7.26. Eviricinin boş çalışmadan şebeke ile çalışmaya geçişi

Evirici boşa çalışırken denetim mekanizması eviriciyi ayarlanan akım değerinde akım verebilmesi için gerekli DGM sinyalleri üretir. Ancak evirici çıkışında herhangi bir yük olmadığından akım akmayacağından geri besleme sisteminden yeterli akım olmadığı bilgisi gelir. Bu durumda denetim mekanizması DGM oranlarını sürekli

olarak artırır. Sonuç olarak DGM aşırı modülasyona girerek kare dalgaya yakın gerilim üretmeye başlar. İstenildiği takdirde bu gibi durumlarda gerilim denetimli sisteme geçilerek çıkış gerilimi ayarlanan gerilim seviyesinde sinüs dalga formunda tutulabilir. Bu durum Şekil 7.27’de verilmiştir. Evirici boşa çalışırken senkron çalışma durumundan taviz verilmez. Boş çalışma durumundan şebeke ile çalışma durumuna geçiş sağlandığında denetim mekanizması evirici çıkışındaki akımı ayarlanan değerde tutar.

Şekil 7.27 a’da ise Şekil 7.26’da verilen duruma benzer bir durum verilmiştir. Ancak burada evirici lokal modda çalışırken akım denetim algoritmasının çıkış geriliminin olması gereken sinüs dalga formundan bozulmasına izin verilmemiştir. Evirici ada modunda çalışırken şebeke ile paralel hale getirilmiştir.

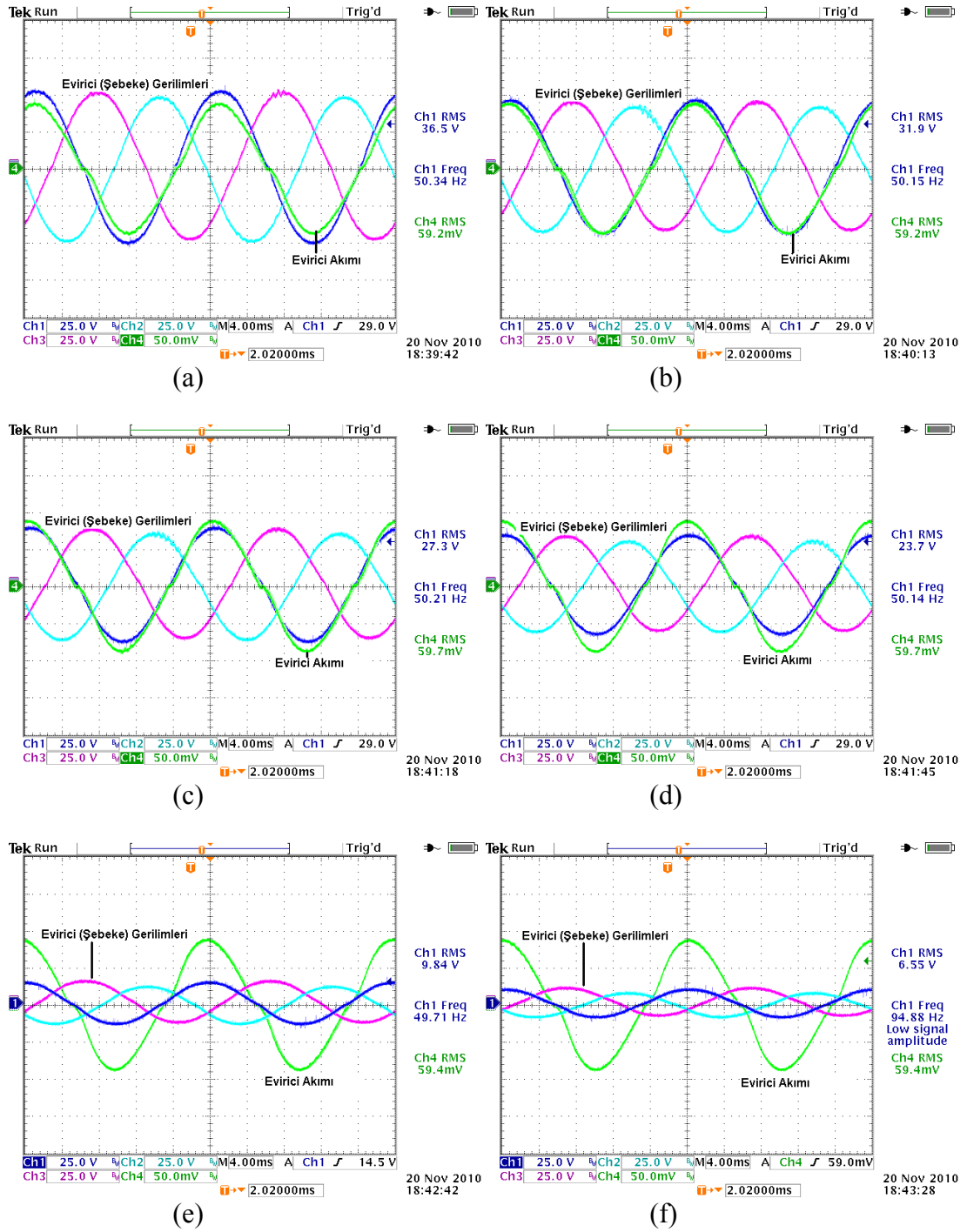


Şekil 7.27. Eviricinin ada modu çalışmadan şebeke ile çalışmaya geçişi
a) Uzun süreli gösterim b) Kararlı durum çalışması

Şekil 7.27 b’de şebekeye ile paralel çalışma durumunda bir faza ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şebekeye bağlantıda evirici gerilimi ile şebeke gerilimi aynı değeri ifade etmektedir. Yani, evirici gerilimi şebeke gerilimi ile aynı genliğe gelmek zorunda bırakılmaktadır. Evirici şebekeye enerji transferini gerçekleştirebilmek için gerilimini yükseltmeye çalışmaktadır. Bu durum tıpkı şebekeye enerji veren alternatörün frekansının yükseltilmeye çalışıldıkça üzerine yük

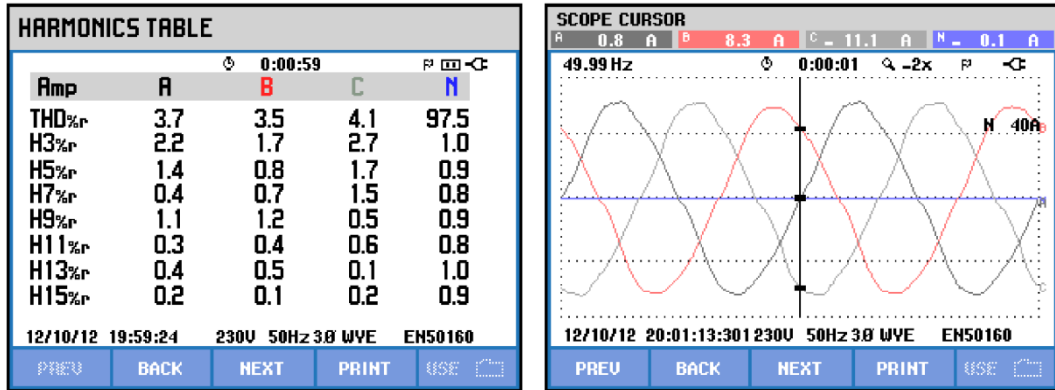
alması durumunda olduğu gibidir. Generatör hiçbir zaman şebeke frekansı geçememekte ancak üzerine aktif yük almaktadır. Burada da evirici gerilimi şebekeden yüksek olmaya çalışmakta uygulamada çıkış endüktansı ve hat direnci dikkate alındığında da çok az bir miktar büyük olmayı başlarabilmektedir. Bunun sonucunda da fark miktarınca enerji transferi mümkün olabilmektedir. Şekilde genlik sırasına göre şebeke gerilimi, evirici gerilimi ve evirici akımı verilmiştir. Burada bahsedilen evirici gerilimi evirici çıkışındaki gerilimdir. Bu gerilim transformatör yardımı ile yükseltildiğinden hat frekanslı transformatörün primer tarafındaki gerilimdir. Diğer gerilim ise şebeke yani transformatörün sekonder tarafındaki gerilimdir.

Şekil 7.28’de şebeke etkileşimli akım denetimli çalışma durumuna ait osiloskop görüntüleri verilmektedir. Burada kanal 1,2 ve 3 gerilim 4. kanal ise akım gösterimi için kullanılmıştır. 4. kanalda 10 mA/A dönüştürme oranındaki proba evirici akımı gösterge edilmiştir. Evirici çıkış akımı 6 Amp RMS değerine ayarlanarak çalıştırılmıştır. Evirici çıkışı şebeke ile yüklenmiştir. DC kaynaktan elde edilen gerilimin şebeke gerilimine göre küçük olduğundan arada ayarlı transformatör kullanılmıştır. Ayarlı transformatör dönüştürme oranı Şekil 7.28 a,b,c,d,e,f’de sürekli olarak artırılmış değişik çalışma gerilimlerinde sistem test edilmiştir. 4. kanalın RMS değerinden görüleceği üzere evirici çıkış akımı RMS değeri 6 Amp (60 mA) seviyesinde sabit kalmıştır. Denetim sistemi sürekli olarak şebekeye aktarılan akımın ayarlanan değerde tutulmasını sağlamak amacı ile gerekli DGM değerinin üretilmesini sağlamaktadır.



Şekil 7.28. Farklı gerilimlerde şebeke etkileşimli çalışma
a'dan f'ye transformatör dönüştürme oranının artırılması

Eviricinin lokal çalışma durumlarına ait dalga formları Şekil 7.23’de verilmişti. Şebeke ile etkileşimli çalışma durumunda akım harmonikleri ve dalga formları ise Şekil 7.29’da verilmiştir.



Şekil 7.29. Şebeke ile çalışma akım dalga formları ve harmoniği

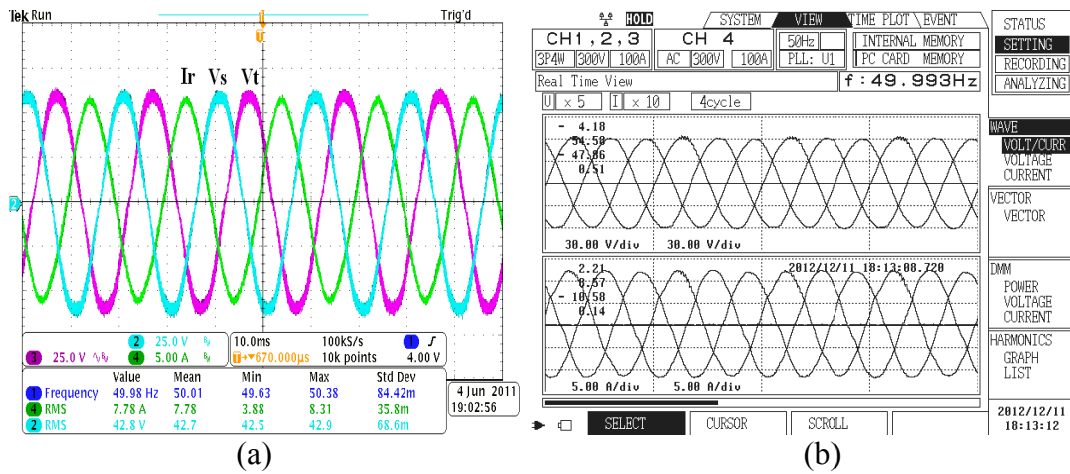
Burada lokal çalışmada %1,5 civarında ölçülen akım harmoniği şebeke ile çalışmada %3,8 değeri civarında ölçülmüştür. Buradaki artışın sebebi şebekenin daha dinamik bir sistem oluşudur. Harmoniklerdeki yükselmeye karşın hala sistem uluslararası standartlarda belirtilen harmonik sınırından (<%5) daha düşük seviyededir.

Power & Energy				
	FULL			
	A	B	C	Total
kW	0.36	0.34	0.32	1.02
kVA	0.36	0.34	0.33	1.03
kVAR	÷ 0.03	÷ 0.04	÷ 0.04	÷ 0.12
PF	1.00	0.99	0.99	0.99
Cosφ	1.00	0.99	0.99	
Arms	8.0	7.9	8.0	
	A	B	C	
Vrms	45.1	42.9	41.1	
12/10/12 20:02:43 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160				
PREV	BACK	NEXT	PRINT	USE

Şekil 7.30. Eviriciden şebekeye aktarılan güç

Şekil 7.30'da şebekeye aktarılan enerjinin aktif ve reaktif bileşenleri verilmiştir. Şekildende görüleceği gibi birim güç faktöründe güç aktarımı sağlanmıştır. Ayrıca fazlardan eşit seviyede enerji aktarımı sağlanmıştır. Tasarlanan sistem istenildiği takdirde bu eşitliği bozacak şekilde de çalışabilmektedir.

