

**HIZLI ÇEVRESEL DEĞİŞİMLERDEN AZ ETKİLENEN
HİBRİT BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ
METODUNUN UYGULANMASI**

Süleyman Emre DAĞTEKE

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Sencer ÜNAL
OCAK-2015**

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HIZLI ÇEVRESEL DEĞİŞİMLERDEN AZ ETKİLENEN HİBRİT BİR
MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ METODUNUN UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Süleyman Emre DAĞTEKE

(112113103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 ARALIK 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 OCAK 2015

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Sencer ÜNAL (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (F.Ü)

Doç. Dr. Hayrettin CAN (F.Ü)

OCAK-2015

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Sencer ÜNAL' a ve çalışmalarımda bana yol gösteren sayın Doç. Dr. Arif GÜLTEN' e, yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Arş. Gör. Sedat GOLGİYAZ ve Arş. Gör. Musab COŞKUN' a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tüm eğitim ve öğrenim hayatım boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Süleyman Emre DAĞTEKE
ELAZIĞ – 2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No:</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR.....	XI
SEMBOLLER.....	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. FOTOVOLTAİK MATERYALLER VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİ	5
2.1. Temel Yarıiletkenler.....	6
2.2. Fotovoltaik Pil	8
2.2.1. Fotovoltaik Pil İçin Basit Eşdeğer Devre	9
2.2.2. Fotovoltaik Pil İçin Daha Doğru Bir Eşdeğer Devre.....	11
2.3. Hücrelerden Modül ve Modüllerden Dizilerin Elde Edilmesi.....	16
2.3.1. Hücrelerden Modül Elde Edilmesi	17
2.3.2. Modüllerden Dizi Elde Edilmesi	18
2.4. Standart Test Koşulları Altında PV I-V Eğrisi	20
2.5. I-V Eğrilerinde Gölgeleme Etkileri	22
2.5.1. Gölgelemenin İncelenmesi	23
2.5.2. Gölgelemenin Etkisini Azaltmak İçin Bypass Diyotları	25
2.5.3. Tıkama Diyotu.....	28
3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER.....	30
3.1. Depolamasız Şebeke Bağlantılı Sistem	30
3.2. Bataryalı Şebeke Bağlantılı Sistem	30
3.3. Bataryalı Şebeke Bağlantısı Olmayan Sistem	32
4. GÜNEŞ İZLEYİCİ SİSTEMLERİ	33
4.1. Güneş İzleme Yaklaşımları	34
4.2. Güneş İzleyici Tipleri	35
5. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ METOTLARI	37
5.1. Önemli MGNT Teknikleri.....	37
5.1.1. Değiştir ve Gözlemle Metodu (D&G)	38
5.1.2. Geliştirilmiş D&G Metodu.....	40
5.1.3. Artan İletkenlik Metodu	41
5.1.4. Beta Metodu	44
5.1.5. Üç Nokta Güçlerini Karşılaştırma Metodu.....	46
5.1.6. Tablo Tarama Metodu	49
5.1.7. Sürekli MGN Arama Algoritması	50
5.1.8. PV Çıkış Algılamasız Kontrol Metodu	53
5.1.9. Değişken Adım Boyutlu Artan Direnç Metodu.....	56
5.2. Diğer MGNT Teknikleri.....	59
5.2.1. Sabit Görev Periyodu Metodu	60
5.2.2. Sabit Gerilim Metodu	60
5.2.3. Sistem Osilasyon Metodu.....	60

5.2.4.	Oransal Açık Devre Gerilimi Metodu	62
5.2.5.	Oransal Kısa Devre Akımı Metodu	62
5.2.6.	Akım Tarama Metodu	63
5.2.7.	DA Bağlantılı Kapasite Düşüş Kontrolü	64
5.2.8.	Yük Akımı ve Yük Geriliminin Maksimuma Getirilmesi Metodu	65
5.2.9.	dP/dV veya dP/dI Geri Besleme Kontrolü Metodu	66
5.2.10.	Sabit Gerilim İzleyici Metodu	67
5.2.11.	Lineer Akım Kontrol Metodu	68
5.2.12.	I_{MPP} ve V_{MPP} Hesaplama Metodu	70
5.2.13.	Tek Döngü Kontrol Metodu	71
5.2.14.	En İyi Sabit Gerilim Algoritması	71
5.2.15.	Lineer Tekrar Yönlendirilen Koordinatlar Metodu	72
5.2.16.	Sıcaklık Metotları	73
5.2.17.	Biyolojik Sürü Takip Algoritması	75
5.2.18.	Değişebilen İndüktans MGNT Metodu	75
6.	GERÇEKLEŞTİRİLEN HİBRİT MGNT METODU VE MATLAB SİMÜLASYONLARI	81
6.1.	Üç Nokta Güçlerini Karşılaştırma Metodu	81
6.2.	Beta MGNT Metodu	82
6.2.	Hibrit MGNT Metodu	84
6.3.	MGNT Devre Konfigürasyonu	87
6.4.	PV Panelin Modellenmesi	88
6.5.	DA/DA Buck-Boost Dönüştürücünün Modellenmesi	91
6.6.	MGNT Devresinin Modellenmesi	92
6.7.	Tüm Sistem Modelinin Gerçekleştirilmesi	92
6.8.	MGNT Algoritmalarının Matlab/Simulink' de Gerçekleştirilmesi	93
6.8.1.	Artan İletkenlik Algoritmasının Uygulanması	96
6.8.2.	Değiştir ve Gözlemle Algoritmasının Uygulanması	99
6.8.3.	dP/dV Geri Besleme Kontrol Metodu Algoritmasının Uygulanması	101
6.8.4.	Beta MGNT Metodunun Uygulanması	104
6.8.5.	Üç Nokta Güçlerini Karşılaştırma Metodu Algoritmasının Uygulanması	107
6.8.6.	Önerilen Hibrit MGNT Metodu Algoritmasının Uygulanması	110
7.	SONUÇLAR	114
	KAYNAKLAR	116
	ÖZGEÇMİŞ	120