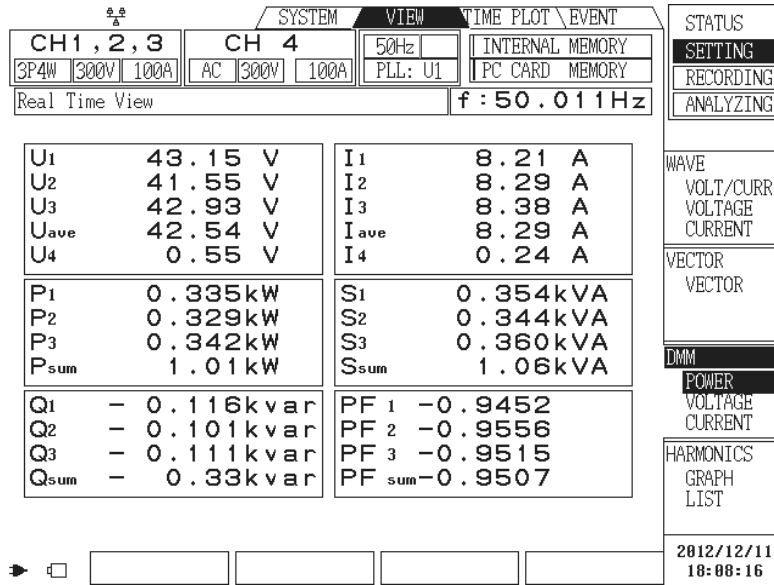
Şekil 7.31 a'da evirici R fazı çıkış akımı dalga formu ile S ve T fazı gerilim dalga formları gösterilmiştir. Şekil 7.31 b'de ise evirici çıkış 3 faz akım ve gerilimleri toplu halde gösterilmiştir. Buradan da görüleceği üzere evirici anma gücünde şebeke şartlarında sorunsuz bir şekilde çalışabilmektedir.



Şekil 7.31. MPPT'li şebeke etkileşimli evirici çıkış akım ve gerilim dalga formu

Şebeke etkileşimli evirici şebekeye birim güç faktöründe ve uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dahilinde akım verebilmek için tasarlanmış olsa da istenildiği takdirde şebekeye reaktif enerji de verebilmektedir. Dağıtılmış enerji üretiminin yaygınlaşması ile birlikte şebeke yöneticileri enerji üreten sistemlerden zaman zaman reaktif enerji talebinde de bulunabilmektedirler. Genellikle şebeke yükleri endüktif reaktif olduğundan talep bu endüktif reaktifliği dengelemek için kapasitif reaktif enerji talebi şeklinde olsa da güç kaynakları, elektronik balastlı lambalar gibi yüklerin şebekeden kapasitif reaktif enerji talep ettikleri bilinmektedir. Bu gibi durumlarda ise şebekeden gelen talep bu kapasitif reaktifliği dengelemek için

endüktif reaktif şeklinde de olabilmektedir. Ancak genellikle talep kapasitif reaktif yönündedir.



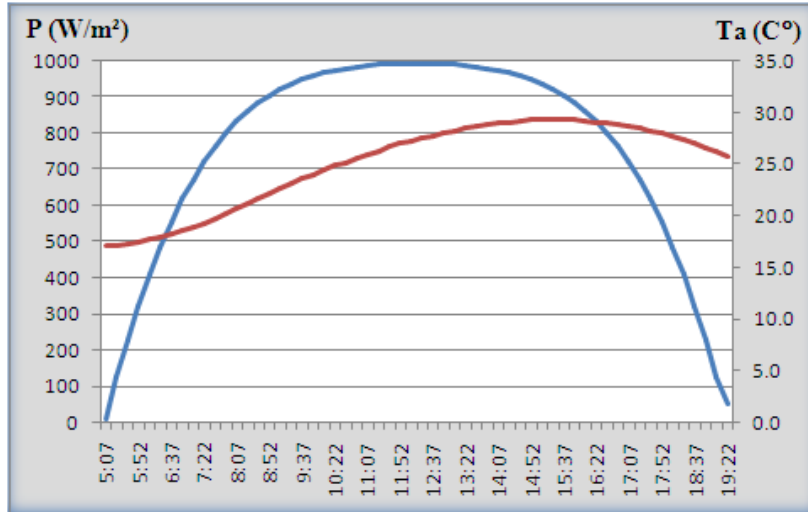
Şekil 7.32. Üç seviyeli evirici aktif ve reaktif enerji denetimi

Tasarlanan evirici birim güç faktöründe enerji transferinin yanı sıra şebeke ile paralel olarak çalışırken reaktif güç denetimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Evirici 0,95 kapasitif reaktif olarak çalıştırılmıştır. Bu duruma ait güç analizörü görüntüleri Şekil 7.32’de verilmiştir.

7.7. Tasarlanan NPC Eviricinin MPPT Denetimi

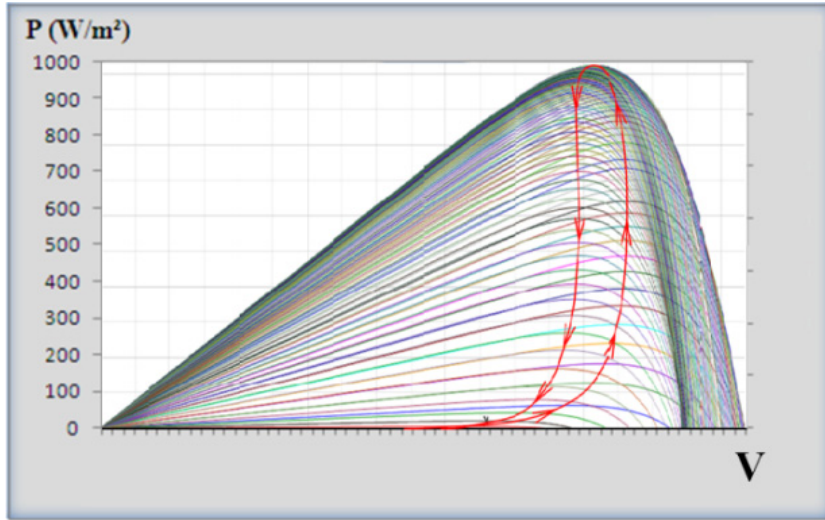
PV panel ile beslenen MPPT yapabilen herhangi bir çeviricinin yapması gereken iş, değişen atmosfer koşullarında değişecek çıkış gücünün her an PV panelden çekilebilmesini sağlamaktır. Atmosfer koşulları bulutlanma v.b mevsimsel etkilerden değiştiği gibi PV panelin enerji üretebileceği zaman aralığı olan güneşin doğumundan batımına kadar hem sıcaklık olarak hem de ışınım şiddeti olarak

değişmektedir. Şekil 7.33’de gerçek veriler kullanılarak oluşturulmuş olan bir gün boyunca güneş ışını şiddeti ve sıcaklığın değişimi görülmektedir.



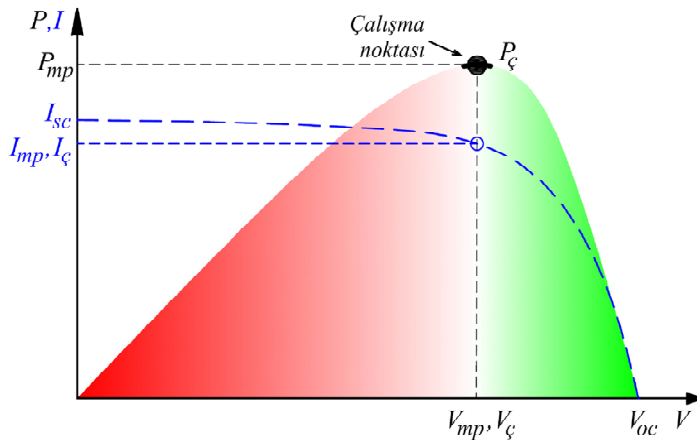
Şekil 7.33. Bir gün boyunca sıcaklık ve ışınlam şiddetinin değişimi

Şekil 7.34’de Şekil 7.33’de belirtilen çalışma koşullarında çalışan ticari bir PV panelin her bir ışınlam şiddeti için çıkış güç eğrileri görülmektedir. Gerçekte her bir an için bir eğri olması gerekmektedir. Yani sonsuz sayıda eğri vardır denilebilir. Ancak durumun kolay anlaşılabilmesi amacıyla eğri sayısı azaltılarak verilmiştir. Şekil 7.34’de verilen güç eğrilerin tepe noktalarını dik kesen bir eğri daha görülmektedir. Bu eğri bir gün boyunca PV panelin çıkış gücünün değişimini vermektedir. Bu eğri şu şekilde yorumlanmalıdır. Sabahın ilk saatleri ile enerji üretmeye başlayan PV panelin gücü gün ilerledikçe ışınlam ile birlikte ok yönünde artmaktadır. Gün ilerledikçe panel sıcaklığının da etkisi ile çıkış gücü eğrisinin dönüş yönünde bir miktar farklılaşma olmaktadır (Sıcaklığın PV panel üzerindeki etkisi Şekil 4.7’de verilmişti.). Panelin en yüksek güç noktalarının birleşiminden oluşan güç eğrisi ok yönünde hareket ederek akşam saatinde başlangıç noktası olan “0” noktasına geri dönmektedir.



Şekil 7.34. Bir gün boyunca PV çıkış gücünün değişimi.

Şekil 7.34'de verilen MPPT eğrilerinin MP noktalarının takip edilmesi gerekmektedir. Günün belirlenen bir anı için bu MPPT eğrilerinden bir tanesi Şekil 7.35'deki gibi çizilebilir.



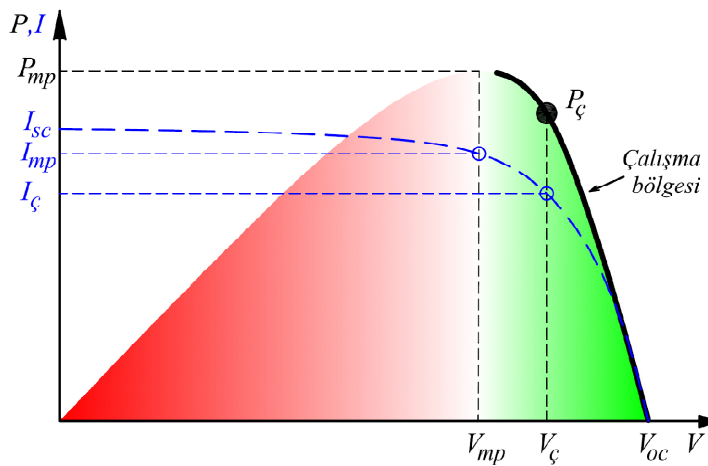
Şekil 7.35. Çevirici çalışma noktasının MP noktasında olma durumu

Şekil 7.35 ile gösterilen çalışma anında I_{ϕ} ile gösterilen çalışma akımı noktası ile I_{mp} ile gösterilen maksimum akım noktası aynı noktadır. Aynı şekilde V_{ϕ} ile gösterilen çalışma gerilimi ile V_{mp} gerilimi ve P_{ϕ} ile gösterilen çalışma gücü noktası ile P_{mp}

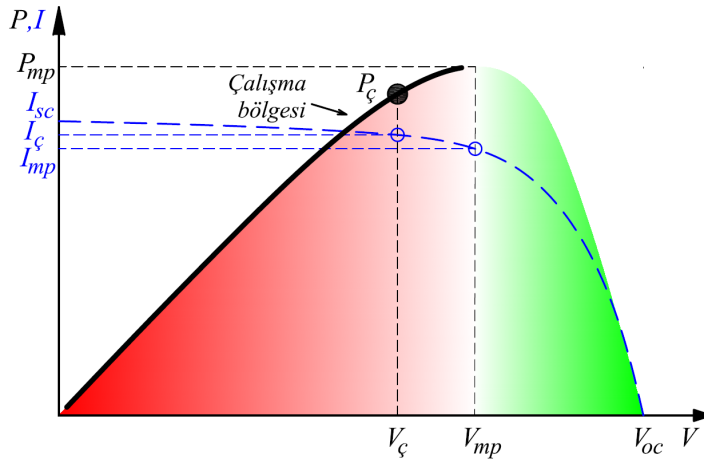
noktası örtüşecektir. Bu çalışma noktası MPPT yöntemlerinden biri ile belirlenmiş referans akım I_{ref} , referans gerilim V_{ref} yada referans güç P_{ref} ile bulunabilir. Bu durumda çalışma noktası tam MP noktasında olduğundan PV'den üretilebilecek en yüksek miktardaki güç alınabiliyor anlamına gelmektedir.

Çalışma noktası Şekil 7.36'da belirtildiği gibi MP eğrisinin sağında ise PV panel çıkışındaki yük PV panelin vereceği enerjiyi tam anlamı ile kullanamıyor demektir. Bu yük miktarının az olması ile izah edilebileceği gibi gerçekte panel çıkışında bir çevirici olduğundan çevirici referansının düşük kaldığı anlamına da gelmektedir.

Şekil 7.36 ile gösterilen çalışma anında I_{ϕ} ile gösterilen çalışma akımı I_{mp} ile gösterilen maksimum akımdan daha düşük seviyede iken V_{ϕ} ile gösterilen çalışma gerilimi V_{mp} geriliminden daha büyük değerdedir. P_{ϕ} ile gösterilen çalışma gücü noktası ise P_{mp} noktasından daha düşük değerdedir. Bu çalışma noktası MPPT yöntemlerinden biri ile belirlenmiş referans akım I_{ref} , referans gerilim V_{ref} ya da referans güç P_{ref} değerlerinin hatalı belirlenmesi sonucunda oluşabildiği gibi, değişen atmosfer koşullarında henüz gerçek referans değerine ulaşmamış bir denetçi çıkışı etkisiyle de oluşmuş olabilir. Gerçek MP noktasının bulunabilmesi için referans değerinin artırılması gerekmektedir.



Şekil 7.36. Çevirici çalışma noktasının MP noktasının sağında olma durumu



Şekil 7.37. Çevirici çalışma noktasının MP noktasının sağında olma durumu

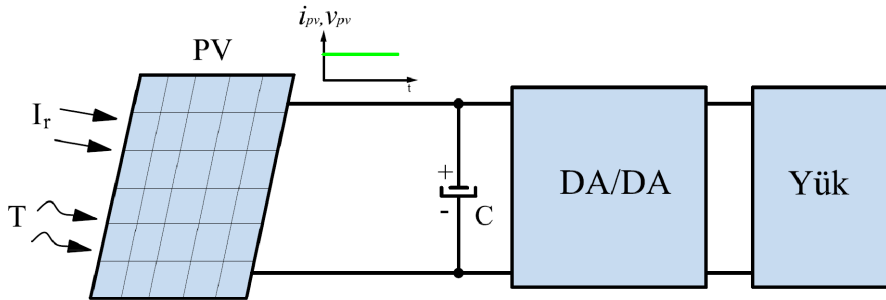
Çalışma noktası Şekil 7.37'de belirtildiği gibi MP eğrisinin solunda ise PV panel çıkışındaki yük PV panelin vereceği enerjiyi tam anlamı ile kullanamıyor demektir. Bu yük miktarının çok olması ile izah edilebileceği gibi gerçekte panel çıkışında bir çevirici olduğundan çevirici referansının yüksek olduğu anlamına da gelmektedir.

Şekil 7.37 ile gösterilen çalışma anında $I_{\text{ç}}$ ile gösterilen çalışma akımı I_{mp} ile gösterilen maksimum akımdan daha yüksek seviyede iken $V_{\text{ç}}$ ile gösterilen çalışma gerilimi V_{mp} geriliminden daha küçük değerdedir. $P_{\text{ç}}$ ile gösterilen çalışma gücü noktası ise P_{mp} noktasından daha düşük değerdedir. Bu çalışma noktası MPPT yöntemlerinden biri ile belirlenmiş referans akım I_{ref} , referans gerilim V_{ref} ya da referans güç P_{ref} değerlerinin hatalı belirlenmesi sonucunda oluşabildiği gibi değişen atmosfer koşullarında henüz gerçek referans değerine ulaşmamış bir denetçi çıkışı etkisiyle de oluşmuş olabilir. Gerçek MP noktasının bulunabilmesi için referans değer azaltılması gerekmektedir.

MPPT denetim sistemi ilk önceleri DA/DA çeviriciler üzerinde uygulanmıştır. Bu uygulama alanları genişleyerek DA/DA/AA çeviricilere ve en son olarak da DA/AA eviriciler üzerinde uygulanmaya başlamıştır. Şekil 7.38'de DA/DA çeviriciler üzerinde uygulanan MPPT yöntemleri ve bunların algıladığı büyüklükler toplu halde

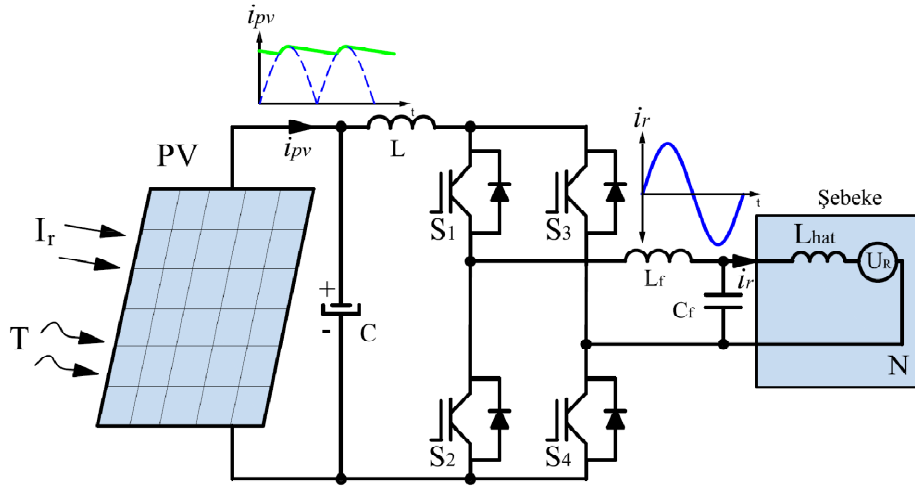
7.7.1. Tek aşamalı eviricide doğrudan denetimli MPPT problemleri

Şekil 7.39'da MPPT yapabilen DA/DA çevirici şeması görülmektedir. DA/DA çevirici girişindeki yani PV panel çıkışındaki DA seviyesi kalıcı durum için saf denilebilecek kadar doğrusal bir gerilime ve akıma sahiptir. Bu işaretler üzerinde DA/DA çevirici anahtarlama frekansında bir dalgalılık söz konusudur ki, bu ripple frekansı ve seviyesi düşünüldüğünde neredeyse doğrusaldır denilebilir. Dolayısıyla gerçek MPPT yapabilen doğrudan yöntemlerle, ki bu yöntemler güç ve güç bileşenlerini geri besleme işareti olarak kullanmaktadırlar, bu çevirici rahatlıkla denetlenebilir. Bu tarz çeviriciler doğrudan MPPT algoritması tarafından belirlenen referans değişim bilgisi ile denetlenebildikleri gibi MPPT çıkışındaki referans PI, PID v.b. denetçinin referansını da oluşturabilmektedirler. Bu gibi durumlarda MPPT algoritması ile ikincil denetim algoritması uyumlu bir şekilde çalışabilmektedirler.



Şekil 7.39. Güneş pili ile beslenen DA/DA çevirici

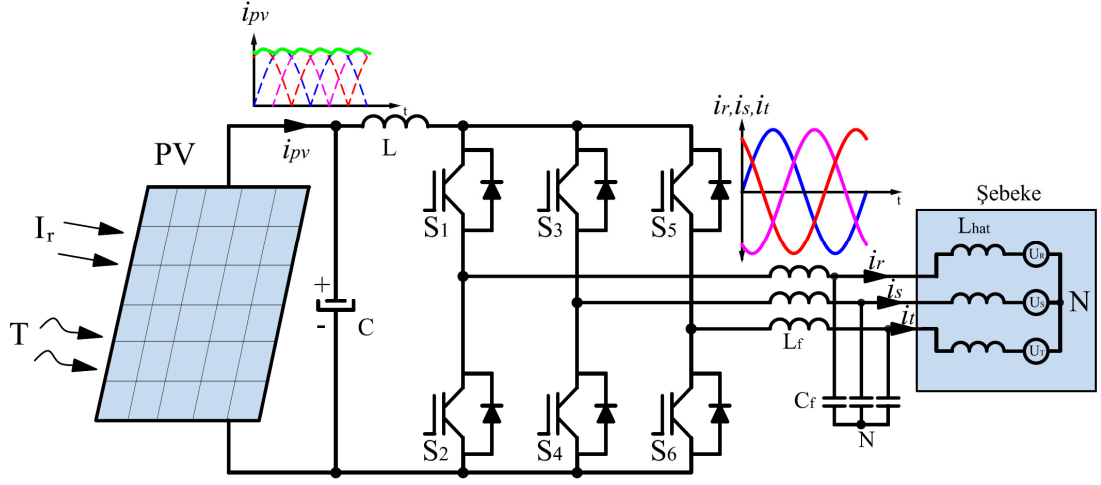
Şekil 7.39'daki durum DA/DA çevirici çıkışına bağlanacak yükün karakteristiğinden önemli ölçüde etkilenmez. Yani DA/DA çevirici çıkışına bağlanacak yükün şebeke etkileşimli evirici gibi bir yük olması mümkündür. Bu durumda sistem PV kaynaktan beslenen iki aşamalı şebeke etkileşimli evirici adını alır.



Şekil 7.40. Bir fazlı tek aşamalı iki seviyeli şebeke etkileşimli evirici

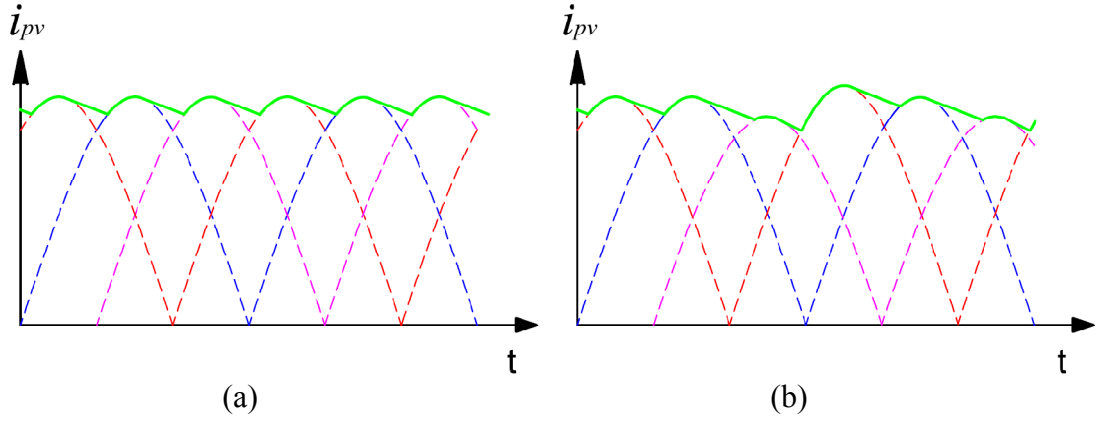
PV kaynak Şekil 7.40'daki gibi doğrudan şebeke etkileşimli eviricinin girişini oluşturduğu durumda doğrudan denetim yapan sistemlerde için akım, gerilim dolayısıyla güç hesaplamalarında bir takım zorluklar meydana gelecektir.

Şekil 7.40'da verilen şemada i_r evirici çıkış akımı dalga formu bilindiği ve olması gerektiği gibi sinüs formundadır. Dolayısıyla bu tarz eviricilerin kaynaktan çekeceği akım yine Şekil 7.40'da i_{pv} olarak verilen akımın dalga formu olan tam mutlak değer sinüs işareti şeklinde olacaktır. Gerilim dalga formunda akım dalga formundaki kadar olmasa da bir miktar dalgalılık söz konusu olacaktır.



Şekil 7.41. Üç fazlı tek aşamalı iki seviyeli şebeke etkileşimli evirici

Bu akım ve gerilim DA baraya bağlanacak paralel kondansatör ve seri endüktans ile bir miktar filtre edilebilse de bir takım kısıtlamalar nedeni ile sorun çözülemeyecektir. Ripple frekansı ise şebeke frekansının iki katı kadar olacaktır. Şekil 7.40 yerine Şekil 7.41'deki gibi üç fazlı bir sistem ile güç aktarımı gerçekleştirildiğinde benzer durumlar ile karşılaşılacak ancak i_{pv} 'de meydana gelen dalgalılık Şekil 7.42 a'dan daha ayrıntılı bir şekilde görüleceği gibi daha az olacak ve ripple frekansı ise şebeke frekansının 6 katı kadar olacaktır. Ripple genliği sabit olarak düşünülse de durum her zaman böyle olmayabilir. Şekil 7.42 b'de şebeke şartlarında meydana gelebilecek dengesizliğin DA baraya yansıması verilmiştir. Sonuç olarak akım, gerilim ve güç hesaplamaları anlık değerler ile belirlendiğinde dalgalılık sonuca yansımaktadır. Daha önceden de açıklandığı gibi doğrudan denetim tekniklerinden olan P&O yöntemi darbe oranının değişimi ile gücün değişimi arasındaki ilişkiye göre bir sonraki darbe oranını belirler. IC yönteminde ise gücün gerilime göre türevi DGM sinyalinin durumunu belirler. Şekil 7.42'de verilen durumlarda örnekleme zamanının kısa tutulması MPPT algoritmasının geri besleme işareti olarak kullandığı güç hesabında yanılgılara sebebiyet verecektir. Çözüm ise anlık değerlerin kullanılması yerine ortalama değerlerin kullanılması ile çözülebilecektir.



Şekil 7.42. DA bara akım dalgalılığı
a) dengeli durum b) dengesiz durum

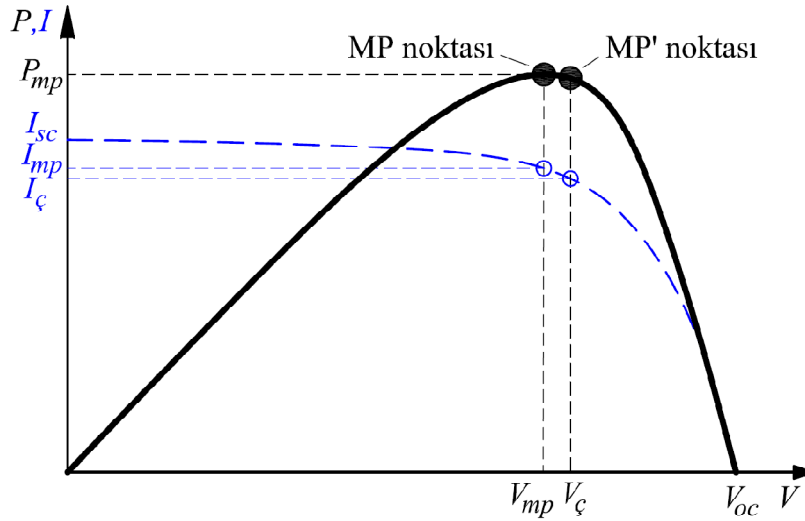
Şekil 7.42'de belirtilen duruma çözüm olarak önerilen akım, gerilim ve bunlardan elde edilen güç gibi geri besleme bilgilerinin ortalama değer ile hesaplanabilir olması, doğrudan denetim tekniği ile çalışan ve MPPT yapabilen şebeke etkileşimli evirici gibi dinamik bir sistem için uygun olmamaktadır. Evirici sistemlerinde çıkış sinyalinin değerini denetleyen PI, PID v.b. denetim algoritmalarının geri besleme bilgisinin sadece etkin değer olarak alınması dinamik olmayan doğrusal yükler için kullanılabilir olsa da, doğrusal olmayan yükler ile şebeke gibi dinamik yüklerde çıkış harmonik bozunum seviyesi v.b kriterler açısından doğru sonuçlar verememektedir. Çıkış dalga formu hem etkin değer olarak hem de şekil olarak denetlenmelidir. Sonuç olarak şebeke etkileşimli evirici çıkış dalga formu ancak anlık olarak denetlendiğinde şebeke yöneticileri tarafından belirlenen şartlarını sağlayabilecektir. Bu durumda bir şebeke periyodunda çıkış dalga formunu denetleyen denetçi onlarca kez çalışmak durumunda kalacaktır (Önerilen sistemde bir periyotta her bir faz için 200 kez PI algoritması çalışmaktadır).