ÖZET

PV güç üretimi güneş enerjisini kullanmanın en önemli yollarından biridir. PV güç sistemlerinde ışıyım şiddeti ve sıcaklık sistemin çıkış gücünü önemli derecede etkilemektedir. PV panelin çıkış gerilimi ve akımı arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır. Bu ilişki teoride ve uygulamada PV panel için maksimum güç noktası takibinin (MGNT) önemini göstermektedir. Tüm PV sistemin maksimum verimlilikte ve maksimum güçte çalıştığı I-V ve P-V eğrisinde tek bir maksimum güç noktası (MGN) vardır. MGN'nin konumu bilinmez fakat hesaplama modelleri veya tarama algoritmaları ile bulunabilir. MGNT, PV panelin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlamak için kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında güneş pilinin yapısı, PV panellerden oluşan sistemler ve güneş izleyici sistemleri hakkında genel bilgi verilmiştir. Önemli MGNT metotları ve literatürde daha az yer bulan diğer metotlar sunulmuştur. Değiştir ve gözlemle (D&G) metodu, artan iletkenlik metodu, dP/dV geri besleme kontrol metodu, beta metodu ve üç nokta gücünü karşılaştırma metotlarına literatürde oldukça fazla değinilmiştir. Bu metotlar ile hibrit bir MGNT metodunun simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bütün metot simülasyonları PV panel çıkış geriliminin ölçümüne gerek duymamaktadır. Başka bir deyişle, çıkış algılamasız olarak gerçekleştirilmektedir. Zaman göre değişen ışıyım şiddeti, sıcaklık ve gerilim değerleri 280 W gücünde bir PV panel modeli için referans giriş değerleri olarak kullanılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları, MGN'ye ulaşma süreleri ve MGN'de oluşturdukları osilasyonlar değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Metodun sağladığı verimlilik, stabilite ve hız avantajları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerjisi, PV Panel, Maksimum Güç Noktası Takibi (MGNT), Değiştir ve Gözlemle Metodu, Beta Metodu, Üç Nokta Güçlerini Karşılaştırma Metodu.

SUMMARY

APPLYING A HYBRID MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHOD WHICH LESS AFFECTED FROM RAPID ENVIRONMENTAL CHANGES

PV power generation is one of the most important ways to use the sun's energy. Insolation and temperature in PV power systems affect the output of the system significantly. Between PV panel output voltage and current, there is a nonlinear relationship. This relationship demonstrates the importance maximum power point tracking (MPPT) for theory and practice for PV panels. I-V and P-V curve has only one of maximum power point (MPP) which entire PV systems operate at maximum efficiency and maximum power. MPP's location is unknown, but it found with computational models or sweep algorithms. MPPT is used to ensure that the work at the MPP of the PV panels.

In this thesis; general information about the structure of the solar cell, solar tracking systems and the systems consisting of PV panels are given. Important MPPT methods and other methods which less found in the literature have been presented. Perturb and observe (P&O) method, incremental conductance method, dP/dV feedback control method, beta method and three point weight comparison method has been mentioned a lot in the literature. This methods and a hybrid MPPT method are simulated. In simulation of all methods, the measurement of the output voltage of the PV panels are not required. In other words, the output senseless is performed. Insolation intensity, temperature and voltage values which changed the time, is used as reference input value for a 280 W power PV panel model. The obtained simulation results, time to reach the MPP and oscillations which created at MPP compared by evaluating. Efficiency, stability and speed advantages provided by the method are presented.

Key Words: Solar Energy, PV panel, Maximum Power Point Tracking, Perturb and Observed Method, Beta Method, Three Point Weight Comparison Method.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 2.1. Çeşitli teknolojiler için PV hücre verimlilikleri.....	6
Şekil 2.2. Silisyum (a) ‘daki gibi 14 proton ve elektrona sahiptir. Geleneksel kısa gösterim sadece dış yörüngedeki 4 elektron gösterilerek şekil (b) gibidir.....	7
Şekil 2.3. Kristal silisyum 3 boyutlu tetrahedral yapı şeklinde (a); fakat iki boyutlu düz dizilişte (b) ‘deki gibi çizmek kolaydır.....	8
Şekil 2.4. Boşlukların ve elektronların hareketi.....	8
Şekil 2.5. Elektronların ve akımın akış yönü.....	9
Şekil 2.6. Fotovoltaik pil için basit bir eşdeğer devre diyot ile paralel gün ışıyla sürülen akım kaynağından oluşur.....	9
Şekil 2.7. Fotovoltaiklerin iki önemli parametresi kısa devre akımı I_{sc} ve açık devre gerilimi V_{oc}	10
Şekil 2.8. Karanlık ve aydınlık için fotovoltaik akım-gerilim ilişkisi.....	11
Şekil 2.9. Seri bağlantılı hücre dizilerindeki basitleştirilmiş eşdeğer devre.....	12
Şekil 2.10. Eklenen paralel direnç ile basitleştirilmiş PV eşdeğer devresi.....	12
Şekil 2.11. Eklenen paralel dirençle idealleştirilmiş PV eşdeğer devresinin I-V eğrisi.....	13
Şekil 2.12. PV eşdeğer devresine seri direnç eklenmesi ile I-V eğrisindeki değişim.....	15
Şekil 2.13. PV hücre için seri ve paralel dirençlerin ikisini de içeren daha karmaşık bir devre.....	15
Şekil 2.14. PV eşdeğer devresindeki seri ve paralel dirençler sağlanan I-V eğrisi.....	17
Şekil 2.15. Fotovoltaik hücre, modül ve dizi.....	17
Şekil 2.16. Seri bağlantılı hücreler için herhangi bir verilen akımda gerilimlerin toplanması.....	18
Şekil 2.17. Seri bağlı modüller için, herhangi bir verilen akımda gerilimlerin Toplanması.....	18
Şekil 2.18. Paralel modüller için, herhangi bir verilen gerilimde akımlar toplanır.....	19
Şekil 2.19. Seri üç modül ve paralel iki modül ile bir dizi bağlantısının iki yolu.....	20
Şekil 2.20. Açık devre (a), kısa devre (b) ve yüke bağlı olma durumu (c).....	21
Şekil 2.21. PV modülün çıkış gücü ve I-V eğrisi.....	22
Şekil 2.22. MGN I-V eğrisinin altındaki uygun en büyük dikdörtgenin karşılığıdır.....	22
Şekil 2.23. En üstteki hücrenin de içinde yer aldığı n hücreli bir modül (a) ‘da güneşlenmede veya (b) ‘de gölgelenmede.....	23
Şekil 2.24. n hücreli bir modüldeki gölgelenmiş bir hücrenin etkisi.....	25
Şekil 2.25. Tam güneşlenmedeki bir hücre (a) ve gölgelenme durumundaki bir hücre.....	25
Şekil 2.26. Bypass diyotunun gölgelenme problemine etkisi.....	26
Şekil 2.27. Bypass diyotun etkisi.....	27
Şekil 2.28. Modüller 65V ‘luk bir bataryayı şarj ederken, gölgelemenin etkisini azaltmada bypass diyotunun etkisini göstermektedir.....	28
Şekil 2.29. Tıkama diyotunun görevini yerine getirmeyen veya gölgelenmiş sıradan ters yönde akacak akımı önlemesi.....	29
Şekil 3.1. Bataryaya sahip olmayan şebeke bağlantılı PV güç sistemi.....	30
Şekil 3.2. Ayrı PV şarj kontrolü ve inverter şarj kontrolünün (a) ve birleşik şarj kontrolünün kullanıldığı (b) bataryaya sahip şebeke bağlantılı PV güç sistemi.....	31