Evirici çıkış akımının referansını belirleyen MPPT algoritması örnekleme zamanı Şekil 7.42'da verilen şeklin açıklamasında belirtildiği gibi şebeke periyodu süresinden daha kısa sürede yapılmadığında daha doğru sonuç elde edilir. Bu süre

verilen referans değeri PV panelin karşılayabileceği güç miktarından daha fazla olduğundan evirici referansına ulaşamayacak ve denetçi hatası büyümeye başlayacaktır. Hatayı telafi etmek isteyen denetçi DGM sinyalini daha da büyütecek bu durum ters etki oluşturarak PV panel gerilimin dolayısıyla gücünün düşmesine neden olacaktır. Güç düştükçe de denetçi çıkışı tekrar ve tekrar yüklemek için DGM sinyalini yükseltecektir. MPPT algoritması attığı adımın (" $a+1$ " referans değerinin) gücü düşürücü etki yaptığını ancak örnekleme zamanının sonunda anlayabilecek ama bu ana kadar evirici denetçisi defalarca çalıştığı için PV çalışma noktası MP noktasından çok çok uzaklarda olacaktır. Yapılan çalışma şebeke etkileşimli eviricilerin doğrudan denetim yapabilen MPPT tekniği ile denetlenmesi amacını taşımaktadır.

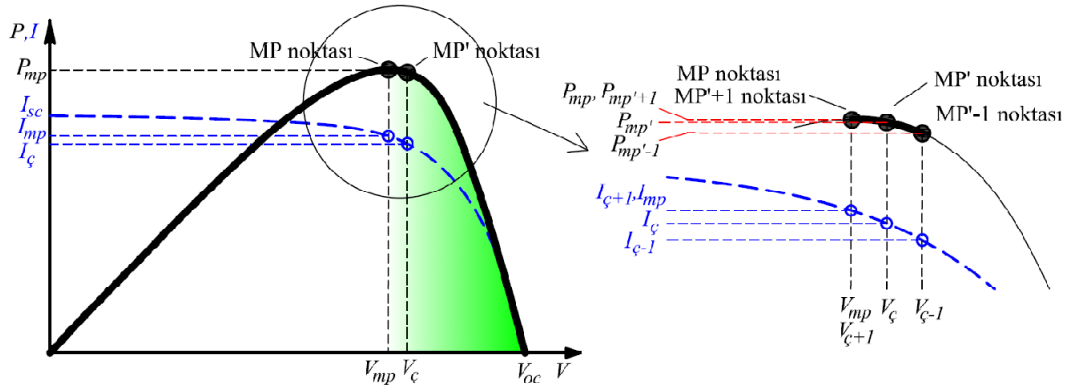
7.7.2. Tek aşamalı eviricide önerilen doğrudan denetimli MPPT

Şebeke etkileşimli eviricinin doğrudan denetim tekniği ile denetlenebilmesi amacı ile bu tarz çalışma için yapay bir MP noktası tayin edilmiştir. Şekil 7.44'de gerçek MP noktası ile yapay MP' noktası birlikte verilmiştir.



Şekil 7.44. Yapay MP noktasının oluşturulması

MP' noktası MP noktasının hemen sağında tayin edilerek şebeke etkileşimli eviricinin referans değeri bu değerden daha yüksek olmayacak şekilde sınırlandırılması gerektiği düşünülmüştür. Şekil 7.44 ile gösterilen çalışma anında I_{ϕ} ile gösterilen çalışma akımı I_{mp} ile gösterilen maksimum akımdan daha düşük seviyede iken V_{ϕ} ile gösterilen çalışma gerilimi V_{mp} geriliminden daha büyük değerdedir. P_{ϕ} ile gösterilen çalışma gücü noktası ise P_{mp} noktasından daha düşük değerdedir. MP' noktasının gerçek MP noktasına ne kadar yakın olması gerektiğinin cevabı evirici MP' noktasında çalışırken referans değişikliği gerektiğinde ya da doğrudan denetim tekniğinin çalışma prensibi olan osilasyonda adım aralığının referans değişimine olan etkisinin MP noktası aşmayacak şekilde mümkün olan en yakın nokta olarak ifade edilebilir. Yani MPPT algoritması tarafından belirlenen referans değişim bilgisi artış yönünde olduğunda mevcut referans " x " ve buna karşılık gelen güç MP' ise *en büyük* adım büyüklüğüne " a " denildiğinde bir sonraki referans değer " $x+a$ " olacağından " $x+a$ " referans değerine karşılık gelen gücün gerçek MP noktasının aşılması gerekir. Şekil 7.45'de MP' üstü noktasında çalışan bir sistemin referansı " x " iken bu anda çalışma gerilimi V_{ϕ} , çalışma akımı I_{ϕ} ve çalışma gücü P_{ϕ} 'dir. Referans değer " $x+a$ " ve " $x-a$ " olduğunda PV çıkışının alacağı değerler +1 ve -1 indisleri ile verilmiştir.



Şekil 7.45. Evirici referans akımının adım büyüklüğü sınırının belirlenmesi

Burada birinci sorun bilinen doğrudan denetim teknikleri ile MP noktası harici bir noktada durdurulamamasıdır. İkincisi ise MP' noktasının belirlenmesinde etkili olan

adım büyüklüğünün bulunmasıdır. Çünkü PV ile beslenen şebeke etkileşimli evirici gibi sistemlerde eviricinin akım referansı belirli bir adım büyüklüğü değerinde artırıldığında bu değere karşılık gelen güç değişimi, farklılık gösterecektir.

7.7.3. P&O yönteminin şebeke etkileşimli eviriciye uyarlanması

Doğrudan denetim tekniklerinin en önemlileri, artan iletkenlik yöntemi ile değiştir gözle yöntemidir. Birbirinden farklı algoritmalar olarak düşünülse de aynı temellere dayanan düşüncenin farklı şekillerdeki tezahürüdür [Esram ve Chapman, 2007]. Değiştir gözle yöntemi hakkındaki temel yargılar daha önce verilmişti. Referans belirli bir büyüklükte değiştirildiğinde güçteki değişimin yönü bir sonraki referans değişiminin yönünü belirlemektedir. Değiştir gözle yöntemi ile Şekil 7.45'de verildiği gibi yapay MP' noktasının tayin edilmesi için değişken adımlı MPPT yapılmış ve bu adım büyüklüğüne karşılık gelen güç miktarı değerine bir sınır konularak bu değerden küçük değerdeki değişimler güçteki değişimin yönünün azalma yönünde olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 7.2'de şebeke etkileşimli evirici için uyarlanmış değiştir gözle (Modified Perturb and Observe – MP&O) algoritması özeti verilmiştir. Çizelgede i_{ref} şebeke etkileşimli evirici referans akımı, $i_{ref}[k-1]$ örnekleme zamanı kadar önceki evirici referans akımı, ε MP noktasına yaklaşma miktarını belirleyen gücü a_2 ise adım aralığını belirleyen katsayıyı ifade etmektedir.

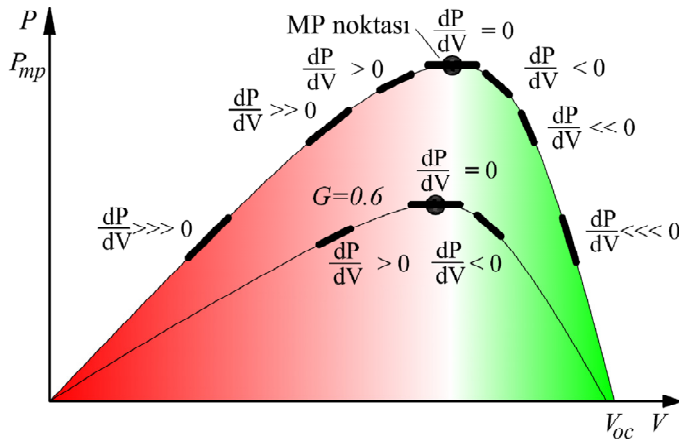
Çizelge 7.2. Düzenlenmiş P&O yöntemi

$i_{ref}[k] > i_{ref}[k-1]$	$P[k] > P[k-1] + \varepsilon$	$i_{ref}[k+1]$
Evet	Evet	$i_{ref}[k+1] = i_{ref}[k] + a_2/i_{pv}$
Evet	Hayır	$i_{ref}[k+1] = i_{ref}[k] - a_2/i_{pv}$
Hayır	Evet	$i_{ref}[k+1] = i_{ref}[k] - a_2/i_{pv}$
Hayır	Hayır	$i_{ref}[k+1] = i_{ref}[k] + a_2/i_{pv}$

Çizelge 7.2'de verilen kurallara göre evirici akış diyagramı Şekil 7.46'daki gibi oluşturulmuştur. Akış diyagramında sol tarafta verilen ana döngüde evirici limit denetimleri ile giriş, çıkış ve gösterge işlemleri yapılmaktadır. Evirici çalıştırıldığında yüklenmeye başlamadan önce V_{da} gerilimi evirici DA barasından okunmuştur. Bu gerilim aynı zamanda PV panelin açık devre gerilimi olan V_{oc} gerilimidir. MPPT yöntemleri anlatılırken dolaylı yöntemler grubunda olan açık devre gerilim metodu için V_{oc} gerilimi ile V_{mp} gerilimi arasında sabit bir oran olduğu söylenmişti. Bu oran 0,78 olarak ölçülmüş olup k_{pv} katsayısı olarak girilmiştir. Dolayısıyla V_{pv} gerilimi yüklenme sonucunda V_{oc} geriliminin %78 oranına düşünceye kadar V_{mp} noktasının aranmasına gerek yoktur. Dolayısıyla bu şekilde hızlı bir şekilde MP noktasına yaklaşmış ardından MP&O yöntemine geçilmiştir. Bu işlemler sürerken de evirici limitleri denetlenmeye devam edilmiştir. Evirici gücü ve parametreleri dikkate alınarak evirici anahtarlama frekansı 10 kHz olarak seçilmiştir. Buna karşılık gelen 100 μ s değerindeki her DGM periyodunda akış diyagramının orta bölümünde görülen DGM kesmesi programı çalıştırılmıştır. Evirici doğrusal denetim tekniği olan PI denetimi bu örnekleme frekansında yapılmış olup PV panel geriliminin evirici geriliminin tepe noktasından daha düşük olma durumunu yani çökme durumunu engellemek için bir evirici koruma rutini eklenmiştir. DGM oranları güncellenerek analog okumalarda aynı örnekleme zamanında yapılmaktadır.

7.7.4. IC yönteminin şebeke etkileşimli eviriciye uyarlanması

MP noktası dolaylı denetim teknikleri ile bulunurken referans işareti değiştirilir, ardından sistemin referans değişim işaretine verdiği tepkiye bakılarak bir sonraki referans işaretine karar verilir. IC yöntemi P&O yönteminden farklı olarak referanstan ne kadar uzak olduğu hakkında daha çok bilgi verir. Bu durum Şekil 7.47’de açıklanmıştır.



Şekil 7.47. Farklı ışınım şiddetlerinde dP/dV eğiminin değişimi

Eğimin pozitif olması MP eğrisinin solunda, bu pozitifliğin artması ise çalışma noktasının MP noktasının daha uzak solunda olduğu anlamına gelmektedir. Aynı şekilde eğimin negatif olması MP eğrisinin sağında olduğunu bu negatifliğin büyümesi ise MP eğrisinin uzak sağında kaldığı anlamına gelmektedir. Ancak uzaklık miktarını veren eğim ışınım, sıcaklık v.b. değerlerin etkilediği MP eğrilerine göre değişecektir. Yani gerçekte sonsuz sayıda eğriler ve buna bağlı olarak değişen eğim değerleri vardır. MP' noktasının bulunması için yaklaşma miktarının ve adım büyüklüğünün değişken olmasını gerektirmektedir.

Doğrudan yöntemlerin temel yargısı olan referansın bulunması için referans değişimi yapılması ve buna verilen tepkinin durumuna göre bir sonraki referansın

tanımlanması gerekmektedir. Dolayısıyla referans belirli bir adım büyüklüğünde ya artacak ya da azalacaktır. Adım büyüklüğü " a " olmak üzere Eş. 7.2 şeklinde ifade edilirse:

$$i_{ref}[k] = i_{ref}[k-1] \pm a \quad (7.2)$$

Adım büyüklüğünün değişken olması gerekliliği ve bu büyüklüğün tanımlanırken MP noktası uzağında büyük, MP noktasına yaklaştıkça küçülmesi gerektiğinden PV akımının düşük olduğu nokta MP noktasından uzak ve büyük olduğu nokta da MP noktasına yakın olması gerektiğinden adım büyüklüğü ifadesi Eş. 7.3'deki gibi yazılabilir.

$$a = f(i_{pv}) \quad (7.3)$$

Tam adım aralığı 1 birim olarak düşünüldüğünde en büyük adımın PV akımının "0" değerine yakın olduğu bölgede olması gerekir. PV akımı arttıkça adımların küçülmesi gerektiğinden Eş. 7.3 yeniden Eş. 7.4'deki gibi yazılabilir.

$$a = \frac{1}{1+i_{pv}} \quad (7.4)$$

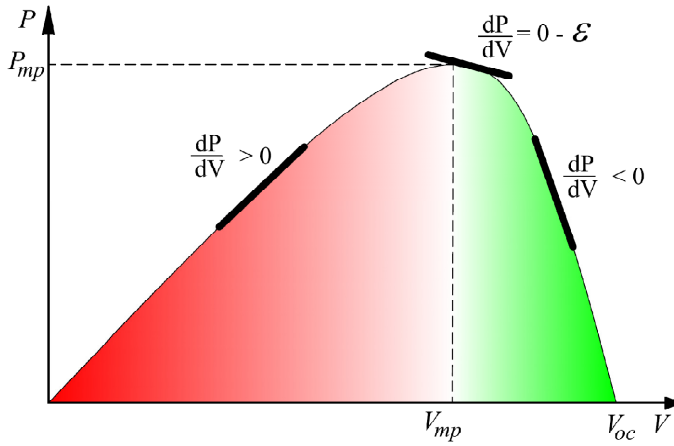
PV akımı düşük ışınımlarda MP noktasına yaklaşırsa dahi anma akımına göre küçük kalacağından bu gibi durumlarda adım aralığının küçük başlayıp daha da küçülebilmesi i_{pv} değerinin etkisinin değiştirilebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla büyüklüğü 0 ile 1 arasında değişen bir katsayı ile i_{pv} akımının etkisini değiştiren n katsayısı Eş. 7.4'e eklenerek Eş. 7.5'deki gibi yazılabilir.

$$a = \frac{n}{1+i_{pv}} \quad (7.5)$$

dP/dV eğimi MP eğrisinin sağındaki bölgede negatif iken adım büyüklüğü pozitif olmalıdır. dP/dV eğimi MP eğrisinin solundaki bölgede pozitif iken adım büyüklüğü negatif olmalıdır. Eğim işaretinin tersi adım büyüklüğünün polaritesini belirlemektedir. Bu etki Eşitlik 7.6'daki gibi yazılabilir.

$$a = \text{sgn}\left(\frac{dP}{dV}\right) \cdot \left(\frac{n}{1+i_{pv}}\right) \quad (7.6)$$

Doğrudan denetim tekniği ile şebeke etkileşimli evirici denetimi yapılırken MP noktası yerine MP' noktasının bulunması önerilmişti. Dolayısıyla eğimin “0” olduğu nokta yerine Şekil 7.48'de gösterilen eğimin çok küçük negatif olduğu noktanın bulunması gerekmektedir.



Şekil 7.48. MP' noktası eğimi

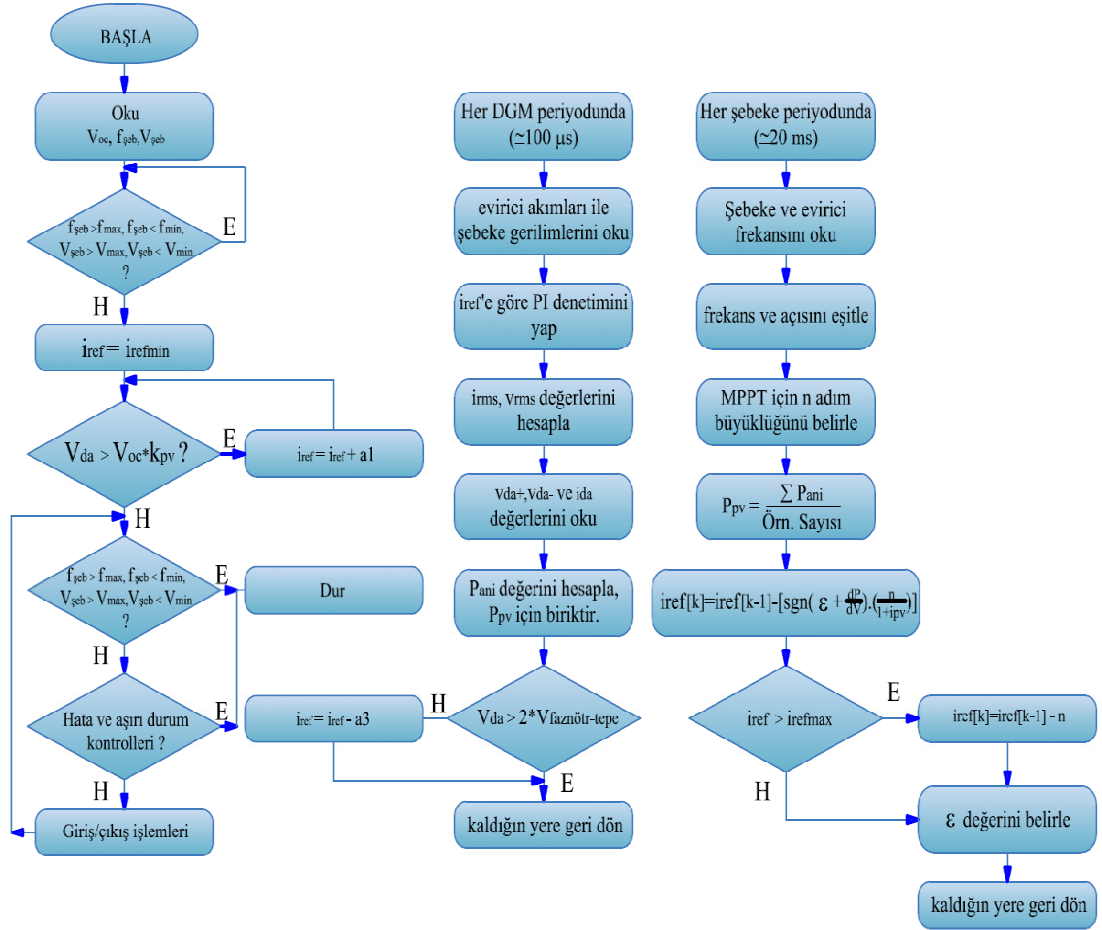
Şekil 7.49'da gösterilen ε değerinin etkisi Eş. 7.6'ya ilave edilirse Eş. 7.7 bulunabilir.

$$a = \text{sgn}\left(\varepsilon + \frac{dP}{dV}\right) \cdot \left(\frac{n}{1+i_{pv}}\right) \quad (7.7)$$

Eş. 7.6'da bulunan a değeri Eş. 7.2'de yerine yazıldığında Eş. 7.8'deki MIC ile denetlenen önerilen şebeke etkileşimli eviricini referans akım ifadesi bulunmuş olacaktır.

$$i_{ref}[k] = i_{ref}[k-1] - \left[\text{sgn} \left(\varepsilon + \frac{dP}{dV} \right) \cdot \left(\frac{n}{1+i_{pv}} \right) \right] \quad (7.8)$$

Eş. 7.8'e göre evirici akış diyagramı Şekil 7.49'daki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 7.49. Uygulanan MIC MPPT akış diyagramı

Akış diyagramının genel denetim yapısı MP&O yönteminde verilen ile aynıdır. MPPT algoritması önerilen MIC yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Akış diyagramının

sağ tarafında verilen döngüde her şebeke periyodunda ($\cong 20$ ms) PLL algoritmaları ile Eş. 7.8'de verilen yargılara dayanarak MPPT denetimi burada yapılmıştır. MPPT denetimin ihtiyaç duyduğu bilgiler DGM periyodunda okunup biriktirilen değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir.

7.7.5. MPPT denetimli eviricinin şebeke şartlarında çalıştırılması

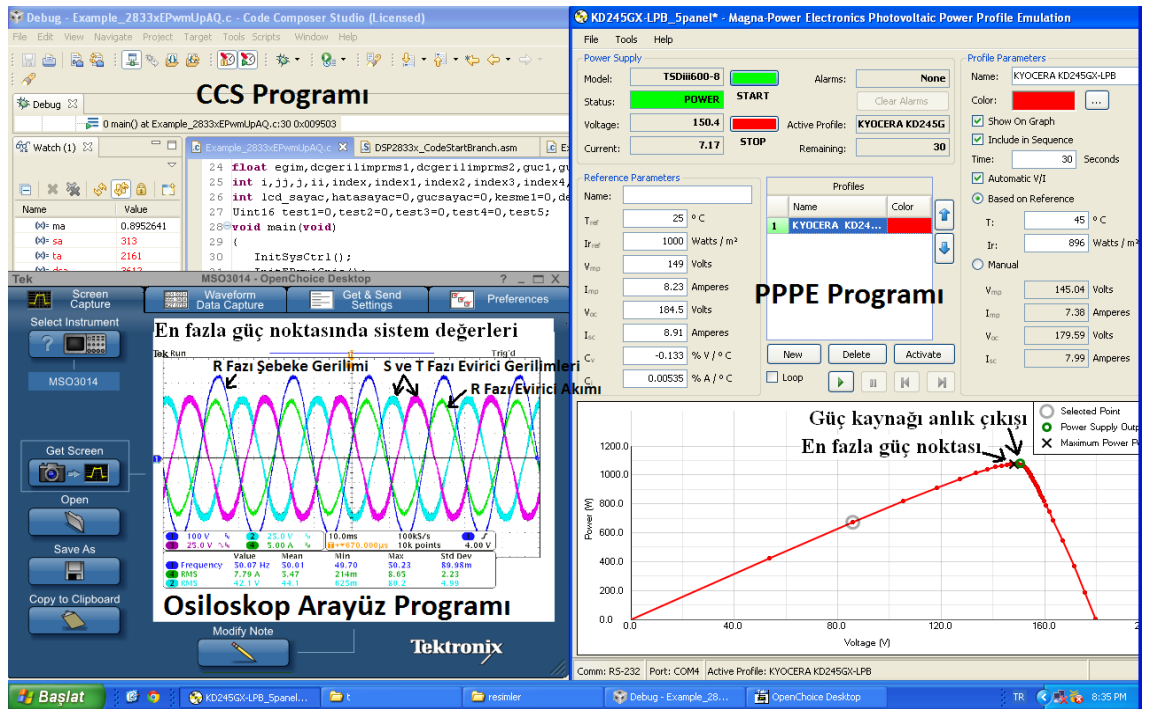
Şekil 7.50'de önerilen üç fazlı üç seviyeli şebeke etkileşimli NPC evirici resmi gösterilmiştir. Bu devre ile MPPT algoritması tarafından belirlenen seviyedeki güç NPC evirici kullanılarak şebeke ile aynı fazda ve birim güç faktöründe bir AA elektrik enerjisine dönüştürülerek şebekeye aktarılmaktadır.



Şekil 7.50. Önerilen şebeke etkileşimli NPC eviricinin genel görünüşü

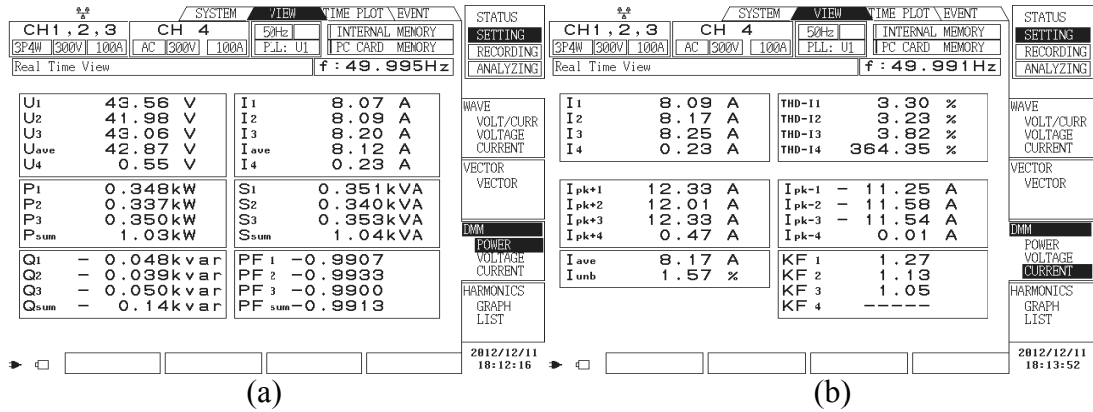
Tasarlanan üç seviyeli NPC şebeke etkileşimli evirici referans değeri MIC MPPT algoritması tarafından belirlenmiştir. Şebeke etkileşimli çalışma durumunda akım gerilim dalga şekilleri ve PV sistemin çalışma noktası Şekil 7.51'de verilmiştir. Şekilde DSP programının yazıldığı Code Composer Studio Programı, PV panel gibi

davranan ve eşzamanlı olarak çıkış parametrelerini PC'de gösterebilen PPPE programının ara yüzü ve evirici çıkışı ile şebekeyi izleyen osiloskobun arayüz programı birlikte görülmektedir. Şekil 7.51'deki PPPE arayüz bölümü incelendiğinde eviricinin çalışma noktasının (PPPE anlık çıkışının) MP noktasında olduğu görülmektedir. Bu andaki evirici ile şebeke arasındaki transformatörün sekonderi yani şebeke tarafı R fazı gerilimi, evirici R fazı akımı ile evirici S ve T fazları gerilimleri Şekil 7.45'deki osiloskop bölümünde görülmektedir. Buradan da görüleceği üzere evirici çıkış akımı sinüzoidal dalga formunda ve şebeke gerilimi ile aynı faz ve frekanstadır.