Şekil 3.3. Bataryaya sahip şebeke bağlantısının olmadığı PV sistem.....	32
Şekil 4.1. Güneş izleyici tipleri.....	36
Şekil 5.1. MPP ‘den tepe tırmanma ve P&O metotlarının uzaklaşması.....	38
Şekil 5.2. P&O algoritmasının akış diyagramı.....	40
Şekil 5.3. PV dizinin I-V karakteristik eğrisi.....	40
Şekil 5.4. Geliştirilmiş P&O metodunun akış diyagramı.....	41
Şekil 5.5. Karakteristik PV dizi güç eğrisi.....	42
Şekil 5.6. Artan iletkenlik metodu akış diyagramı.....	43
Şekil 5.7. β metodunun akış diyagramı.....	46
Şekil 5.8. Üç nokta metodu için algoritma.....	48
Şekil 5.9. Üç değişen noktanın olası durumları.....	49
Şekil 5.10. Tablo tarama metodu.....	50
Şekil 5.11. Sürekli (on-line) araştırma algoritmasının akış diyagramı.....	52
Şekil 5.12. PV dizi ve yükün çıkış karakteristiği.....	53
Şekil 5.13. PV çıkış algılamasız MPPT kontrol metodunun blok diyagramı.....	54
Şekil 5.14. P-V karakteristik eğrisi kullanılarak POS MPPT kontrol metodunun açıklaması.....	55
Şekil 5.15. Normalleştirilmiş güç, güce karşı akım eğrisi, gücün üretimi, ($C_1=P*(dP/dI)$, $C_2=P*(-dP/dI)$) eğrileri.....	56
Şekil 5.16. Değişken adımli INR MPPT algoritmasının akış şeması.....	59
Şekil 5.17. Sistem osilasyon MPP izleme metodunun blok diyagramı.....	61
Şekil 5.18. Dönüştürücüye bağlı güneş panelinin eşdeğer devresi.....	61
Şekil 5.19. SEPIC dönüştürücünün devre şekli.....	62
Şekil 5.20. DA bağlantılı kapasite düşüş kontrolünün topolojisi.....	65
Şekil 5.21. Farklı yük tipleri; 1) gerilim kaynağı, 2) direnç (omik), 3) direnç ve gerilim kaynağı, 4) akım kaynağı.....	66
Şekil 5.22. Sabit gerilim izleyicinin kontrol devresi konfigürasyonu.....	67
Şekil 5.23. Kesişme noktasında maksimum çıkış güç eğrisi.....	69
Şekil 5.24. Maksimum güç noktası kesişme noktalarında konumlandırılmış.....	69
Şekil 5.25. PV hücrenin şebekeyle bağlantı noktasında inverter güç bölgesi arayüzü.....	71
Şekil 5.26. En iyi sabit gerilim algoritması akış şeması.....	72
Şekil 5.27. Kullanılan metot için PV inverter sistemi.....	73
Şekil 5.28. Lineer tekrar konumlandırılan koordinatlar metodunu P-V ve I-V eğrileri.....	73
Şekil 5.29. Üç farklı sıcaklık için PV panel karakteristiği.....	74
Şekil 5.30. Bir PV modülde maksimum güç transferi.....	76
Şekil 5.31. Thevenin eşdeğer devresi.....	76
Şekil 5.32. Empedans izleyiciye dayanan MPPT.....	77
Şekil 5.33. Farklı yük durumları altında minimum indüktansın karakteristikleri.....	78
Şekil 5.34. Değişebilen indüktansın karakteristikleri.....	78
Şekil 5.35. Değişebilen indüktans ile bir MPPT DA/DA dönüştürücüde CCM durumlarının karşılaştırılması.....	79
Şekil 6.1. Üç nokta gücünü karşılaştırma metoduna ait akış şeması.....	82
Şekil 6.2. Uyguladığımız beta metodunun akış şeması.....	84
Şekil 6.3. Beta değerinin güç-gerilim eğrisine göre değişimi.....	85
Şekil 6.4. Hibrit metoda ait akış şeması.....	87
Şekil 6.5. MGNT devre konfigürasyonu.....	88
Şekil 6.6. PV panelin modellenmesi ve MGN değerlerinin bulunması.....	90
Şekil 6.7. I-V eğrisi.....	90