Şekil 7.51. MPPT'li şebeke etkileşimli evirici çıkış akım ve gerilim dalga formu

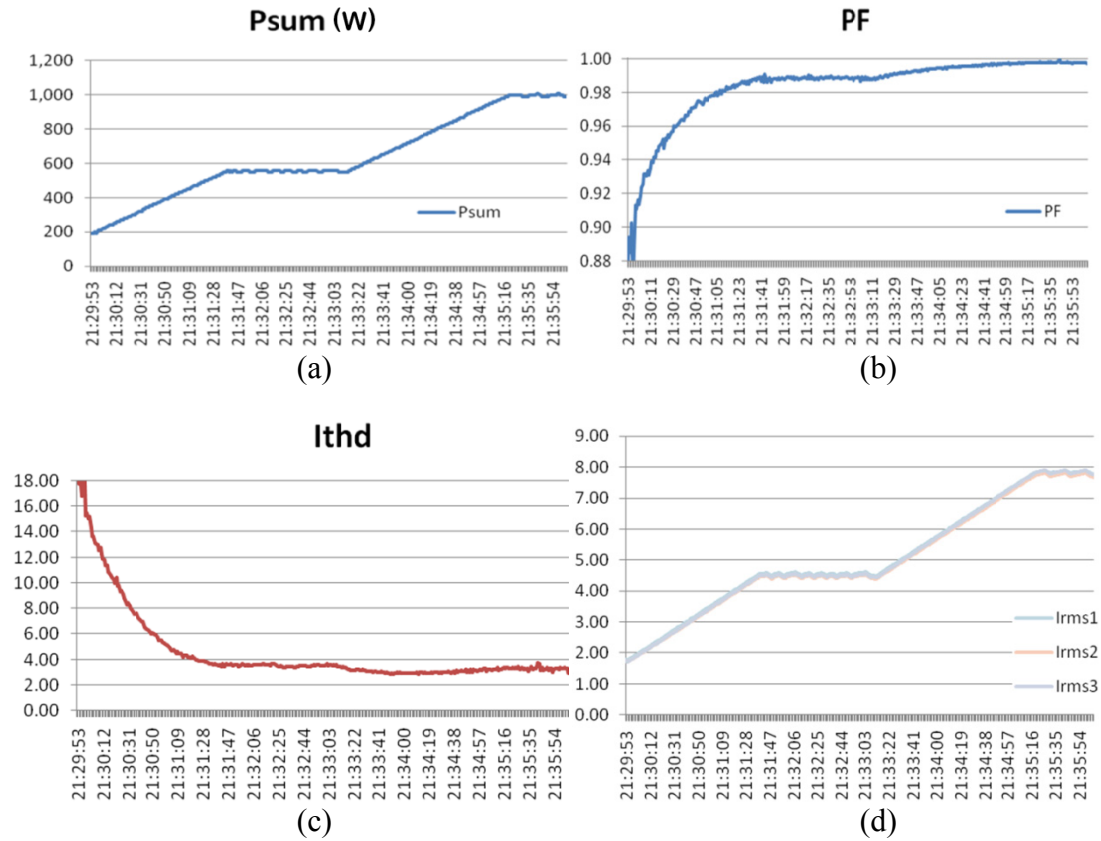
Şekil 7.51 dalga formlarına ait harmonik ve PF değerleri anma yükü için Şekil 7.52'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi akım harmonikleri ve PF değerleri evirici MPPT denetimi ile birlikte çalıştırıldığında yine uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar dahilindedir.



Şekil 7.52. MPPT'li Evirici çıkış parametreleri

a) Akım gerilim ve güç değerleri b) Akım toplam harmonik bozunumu

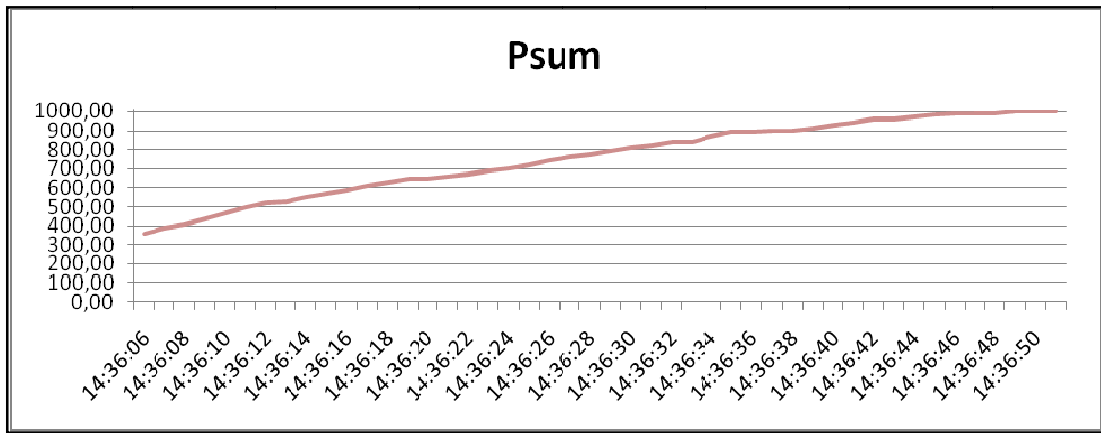
Şekil 7.52'de verilen değerler anma yükü için verilmiştir. Eviricinin diğer yük oranlarında çalışırken harmonik ve PF değerleri Şekil 7.53'de verilmiştir.



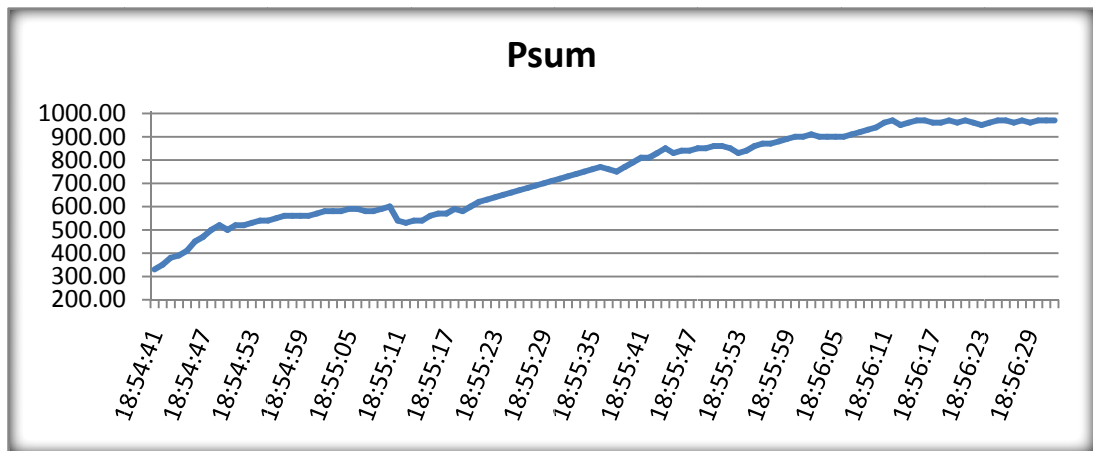
Şekil 7.53. Farklı güç seviyelerinde evirici parametrelerini

a)Güç b) Güç faktörü c) Harmonik bozunum d) Akım seviyeleri

PPPE çıkış gücü dolayısıyla en fazla güç noktası (MPP) 200 W AC çıkış verebilecek seviyede iken MPP noktası 550 W ardından da 1000 W çıkış verebilecek duruma sürekli çalışma modunda iken geçilmiştir. Ardından evirici çıkış parametrelerinin değişimleri izlenmiştir. Grafiklerde yatay eksen saniye cinsinden zamandır. Şekilden görüleceği üzere sistem PPPE programına girilen referans değerde kalmayı başaramamıştır. Grafiklerde akımların birbirleri ile dengeli olduğu harmonik ve güç faktörü değerlerinin makul seviyede olduğu görülmektedir. Burada PF ve harmonik değerlerinin düşük yüklerde arzu edilen seviyeden uzaklaştığı görülmektedir. Çok düşük yüklerde bu durum normal kabul edilebilmektedir.



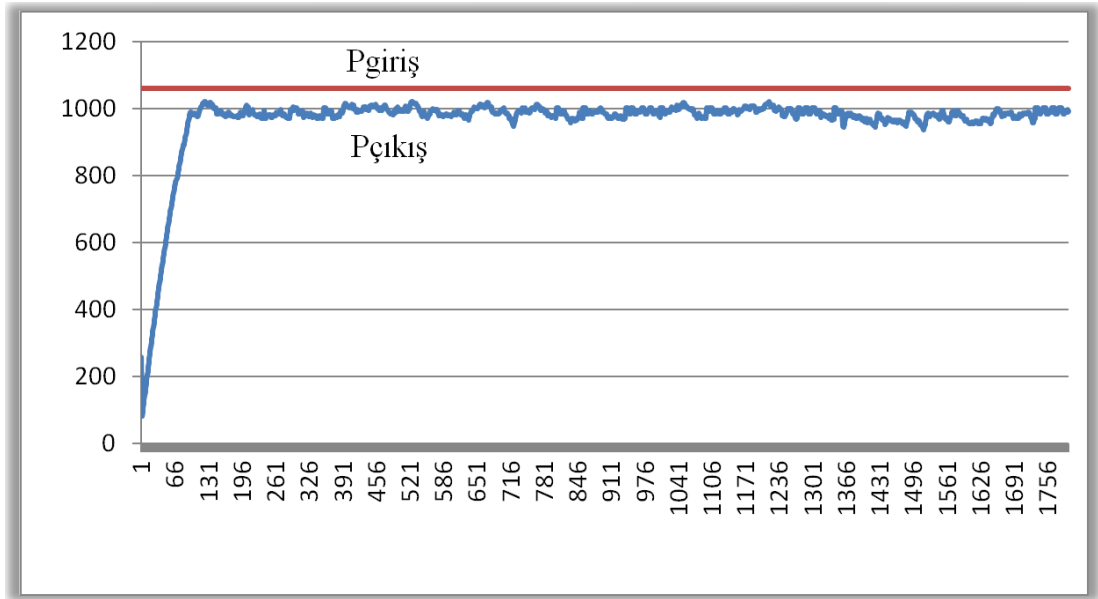
Şekil 7.54. MIC yöntemi ile referansa yaklaşma



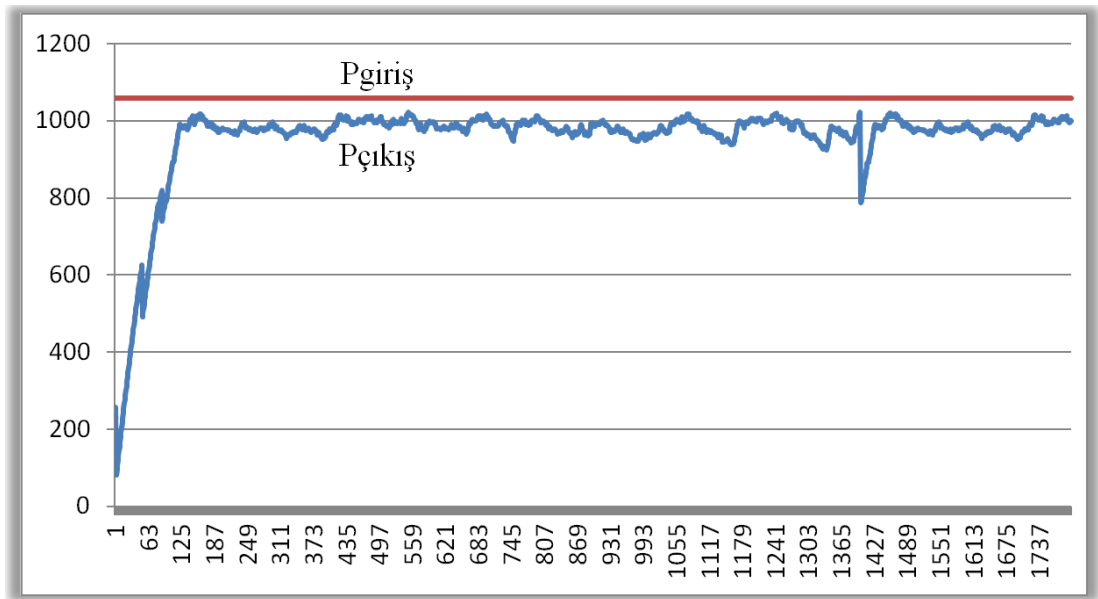
Şekil 7.55. MP&O referansa yaklaşma hızı

Şekil 7.54 ve Şekil 7.55'de MP&O ve MIC yöntemlerinin tek aşamalı şebeke etkileşimli eviricide verilen anma yüküne ulaşma durumları verilmiştir. MIC yönteminin hareketi devamlı olarak referans yönünde iken MP&O yönteminde ise bazı anlarda referans yönünün tersine hareket gözlenmiştir. Ayrıca MIC yöntemi P&O yönteminden daha hızlı referansı bulmuştur.

Şekil 7.56 ve Şekil 7.57'de $P_{giriş}$ PV panelin verebileceği en yüksek gücü göstermektedir. Bu değer PPPE arayüz programı yardımı ile PV emülatörün verebileceği en yüksek gücü yani MP değerini ifade etmektedir. $P_{giriş}$ aynı zamanda tasarlanan eviricinin alternatif akıma çevirebileceği en yüksek gücü ifade etmektedir. Şekil 7.56 ve Şekil 7.57'deki $P_{çıkış}$ gücü ise eviricinin çıkış gücüdür. Bu değer evirici verimi ve MPPT verimi çıkarıldıktan sonra alternatif akıma dönüştürülen gücü göstermektedir. Şekil 7.56 ve Şekil 7.57'de her iki yöntemin kalıcı durum çalışmaları gözlenmiştir. Evirici kayıpları her iki yöntemde de aynı olacağından Şekil 7.56 ile verilen MIC yönteminin kalıcı durumda da daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Her iki yöntemin dezavantajlarından olan kalıcı durumda sürekli osilasyon oluşumu MIC yönteminde daha az gözlenmiştir.



Şekil 7.56. Kararlı durumda MIC yöntemi ile referans gücün izlenmesi



Şekil 7.57. Kararlı durumda MP&O yöntemi ile referans gücün izlenmesi

Şekil 7.56 ve Şekil 7.57'deki sonuçlar verim açısından da incelenmiştir. Her iki şekli oluşturan veriler tablo halinde Çizelge 7.3'de verilmiştir. Alınan 1600 verinin ortalamasına göre MP&O yöntemi ile çalıştırılan tek aşamalı çok seviyeli şebeke

etkileşimli evirici verimi %92,617 olurken MIC yönteminin verimi ise %93,089 olmuştur. Bu veriler hem evirici verimini hem de MPPT veriminin birlikte alınması ile oluşturulmuştur.

Çizelge 7.3. MIC ve MP&O yöntemlerinin tek aşamalı ÇŞE’de karşılaştırması

Yöntem	Örnek sayısı	PV gücü	Verilen toplam güç ($\Sigma(W*s)$)	Evirici çıkış gücü ($\Sigma(W*s)$)	Ortalama güç	Verim
P&O	1600	1060	1697000	1570778	981,736	92,617
MIC	1600	1060	1697000	1578797	986,748	93,089

8. SONUÇLAR

Güneş pilinden şebekeye enerji aktaran sistemler tek aşamalı ve çift aşamalı olarak tasarlanabilseler de gerek tasarım gerekse denetimlerinin zor olmaları nedeniyle genellikle iki kademeli olarak adlandırılan DA/DA ve DA/AA çeviricilerin ardışık bağlantılarından oluşmuştur. Bu sistemlerde DA/DA dönüştürücü DA gerilimin düzenlenmesi ve MPPT işlemlerini yerine getirirken şebeke etkileşimli çalışma ve şebekeye aktarılan güç kalitesinin denetimi işlemleri DA/AA evirici tarafından yerine getirilmektedir. Bu işlemlerin tamamının DA/AA evirici ile gerçekleştirildiği tek kademeli iki seviyeli ve çok seviyeli şebeke etkileşimli eviriciler ile maksimum güç noktasının takip edilmesine yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda MPPT işlemi çoğunlukla dolaylı yöntemler ile gerçekleştirilmiştir. Doğrudan yöntemlerin kullanıldığı sınırlı sayıda çalışmada ise şebekeye etkileşimli eviricilerin taşıması gereken toplam harmonik bozulumu seviyesi ve güç faktörü gibi çıkış kalitesi kriterleri IEEE 1547 gibi standartlarda belirtilen şartları sağlayamamıştır. Çok seviyeli şebeke etkileşimli evirici çalışmalarında ise çoğunlukla yalıtılmış kaynaklar gerektiren kaskat H köprü topolojisi kullanılmıştır. Günümüzde güç devresinin bir ayağı için güç modüllerinin ticari ürün olarak üretildiği nötr noktası tutmalı evirici yapısının kullanıldığı ve maksimum güç takibi yapabilen şebeke etkileşimli evirici uygulamalarına ilişkin sınırlı sayıda benzetim çalışması bulunmaktadır.

Bu çalışmada tek kademeli, MPPT yapabilen, gerilim kaynaklı, akım denetimli, üç fazlı ve üç seviyeli NPC yapısında olan bir evirici tasarlanmıştır. Evirici referans akımı, güneş pillerinden anlık olarak mümkün olan en yüksek gücün çekilebilmesi amacıyla doğrudan denetim yapabilen MPPT algoritması tarafından belirlenmektedir. MPPT ve PLL algoritmaları tarafından belirlenen referans akımın denetiminde PI denetleyici kullanılmıştır. Çalışma kapsamında en sık kullanılan MPPT yöntemlerinden olan MP&O ve MIC yöntemleri tek kademeli evirici sisteminde çalışabilecek şekilde uyarlanmıştır. Önerilen iki yöntem, üç fazlı üç

seviyeli NPC şebeke etkileşimli evirici uygulamasında test edilmiş ve elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar, MPPT noktasına yaklaşma hızı ve yaklaşma miktarı kriterleri esas alınarak kıyaslandığında MIC yönteminin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. DA bara çökme problemlerinin de MIC yönteminde daha az olduğu görülmüştür. Çizelge 8.1’de MP&O ve MIC yöntemlerinin tek aşamalı üç seviyeli şebeke etkileşimli eviricide karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 8.1. MIC ve MP&O yöntemlerinin tek aşamalı ÇŞE’de karşılaştırması

MPPT Tekniği	MP&O	MIC
PV panele bağımlılık	Panelden bağımsız	Panelden bağımsız
MPPT yöntemi	Doğrudan	Doğrudan
Uygulama şekli	Analog veya sayısal	Sayısal
Periyodik ayar gerekliliği	Gerekli değil	Gerekli değil
İzleme Hızı	Düşük	Orta
Karmaşıklık seviyesi	Düşük	Orta
Verim	Orta	Yüksek
DA bara çökme sıklığı	Sık	Nadir
Geri besleme bilgisi	Akım, Gerilim	Akım, Gerilim

Tasarlanan sistemin IEEE 1547 gibi uluslararası standartlarda belirtilen güç kalitesi şartlarına uygunluğu da araştırılmıştır. Şebeke etkileşimli çalışmada NPC evirici tarafından şebekeye aktarılan akımların THD değeri %3,8 olarak ölçülmüş ve birim güç faktörüne yakın ($>0,99$) güç faktöründeki enerjinin şebekeye transferi sağlanmıştır. Ayrıca güç kalitesi parametreleri düşük yük yüzdesi koşullarında incelenmiş ve tasarlanan sistemin %40 yük seviyesinden itibaren uluslararası standartlarda belirtilen şartları sağladığı görülmüştür. Bunun yanında şebeke etkileşimli çalışma ve MPPT işlemlerin tümü için tek bir çevirici kullanıldığından sistemin verimi yükseltilmiş (%93,08), boyutları ve maliyeti ise düşürülmüştür. Tasarlanan ve gerçekleştirilen şebeke etkileşimli eviricide üç seviyeli NPC topolojisi

kullanıldığından sadece güç anahtarlarının değişimi ile tasarlanan sistem çok yüksek güçler içinde uygulanabilir niteliktedir.

Bu çalışma kapsamında diziye oluşturan tüm panellerin aynı şekilde çalıştığı varsayılmıştır. Gelecek çalışmalarda dizide bulunan fotovoltaiik panellerin lokal kirlenme ve gölgelenme etkileri nedeniyle aynı özelliklerde çalışmaması durumları incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Alonso-Martinez J., Eloy-Garcia, J., Arnaltes S., “Direct Power Control of Grid Connected PV Systems with Three Level NPC Inverter”, *Solar Energy*, 84 (7): 1175–1186 (2010).
- Altın, N., “Bulanik Sinirsel Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 39–48, Ankara, 2009.
- Altın, N., Sefa, İ., “dSPACE Based Adaptive Neuro-Fuzzy Controller of Grid Interactive Inverter”, *Energy Conv. and Management*, 56 130–139 (2012).
- Alvarez, R., Fink, K., Bernet, S., “Simulation and Experimental Investigation of Parallel Connected IGBTs”, *IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT’10*, Valparaiso, Chile, 824–831 (2010).
- Baker, R. H., Bannister, L. H., “Electric power converter”, *U.S. Patent*, 3 867 643 (1975).
- Ben-Brahim, L., “A Discontinuous PWM Method for Balancing the Neutral Point Voltage in Three-Level Inverter-Fed Variable Frequency Drives”, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 23 (4): 1057–1063 (2008).
- Benli, H., “Potential of renewable energy in electrical energy production and sustainable energy development of Turkey: Performance and policies”, *Renewable Energy*, 50: 33–46 (2013).
- BHC Aerovox Ltd. “ALS30/31 Series Product Datasheet”, *BHC Aerovox Ltd.*, 26 (2013).
- Bouchafaa, F., Beriber, D., Boucherit M.S., “Modeling and Control of a Grid Connected PV Generation System”, *IEEE 18th Mediterranean Conference on Control & Automation*, Marrakech, Morocco, 315–320 (2010).
- Bouzguenda, M., Gastli, A., Al Badi A. H., Salmi, T., “Solar Photovoltaic Inverter Requirements for Smart Grid Applications”, *IEEE Power Electronics Specialist Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT 2011*, Jeddah, 1–5 (2011).
- Calais, M., Agelidis V.G., Meinhardt, M., “Multilevel Converters for Single Phase Grid Connected Photovoltaic Systems: an Overview”, *Solar Energy*, 66 (5): 325–335 (1999).

Calais, M., Myrzik, J., Spooner, T., Agelidis V.G., “Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems—An Overview” **IEEE 33rd Power Electronics Specialist Conference, PESC’02**, 2: 1995–2000 (2002).

Chaouachi, A., Kamel, R. M., Nagasaka, K., “A novel multi-model neuro-fuzzy-based MPPT for three-phase grid-connected photovoltaic system”, **Solar Energy** 84: 2219–2229 (2010).

Dimroth, F., Baur, C., Bett, A.W., Mausel, M., Strobal, G., “3-6 Junction Photovoltaic Cells For Space And Terrestrial Concentrator Applications”, **31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference**, Orlando, Florida, USA, 525–529 (2005).

Dixon, J., Morán, L., “High-Level Multistep Inverter Optimization Using a Minimum Number of Power Transistors”, **IEEE Trans. on Power Electronics**, 21 (2): 330–337: (2006).

Duru, H. T., “A maximum power tracking algorithm based on $I_{mpp}=f(P_{max})$ function for matching passive and active loads to a photovoltaic generator”, **Solar Energy**, 80 (7): 812–822 (2006).

Enslin, J. H. R., Wolf, M. S., Snyman, D. B., Swiegers, W., “Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter”, **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, 44 (6): 769–773 (1997).

Esrām, T., Chapman, P. L., “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, **IEEE Transactions On Energy Conversion**, 22 (2): 439–449 (2007).

Gediga, S., Hiller, M., Sommer, R., Tischmacher, H., “A new 7.2kV Medium Voltage 3-Level-NPC inverter using 6.5kV-IGBTs”, **IEEE European Conference on Power Electronics and Applications**, Aalborg, 1–9 (2007).

Goodrich, A., James, T., Woodhouse, M., “Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities”, **National Renewable Energy Laboratory**, 6A20-53347 (2012).

Hirachi, K., Tomokuni, Y., “Improved Control Strategy to Eliminate The Harmonic Current Components for Single Phase PWM Current Source Inverter”, **IEEE 19th Int. Telecommunications Energy Conf.**, Osaka, Japan, 189–194 (1997).

Hohm, D. P., Ropp, M. E., “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms”, **Progress In Photovoltaics: Research and Applications**, 11 (1): 47–62 (2002).

IEEE Std 929-2000, "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems", *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, 7 (2000).

İnternet: EİE, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, "Türkiye'de Güneş Enerjisi", <http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/tgunes.html> (2012).

İnternet: Enercon, "Wind turbines technical data", <http://www.enercon.de/en-en/66.htm>, ENERCON GmbH, 2013.

İnternet: Alternative Energy Resources, Inc., "The World Solar Energy Map", <http://www.alternative-energy-resources.net>, (2013).

Jayasinghe, S.D.G., Vilathgamuwa, D.M., Madawala, U.K., "A Dual Inverter Based Supercapacitor Direct Integration Scheme for Wind Energy Conversion Systems", *IEEE International conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2010*, Kandy, Sri, 1–6 (2010).

Kjaer, S. B., Pederson, J. K., Blaabjerg, F., "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (5): 1292–1306 (2005).

Ko, Y.H., Park, B.G., Kim, R.Y., Hyun, D.S., Jung, H.J., "A Simple Space Vector PWM Scheme with Neutral Point Balancing for Three-Level Neutral Point Clamped Inverter", *IEEE Industry Applications Society, IAS'11*, Orlando, 1–6 (2011).

Kumar, K.S., De, S., Gopakumar, K., Mondal, G., Corzine, K., "Front end Switched Rectifier DC Source for Neutral Point Balancing of A NPC Three-Level Inverter for The Full Modulation Range", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2008*, Cambridge, 311–316 (2008).

Kurokawa, K., "Realistic Values Of Various Parameters For PV System Design", *Renewable Energy*, 15 (1): 157–164 (1998).

Lee, K.J., Park, N.J., Hyun, D.S., "Optimal Current Controller in a Three-Phase Grid Connected Inverter with an LCL filter", *IEEE 7th International Conference on Power Electronics*, Daegu, Korea, 568–571 (2007).

Li, Q., Wolfs, P., "A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies With Three Different DC Link Configurations", *IEEE Transactions On Power Electronics*, 23 (3): 1320–1333 (2008).

Lin, B.R., Lee, Y.C., Yang, T.Y., "Implementation of a Three-Phase High-Power-Factor Rectifier with NPC Topology", *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems*, 40 (1): 180–189 (2004).

Liserre, M., Blaabjerg, F., Hansen, S., “Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41 (5): 1281–1291 (2005).

Liu, C., Johnson, A., Lai, J. S., “A Novel Phase-Shifting Circuit Using Digital First-In First-Out (FIFO) for Multiphase Power Converter Interleaved Control”, *IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, 2004*, Urbana, Illinois, USA, 80–84 (2004).

Magna-Power Electronics Inc., “Photovoltaic Power Profile Emulator Operating Guide”, *Magna-Power Electronics Inc.*, USA, 24–25 (2009).