Şekil 6.8. P-V eğrisi.....	91
Şekil 6.9. Buck-boost dönüştürücünün simulink modeli.....	92
Şekil 6.10. Gerçekleştirilen uygulamanın simülasyon modeli.....	93
Şekil 6.11. 10-6 temel örnekleme zamanı için sistem giriş sinyalleri: (a) gerilim sinyali, (b) ışıınım sinyali, (c) sıcaklık sinyali	94-95
Şekil 6.12. 10-5 temel örnekleme zamanı sistem giriş sinyalleri: (a) gerilim sinyali, (b) ışıınım sinyali, (c) sıcaklık sinyali	95-96
Şekil 6.13. Artan iletkenlik algoritması ile gerçekleştirilen MGNT	97
Şekil 6.14. Artan iletkenlik algoritmasının geçici durum yanıtı	97
Şekil 6.15. Artan iletkenlik metodunun sürekli durum yanıtı	98
Şekil 6.16. Artan iletkenlik algoritması ile gerçekleştirilen MGNT.....	98
Şekil 6.17. Değiştir ve gözlemle algoritması ile gerçekleştirilen MGNT.....	99
Şekil 6.18. Değiştir ve gözlemle metoduna MGN' a ulaşma süreleri	100
Şekil 6.19. Değiştir ve gözlemle metodunun sürekli durum yanıtı	100
Şekil 6.20. Değiştir ve gözlemle algoritması ile gerçekleştirilen MGNT	101
Şekil 6.21. dP/dV geri besleme kontrol algoritması	102
Şekil 6.22. dP/dV geri besleme kontrol metodu ile gerçekleştirilen MGNT	103
Şekil 6.23. Beta metodunun geçici durum yanıtı.....	103
Şekil 6.24. dP/dV metodunun sürekli durum yanıtı	104
Şekil 6.25. Beta metodunu ile gerçekleştirilen MGNT	105
Şekil 6.26. Beta metodunun geçici durum yanıtı	105
Şekil 6.27. Beta metodunun sürekli durum yanıtı	106
Şekil 6.28. Her bir saniye için beta metodunun çıkış güç değerleri	106
Şekil 6.29. Beta metodunu ile gerçekleştirilen MGNT	107
Şekil 6.30. Üç nokta güçlerini karşılaştırma metodunun gerçekleştirdiği MGNT.....	108
Şekil 6.31. Üç nokta metodunun geçici durum yanıtı	108
Şekil 6.32. Üç nokta metodunun sürekli durum yanıtı	109
Şekil 6.33. Üç nokta güçlerini karşılaştırma metodunun gerçekleştirdiği MGNT.....	109
Şekil 6.34. Hibrit metot ile gerçekleştirilen MGNT.....	110
Şekil 6.35. Hibrit metodun geçici durum yanıtı.....	111
Şekil 6.36. Hibrit metodun sürekli durum yanıtı.....	111
Şekil 6.37. Hibrit metodunun çıkış güç değerleri.....	112
Şekil 6.38. Hibrit metot ile gerçekleştirilen MGNT.....	113

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 2.1. Fotovoltaiklerin içerdği en önemli elementler olan Silisyum, Bor, Fosfor, Galyum, Arsenik, Kadmiyum ve Tellür elementlerinin periyodik tablodaki görünümü.....	7
Tablo 5.1. POS MGNT kontrol metodunun sonuçsal açıklaması.....	55
Tablo 5.2. Optimum gerilim eşitliğinin parametreleri.....	74
Tablo 6.1. SL280-24M yüksek verimlilikli mono-kristal solar panel.....	89

KISALTMALAR

CSP	: Odaklanmış Güneş Enerjisi
PV	: Photovoltaik
MGN	: Maksimum güç noktası
AA	: Alternatif akım
CCD	: Charge Coupled Device (ışığa duyarlı sensör)
MPPT	: Maksimum Power Point Tracking
MGNT	: Maksimum Güç Noktası Takibi
PI	: Proportional Integral
RPM	: referans maksimum güç
POS	: PV Output Senseless (PV çıkış algılamasız)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
DA	: Doğru akım
STC	: Standart test koşulları
CCM	: Continuous Current Mode (sürekli iletim modu)
DCM	: Sürekli olmayan iletim modu

SEMBOLLER LİSTESİ

P	: Güç
V	: Gerilim
I	: Akım
I_{sc}	: Kısa devre akımı
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
$V_{oc,n}$	: Nominal açık devre gerilimi
V_t	: Seri hücre gerilimi
$V_{t,n}$	: Nominal seri hücre gerilimi
V_d	: Diyot eşik gerilimi
I_d	: Diyot akımı
I_0	: Ters saturasyon akımı
Q	: Elektron yükü
k	: Boltzman sabiti
T	: Jonksiyon sıcaklığı (°K)
R_p	: PV paralel sızıntı direnci
R_s	: PV seri direnç
$V_{modül}$	: Modül gerilimi
V_m veya V_{MPP}	: MGN' daki gerilim
I_m veya I_{MPP}	: MGN' deki akım
V_R	: Oransal akım
I_R	: Oransal gerilim
FF	: Fill factor (dolum faktörü)
V_{SH}	: Gölgelemiş durumda tüm modülün çıkış gerilimi
V_{ref}	: Referans gerilim
I_{PV}	: PV akımı
V_{PV}	: PV gerilimi
N_s	: Seri bağlı fotovoltaiik sayısı
D	: Görev periyodu
P_{PV}	: PV gücü
V_{link}	: DA bağlantı gerilimi
I_{peak}	: MGNT kontrolü için kullanılan akımın maksimum değeri
I_{out}	: Çıkış akımı
V_{out}	: Çıkış gerilimi
A	: p-n jonksiyonun ideallik faktörü
Q veya S	: Işınım şiddeti
I_{OPT}	: Optimum akım
V_{OPT}	: Optimum gerilim
R_L	: Yük direnci
R_{LR}	: MGNT' deki yük direnci
K_I	: Akım sıcaklık katsayısı
K_V	: Gerilim sıcaklık katsayısı

1. GİRİŞ

Coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresinin 2.640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışıyım şiddetinin 1.311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Güneş Enerjisi potansiyeli ise 380 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmıştır.

Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki ana gruba ayrılabilir:

- Isıl Güneş Teknolojileri ve Odaklanmış Güneş Enerjisi (CSP): Güneş enerjisinden ısı elde edilen bu sistemlerde, ısı doğrudan kullanılabileceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir.
- Güneş Pilleri: Fotovoltaik piller de denen yarıiletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler.

Güneş pilleri için en önemli dezavantaj, halen ticari olan silisyum kristali ve ince film teknolojisiyle üretimlerinin olağanüstü yüksek maliyetler oluşturmalarıdır. Maliyetlerin düşmesi ve verimliliğin artması ile Türkiye' de güneş pilinden üretilen elektrik enerjisi miktarının artması beklenmektedir. Ayrıca, Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası ve CSP teknolojisi ile 380 milyar kWh/yıl enerji üretilebileceği hesaplanmıştır.

Ülkemizde çoğu kamu kuruluşlarında olmak üzere küçük güçlerin karşılanması ve araştırma amaçlı kullanılan güneş pili kurulu gücü 1 MW' a ulaşmıştır.

Güneş enerjisi ve hidrojen enerjisi alanında yapılan çalışmalar savunma sanayimiz ve askeri amaçlarla kullanım dâhil olmak üzere ülkemizin enerji geleceği açısından büyük bir öneme sahiptir [1].

Faranda, Leva, ve Maugeri PV güç üretiminin iki ana probleminin varlığından bahsetmiştir: birincisi PV panellerin enerji dönüşüm veriminin özellikle düşük ışıyım şiddetinde çok düşük olması, ikincisi ise PV panelden elektrik üretim miktarının atmosfer şartları ile sürekli değişmesidir. Değiştir ve gözlemle, artan iletkenlik, yapay sinir ağları, bulanık mantık vb. metotların literatürde yer aldığı, fakat değiştir ve gözlemle metodu ve artan iletkenlik metodunun yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Makalede MGNT

tekniklerinin kolay uygulanabilirliği ve maliyet açısından değerlendirilmesi yapılmıştır [18].

Paz ve Ordonez son yıllarda yayınlanan birçok makalede; sürekli durumda meydana gelen osilasyon, değişen hava şartlarındaki izleme ve genel maksimumun konumu gibi birçok durumun çözümsüz kaldığını belirtmiştir. MGNT için birçok tekniğin kullanıldığı, birçoğunun çok basit bir şekilde uygulanabileceği, fakat verimlerinin düşük olduğu belirtilmiştir. Tepe tırmanma tekniği, değiştir ve gözlemle metodu ve artan iletkenlik algoritmalarının düşük maliyetleri, yüksek verimlilikleri, yeterli derecede güvenilirlikleri ve PV panel hakkında ayrıntılı bilgiye ihtiyaç duymamaları, MGNT algoritmaları arasında bir üstünlük kazanmalarını sağlamıştır. Ancak metotların sürekli durumda güç kayıplarına sahip olduğu belirtilmiştir. Makalede MGNT stratejisi için kayıpları azaltan ve hızlı ısınım değişimi altında izleme gerçekleştiren bir metot, sıfır osilasyonlu ve uygun adımlı değiştir ve gözlemle metodu adıyla önerilmiştir. Bu metotta yapılan iyileştirmelerin; sürekli durumdaki verimliliğin osilasyonların bastırılmasıyla azaltılması, ısınım şiddeti değişiminin neden olduğu bozulmanın elimine edilmesi ve adımların doğru izleme için ayarlanabilmesi olduğu belirtilmiştir [21].

Brito, Sampaio, Junior ve Canesin yaptıkları iki benzer çalışmada PV panellerin enerji dönüşüm veriminin halen düşük olduğunu ve uygulamada ilk kurulum maliyetinin halen yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle PV panelden maksimum verimi elde etmek için MGNT tekniklerinin kullanılmasının gerekliliği belirtilmiştir. Literatürde yer alan başlıca MGNT teknikleri Matlab / Simulink' te modellenmiş ve gerekli sensör miktarı, sürekli durumda gerilimdeki dalgalanma, başlangıç performansı, izleme faktörü ve elde edilen enerji miktarları gibi deneysel sonuçlar göz önüne alınarak bu teknikler değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır [13,14].

Jain ve Agarwal çalışmalarında değiştir ve gözlemle metodunun, artan iletkenlik metodunun ve dalgalanma temelli metodun popüler olan MGNT metotlarından birkaçı olarak tanımlamış ve bir metot önerilmiştir. Önerilen metotta MGNT iki bölgede gerçekleştirilmiştir. Birinci bölgede beta metodu, ikinci bölgede ise tepe tırmanma veya diğer geleneksel MGNT metotlarından biri ile MGNT gerçekleştirilmiştir. Böylece önerilen metot, büyük ve değişken adımlarla izleme hızının yüksek olduğu ve küçük adım değerlerinin ayarlanabilmesiyle de kayıpların düşük olduğu çok verimli bir metot olarak sunulmuştur [24].

Desai ve Patel çalışmalarında çeşitli algoritmalar üzerine çalışmış ve simülasyon sonuçlarını sunmuşlardır. Algoritmalar uyuma durumlarına göre sınıflandırılmış ve MGNT için kullanılmışlardır. Algoritmalar da değişken olarak; PV akımı, PV gerilimi, çıkış akımı ve çıkış gerilimi kullanılmıştır. İzleme verimi, maliyeti, uygulama karmaşıklığı gibi karşılaştırma performansları göz önüne alınarak algoritmalar değerlendirilmiştir [15].

Ali, Saied, Mostafa ve Abdel-Moneim çalışmalarında PV güç üretim sistemlerinin enerji dönüşüm veriminin düşük olması ve üretim miktarının hava durumuna bağlı olarak sürekli değişmesi gibi iki ana problemi olduğunu belirtmiştir. Işınım şiddeti gün boyunca değiştiği için çıkış gücünde gün boyu değiştiği ve bu nedenle MGNT tekniklerinin PV enerji üretim verimini arttırmak için gerekli olduğu vurgulanmıştır. Literatürde yer alan MGNT tekniklerinin önemli bir miktarı bu çalışmada derlenmiş ve değerlendirilmiştir. Her bir algoritmanın avantaj ve dezavantajları tablo halinde sunulmuştur [12].