Mekhilef, S., Saidur, R., Kamalisarvestani, M., “Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 2920–2925 (2012).

Mineiro, S. J. E., Daher, S., Antunes, F. L. M., Cruz, C. M. T., “Photovoltaic System For Supply Public Illumination In Eletrical Energy Demand Peak”, *IEEE 19th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition Conference*, Anaheim, California, USA, 3: 1501–1506 (2004).

Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins, W. L., “Power electronics : converters, applications, and design 2nd edition”, *Wiley&Sons*, New York, 200–248 (1995).

Mulligan, W. P., Rose, D. H., Cudzinovic, M. J., Ceuster, D. M. D., McIntosh, K. R., Smith, D. D., Swanson, R. M., “Manufacture Of Solar Cells With 21% Efficiency”, *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, France, 462–465 (2004).

Nabae, A., Takashi, I., Akagi, H., “A New Neutral-Point Clamped PWM Inverter”, *IEEE Trans. on Ind Appl.*, 17 (5): 518–523 (1981).

Nami, A., Zare, F., Ledwich, G., Ghosh, A., Blaabjerg, F., “Comparison between Symmetrical and Asymmetrical Single Phase Multilevel Inverter with Diode-Clamped Topology”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, 2921–2926 (2008).

Noguchi, T., Togashi, S., Nakamoto, R., “Short-Current Pulse-Based Maximum-Power-PointTracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 49 (1): 217–223 (2002).

Özdemir, Ş., “Fotovoltaik Sistemler İçin Mikrodnetleyicili En Yüksek Güç Noktasını İzleyen Bir Konvertörün Gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1–79, Ankara, 2007.

Pandey, A., Singh, B., Singh, B.N., Chandra, A., Al-Haddad, K., Kothari, D.P., “A Review of Multilevel Power Converters”, *Journal of Institution of Engineers India*, 86: 220–231 (2006).

Patel, H., Agarwal, V., “MPPT Scheme for a PV-Fed Single-Phase Single-Stage Grid-Connected Inverter Operating in CCM With Only One Current Sensor”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (1): 256–263 (2009).

Patrao, I., Figueres, E., González-Espín F., Garcerá, G., “Transformerless topologies for gridconnected singlephase photovoltaic inverters”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3423–3431 (2011).

Patsios, C., Chaniotis, A., Rotas, M., Kladas, A.G., “A Comparison of Maximum-Power- Point Tracking Control Techniques for Low-Power Variable-Speed Wind Generators”, *IEEE 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems*, France, 1–6 (2009).

Pereira, I., Martins, A., “Experimental Comparison of Carrier and Space Vector PWM Control Methods for Three-Phase NPC Converters”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ'09*, Valencia, Spain, 1–6 (2009).

Polverini, D., Field, M., Dunlop E., Zaiman W., “Polycrystalline silicon PV modules performance and degradation over 20 years”, *Progress In Photovoltaics: Research And Applications*, Doi: 10.1002/pip.2197, 2012.

Pulikanti, S. R., Dahidah, M. S. A., Agelidis, V. G., “Voltage Balancing Control of Three-Level Active NPC Converter Using SHE-PWM”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (1): 258–267 (2011).

Pulikanti, S. R., Konstantinou, G. S., Agelidis, V.G., “An n-Level Flying Capacitor based Active Neutral-Point-Clamped Converter”, *IEEE Int. Symposium on Power Elect. for Distributed Gen. Systems*, Hefei, China, 553–558 (2010).

Raoufi, M., Lamchich, M. T., “Average current mode control of a voltage source inverter connected to the grid: application to different filter cells”, *Journal of Electrical Engineering Slovak*, 55: 77–82 (2004).

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

Ravi, A., Manoharan P.S., Anand J.V., "Modeling and Simulation of Three Phase Multilevel inverter for Grid Connected Photovoltaic Systems", *Solar Energy*, 85 (11): 2811–2818 (2011).

Reis, A.M., Coleman, N. T., Marshall, M. W., Lehman, P. A., Chamberlin, C. E., “Comparison Of PV Module Performance Before And After 11-Years Of Field Exposure”, **IEEE 29st Photovoltaic Specialist Conference**, New Orleans, Louisiana, USA, 1432–1435 (2002).

Rodriguez, J., Lai, J.S., Peng, F.Z., "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications", **IEEE Trans. on Ind. Electronics**, 49 (4): 724–738 (2002).

Salas, V., Olias, E., Barrado, A., Lazaro, A., “Review of The Maximum Power Point Tracking Algorithms For Stand-Alone Photovoltaic Systems”, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 90 (11): 1555–1578 (2006).

Santos, J. L., Antunes, F., Chehab, A., Cruz, C., “A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter”, **Solar Energy**, 80 (7): 772–778 (2006).

Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., “An Implementation of Grid Interactive Inverter with Reactive Power Support Capability for Renewable Energy Sources”, **III. IEEE International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives**, Malaga, Spain, 1–6 (2011).

Sefa, İ., Altın, N., “Güneş Pili İle Beslenen Şebeke Etkileşimli Eviriciler - Genel Bir Bakış”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, 24 (3): 409–424 (2009).

Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., “A Three Level Inverter for Grid Connected Renewable Energy Systems”, **5. Int. Conf. and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER'10**, Grimaldi, Monaco, 334–340 (2010).

Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., Demirtaş, M., “dSPACE Based Control of Voltage Source Utility Interactive Inverter”, **IEEE 19th Int. Symposium on Power Elect., Elec. Drives, Automation and Motion**, Ischia, Italy, 662–666 (2008).

Sefa, İ., Özdemir, Ş., “Multifunctional Interleaved Boost Converter for PV Systems”, **IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'10**, Bari, Italy, 951–956 (2010).

Serpa, L. A., Ponnaluri, S., Barbosa, P. M., Kolar, J. W., “A Modified Direct Power Control Strategy Allowing the Connection of Three-Phase Inverters to the Grid Through LCL Filters”, **IEEE Transactions On Industry Applications**, 43 (5): 1388–1400 (2007).

Shen, J., Schröder, S., Rösner, R., El-Barbari, S., “A Comprehensive Study of Neutral-Point Self-Balancing Effect in Neutral-Point-Clamped Three-Level Inverters”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 26 (11): 3084–3095 (2011).

Shimizu, T., Wada, K., Nakamura, N., “A flyback-type single phase utility interactive inverter with low-frequency ripple current reduction on the DC input for an AC photovoltaic module system”, *IEEE 33. Annual Power Electronic Specialist Conference, PESC’02*, 3: 1483–1488 (2002).

Skvarenina, T. L., “The Power electronics handbook”, *CRC Press LLC*, Florida, Capt. 5–6 (2002).

Stala R., “Application of Balancing Circuit for DC-Link Voltages Balance in a Single-Phase Diode-Clamped Inverter With Two Three-Level Legs”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 58 (9): 4185–4195 (2011).

Stala, R., “Individual MPPT of Photovoltaic Arrays with Use of Single-Phase Three-Level Diode-Clamped Inverter”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, Italy, 3456–3462 (2010).

Suh, B.S., Sinha, G., Manjrekar, M.D., Lipo, T.A., “Multilevel Power Conversion - An Overview Of Topologies And Modulation Strategies”, *IEEE 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments*, Brasov, 2: AD11–AD24 (1998).

Teichmann R., Bernet, S., “A Comparison of Three-Level Converters Versus Two-Level Converters for Low-Voltage Drives, Traction, and Utility Applications”, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 41 (3): 855–865 (2005).

Teichmann, R., Malinowski, M., Bernet, S., “Evaluation of Three-Level Rectifiers for Low-Voltage Utility Applications”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 52 (2): 471–481 (2005).

Teulings, W. J. A., Marpinard, J.C., Capel, A., O’Sullivan, D., “A new Maximum Power Point Tracking system”, *IEEE 24th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Toulouse, France, 833–838 (1993).

Tyagi, V.V., Rahim, N.A.A., Rahim, N.A., Selvaraj, J.A./L., “Progress in solar PV technology: Research and achievement”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20: 443–461 (2013).

Vechiu, I., Camblong, H., Tapia, G., Dakyo, B., Nichita, C., “Dynamic Simulation Model of a Hybrid Power System: Performance Analysis”, *European Wind Energy Conference and Exhibition EWEC 2004*, UK, 1–9 (2004).

Walker, G., “Evaluating MPPT Converter Topologies Using A Matlab PV Model”, *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 21 (1): 49–56 (2001).

Wu, B., “High-Power Converters and AC Drives 1nd ed.”, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*, USA, 144–148 (2006).

Yamanaka, K., Hava, A. M., Kirino, H., Tanaka, Y., Koga, N., Kume, T., “A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38 (6): 1572–1580 (2002).

Zhezhi, Y., Lingzhi, Y., Hanmei, P., Xi, F., Dong, D., “Study of Simplified SVPWM Algorithm Based on Three-Level Inverter”, *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Wuhan, 876–881 (2009).

Ziegler G., Nichols, N. B., "Optimum setting for automatic controllers," *Transactions ASME*, 64: 759-768 (1942).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZDEMİR, Şaban
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1978, Kayseri
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 506 371 49 46
 Faks :
 e-mail : sabanozdemir@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	M. tarihi
Y. Lisans	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elk. Eğt.	2007
Lisans	Gazi Üniversitesi TEF Elektrik Eğitimi Bölümü	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1996-1999	ELİN Mühendislik (Kayseri)	Elk. proje, taahhüt
2004-2006	ÖZEL Elektronik (Ankara)	Ar-ge
2007-2008	Onep Hst. (Ankara)	Kurulum
2008-2009	Başkent Üniv. TBMYO	Öğr. Gör.
2009-.....	Gazi Üniv. ATAMYO	Öğr. Gör.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Tezler

1. Özdemir, Ş., “Fotovoltaik Sistemler İçin Mikrodenetleyicili En Yüksek Güç Noktasını İzleyen Bir Konvertörün Gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2007.

Uluslararası Konferans

1. Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., Demirtaş, M., “dSPACE Based Control of Voltage Source Utility Interactive Inverter”, **IEEE 19th Int. Symposium on Power Elect., Elec. Drives, Automation and Motion**, Ischia, Italy, 662–666 (2008).
2. Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., “dSPACE Based Fuzzy Logic Controlled Boost Converter”, **4th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, TPE-2008**, Pitesti, Romania, 36–41 (2008).
3. Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., “Three Phase Grid Interactive Inverter for Renewable Energy Sources”, **5th International Advanced Technologies Symposium (IATS’09)**, Karabük, Türkiye, 1–5 (2009).
4. Sefa, İ., Altın, N., Çolak, İ., Özdemir, Ş., “18 Pulse Controlled Rectifier: A Case Study on Ups”, **13th International European Power Electronics Conference on Power Electronics and Applications, EPE’09**, Barcelona, Spain, 1–9 (2009).
5. Sefa, İ., Özdemir, Ş., “Experimental Study of Interleaved MPPT Converter for PV Systems”, **IEEE 35th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 2009**, Porto, Portugal, 456–461 (2009).
6. Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, S., “A Three Level Inverter for Grid Connected Renewable Energy Systems”, **5. International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies**, Grimaldi, Monaco, 334–341 (2010).
7. Sefa, İ., Özdemir, Ş., “Multifunctional Interleaved Boost Converter for PV Systems”, **IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2010**, Bari, Italy, 951–956 (2010).

8. Sefa, İ., Altın, N., Özdemir, Ş., “An Implementation of Grid Interactive Inverter with Reactive Power Support Capability for Renewable Energy Sources”, **III. IEEE International Conference on Power Engineering Energy and Electrical Drives**, Malaga, Spain, 1–6 (2011).
9. Sefa, İ., Balci S., Altın, N., Özdemir, Ş., “Core losses of pwm excited inverter transformers with. finite element method”, **7th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering TPE-2011**, Lefkoşa, KKTC, 1–6 (2011).
10. Sefa, İ., Özsan, A., Altın, N., Görgünoğlu, S., Özdemir, Ş., “Dynamic Reactive Power Compensation System for Wind Turbines”, **7. International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER'12**, Monaco, 1–6 (2012).
11. Özdemir, Ş., Altın, N., Sefa, İ., “Single Stage Three-Level MPPT Inverter for Solar Supplied Systems”, **IEEE 21th International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion**, Sorrento, Italy, 103–108 (2012).
12. Altın, N., Özdemir, Ş., “Three-Phase Three-Level Grid Interactive Inverter with Fuzzy Logic Based MPPT Controller”, **The European Workshop & Conference on Renewable Energy Systems, EWRES & ECRES**, Antalya, Turkey, 1–8 (2012).
13. Sefa, İ., Balci S., Altın, N., Özdemir, Ş., "A Comprehensive Analysis of Inductors for Interleaved Buck Converter", **IEEE 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition**, 1–6, Novi Sad, Serbia, (2012).
14. Altın, N. and Özdemir, Ş., Sefa, İ., “A Three-Level MPPT Capability Rectifier For High Power Direct Drive WECS”, **The International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2012**, Nagasaki, Japan, 1–6 (2012).

Kitaplar

1. Bal, G., Özdemir, Ş., “Alternatif Akım Devre Analizi”, **Semih Ofset**, Ankara, 2013.

Projeler

2. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonunca desteklenen “Yenilenebilir Enerji Kaynakları İçin Çok Seviyeli Şebeke Etkileşimli Evirici” konulu proje çalışmasında araştırmacı olarak görev almıştır.
3. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Fonunca desteklenen “Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) Yazılımları Kullanılarak Evirici Çıkış Transformatörlerinin Modellenmesi ve Analizi” konulu proje çalışmasında araştırmacı olarak görev almıştır.