Zanotti, dos Santos ve Martins yaptıkları çalışmada buck ve boost dönüştürücüler gibi farklı DA/DA dönüştürücülerin MGNT ara yüzü olarak kullanıldığını belirtmiş ve yaptıkları çalışmanın uygulama maliyeti ve en iyi performansın elde edilmesiyle ilgili olduğu vurgulanmıştır. Analiz ettikleri MGNT tekniklerinin çoğunda PV panel çıkış akımı, gerilimi ve bazen de sıcaklığın ölçülmesi gerektiği görülmüştür. Çalışmalarında yalnız bir gerilim sensörü kullanarak MGNT gerçekleştiren bir teknik sunmuşlardır. Önerdikleri bu metotta DA/DA dönüştürücünün görev periyoduyla değişen giriş empedans değeri ile giriş gerilimi kullanılarak güç tahmini yapılmış ve MGNT gerçekleştirilmiştir. Önerdikleri metodu geleneksel değiştir ve gözlemler metodu ile karşılaştırmışlardır. Metodun değiştir ve gözlemler metodu ile aynı performansı gerçekleştirdiği simülasyon sonucuyla gösterilmiştir. Metodun sadece gerilim değerinin ölçülmesiyle MGNT 'ni gerçekleştirmesi, maliyet açısından avantajlı olduğunu göstermiştir. Önerilen metot ile değiştir ve gözlemler metodunun hem simülasyonu hem de deneysel kurulumu gerçekleştirilmiştir ve sonuçları sunulmuştur [44].

Li, Bin, Xu ve Yang yaptıkları çalışmada tek fazlı şebeke bağlantılı PV güç üretim sistemini göz önüne alarak yapay balık sürüsü algoritmasını önermişlerdir. Önerdikleri algoritmanın hızlı dinamik yanıt ve güçlü optimizasyon yeteneğine sahip olduğu öne sürülmüş, kontrol sistemi ile ilgili bilgi verilmiş ve metodun simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir [43].

Walker, Sooriyaarachchi, Liyanage, Abeynayake ve Abeyratne yaptıkları çalışmada değiştir ve gözlemler, artan iletkenlik ve üç nokta güçlerini karşılaştırma metodlarının

yakınsama hızlarını karşılaştırmış, metotların Matlab simülasyonunu ve donanım uygulamasını gerçekleştirerek sonuçları doğrulamıştır [10].

Bu çalışmaların hepsi PV panellerde MGNT 'nin gerçekleştirilmesi gerekliliğinin ne derece önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada literatürde yer bulan önemli MGNT metotları incelenmiş ve alternatif bir MGNT metodu gerçekleştirilmiştir. Bu metodun diğer metotlara göre sağlayacağı avantajlar yapılan simülasyon modelleri ile MGN' ye ulaşma süreleri ve MGN' de oluşturdukları osilasyonlar değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

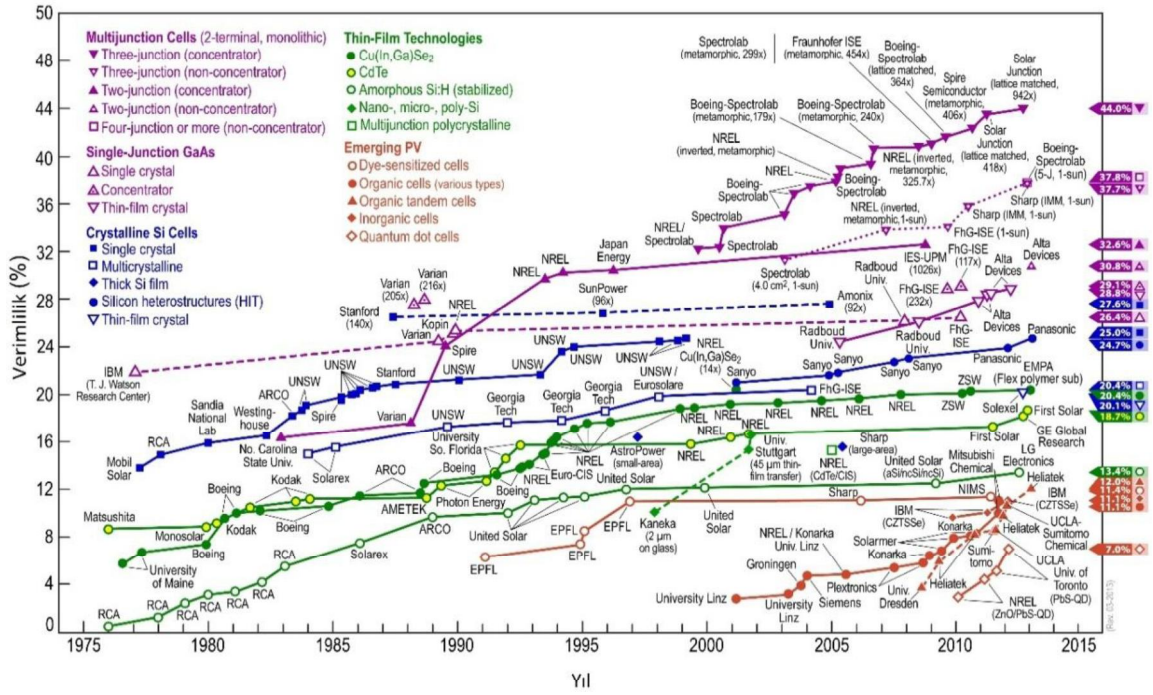
2. FOTOVOLTAİK MATERYALLER VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİSTİKLERİ

Işıktaki fotonların sahip olduğu enerjiyi elektriksel gerilim ve akıma dönüştürme kapasitesine sahip materyal veya araçlar fotovoltaik olarak adlandırılır. Yeterince kısa dalga boyu ve yeterince enerjiye sahip bir foton fotovoltaik materyaldeki atomdan bir elektronun serbest kalmasına sebep olur. Eğer yanında bir elektrik alanı oluşursa, bu elektronlar elektrik akımının oluşacağı yer olan metalik kontaklara doğru kayar. Fotovoltaikleri çalıştıran güç güneşten gelir ve yeryüzü yüzeyinin bizim enerji isteğimizin 6000 kat daha çok güneş enerjisi aldığına işaret edilmektedir.

Fotovoltaiklerin tarihi 19 yaşında Fransız fizikçi Edmund Becquerel' in sıvı elektrolitik çözeltisindeki metal elektrodu açıkladığı zaman, bunun anlaşılması için bir gerilimin sebep olduğunu ifade ettiği 1839' da başladı. Hemen hemen 40 yıl sonra, Adams ve Day katı cisimdeki fotovoltaik etkiyi ilk olarak çalışmıştır. Onlar %1-2 verimliliği olan selenyum içeren pilleri yaptılar. Selenyum piller bugün hala aynı amaç için kullanıldığı, ışık yoğunluğunun ölçüldüğü fotoğraf endüstrisine hızlıca adapte oldu.

Kuantum teorisini geliştirmesinin bir parçası olarak, Albert Einstein 1904' de fotovoltaik etkinin teorik açıklamasını yayınladı ve bu 1923' de Nobel ödülünü almasını sağladı.

1950' li yıllarda ticari fotovoltaiklerin üretilmesine yönelik birkaç teşebbüs vardı, fakat maliyetleri çok yüksekti. Vanguard 1 uydusu için PV' lerin uzayda ilk olarak kullanıldığı 1958' de pratik enerji kaynağı olarak PV' lerin gerçek çıkışını oluşturdu. Uzay araçları için maliyet, ağırlık ve güvenilirlikten çok daha az önemliydi ve güneş pilleri uydular ve diğer uzay araçları üzerinde güç sağladığı için önemli bir rol oynamaktaydı. 1970' lerde var olan enerji krizinin uzamasıyla, uzay programlarıyla desteklenen geliştirme çalışmaları sıfıra indi. 1980' lerin sonuna doğru yüksek verimli ve düşük maliyetli geleceğin PV dizileri elde edildi ve bunlar hesap makineleri, deniz şamandırası, otoyol aydınlatmaları, sinyaller, acil arama kutuları, yerel su pompaları ve küçük ev sistemleri gibi şebekeden bağımsız bölgesel uygulamaların birçoğunda kullanıldı [2]. Şekil 2.1' de çeşitli teknolojilerde üretilen PV hücre verimlerinin yıllara göre değişimi verilmektedir.



Şekil 2.1. Çeşitli teknolojiler için PV hücre verimlilikleri [3]

2.1. Temel Yarıiletkenler

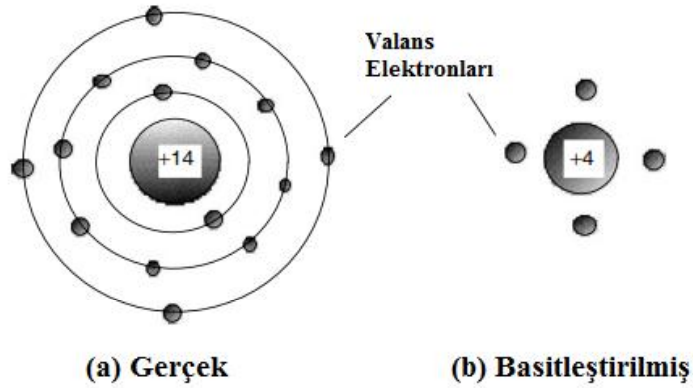
Fotovoltaikler güneş ışığını elektrığe dönüştürmek için yarı iletken materyalleri kullanırlar. Bu kullanılan teknoloji transistörler, diyotlar ve bugünlerde birçoğunu kullandığımız diğer yarı iletken araçların tümü katı hal teknolojisiyle çok yakından ilgilidir. Dünyada son zamanda üretilen fotovoltaik araçların çoğu için başlangıç noktası saf kristal silisyumdur. Fotovoltaiklerde kullanılan en önemli elementler Tablo 2.1' de verilmiştir.

Tablo 2.1. Fotovoltaiklerin içerdği en önemli elementler olan Silisyum, Bor, Fosfor, Galyum, Arsenik, Kadmiyum ve Tellür elementlerinin periyodik tablodaki görünümü [2]

1	2	3	4	5	6
		5 B	6 C	7 N	8 O
		13 Al	14 Si	15 P	16 S
29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se
47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te

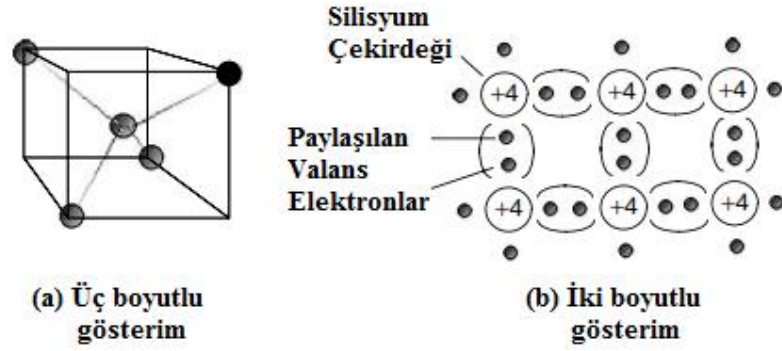
Germanyum başka bir 4. grup elementi olup, birçok elektronik elemanda yarı iletken olarak kullanılır. 3. ve 5. gruplardan bor ve fosfor çoğu PV 'lerin yapımında silisyuma eklenmektedir. Kadmiyum ve tellür CdTe pillerde kullanılırken, galyum ve arsenik GaAs güneş pillerinde kullanılmaktadır.

Silisyum çekirdeği 14 protona ve 14 yörünge elektronuna sahiptir. Dış yörüngelerinde 4 valans elektronu içermektedir. Şekil 2.2 (b) silisyumun atom yapısını gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Silisyum (a)'daki gibi 14 proton ve elektrona sahiptir. Geleneksel kısa gösterim sadece dış yörüngedeki 4 elektron gösterilerek şekil (b) gibidir [2]

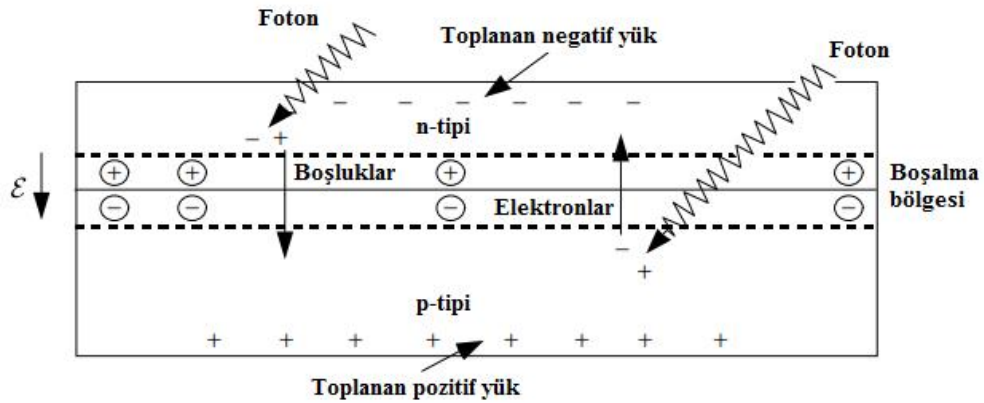
Saf kristal silisyumda, her bir atom Şekil 2.3' de gösterildiği gibi 3 boyutlu 4 adet 3 açılı yüzeye sahip 4 komşu atom ile kovalent bağ şeklindedir [2].



Şekil 2.3. Kristal silisyum 3 boyutlu tetrahedral yapı şeklinde (a); fakat iki boyutlu düz dizilişte (b)' deki gibi çizmek kolaydır [2]

2.2. Fotovoltaik Pil

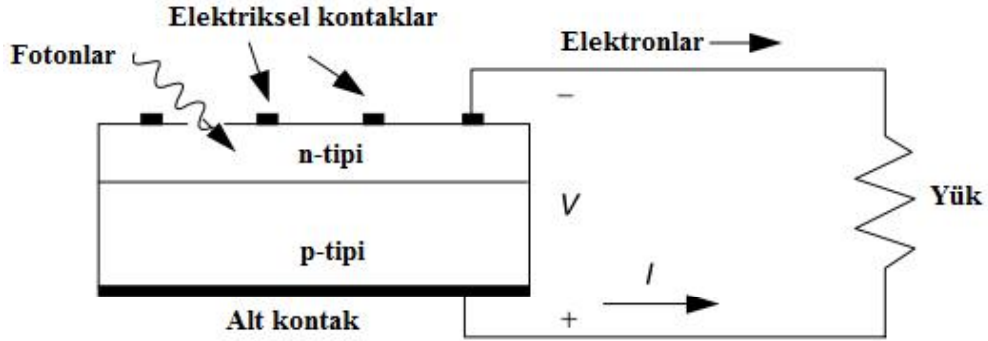
Fotonlar emildiği gibi, boşluk elektron çifti oluşabilir. Eğer hareket halindeki taşıyıcılar jonksiyon bölgesine ulaşırsa, boşalma bölgesindeki elektrik alanı Şekil 2.4' de gösterildiği gibi p bölgesine boşlukları n bölgesine elektronları itecektir. P bölgesine boşluklar, n bölgesine elektronlar toplanır ve yüke akım sağlamak için kullanılacak gerilim üretilir.



Şekil 2.4. Boşlukların ve elektronların hareketi [2]

Eğer pilin alt ve üstüne kontaklar yerleştirilirse, elektronlar Şekil 2.5' de gösterildiği gibi kablo bağlantısıyla n kenarından çıkarak yük üzerinden p kenarına doğru akar. Kablo bağlantısı boşlukları iletemeyeceği için, aslında sadece elektronlar devre üzerinden hareket edecektir. Elektronlar p kenarına ulaştıkları zaman, devresini tamamlayarak boşluklar ile

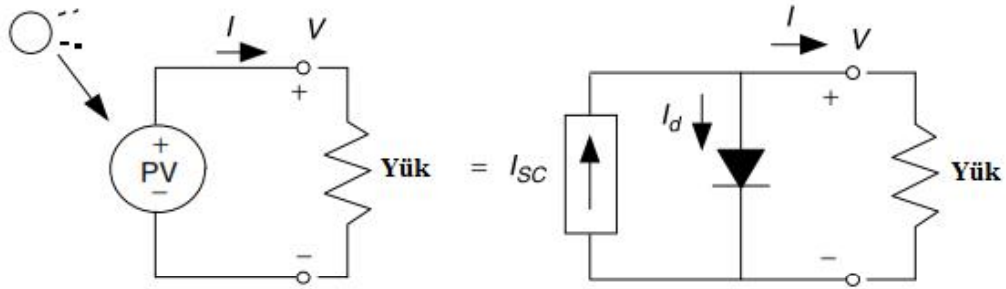
tekrar birleşirler. Akım elektron akışına ters yönde akar, böylece şekildeki akım oku p kenarından yüke ve n kenarına giden akımı gösterir [2].



Şekil 2.5. Elektronların ve akımın akış yönü [2]

2.2.1. Fotovoltaik Pil İçin Basit Eşdeğer Devre

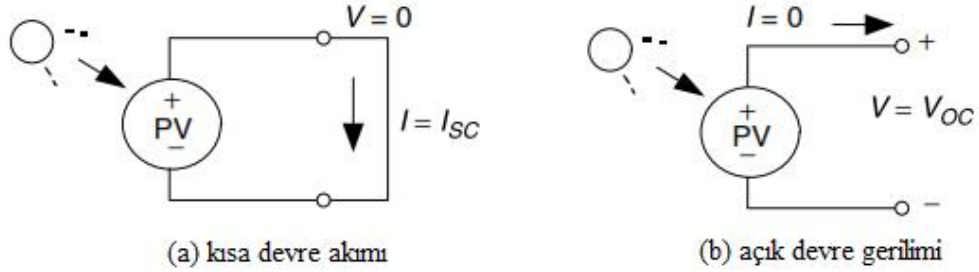
Fotovoltaik hücrenin basit bir eşdeğer devre modeli Şekil 2.6’ da gösterildiği gibi ideal bir akım kaynağı ile paralelinde yer alan bir diyottan oluşur. İdeal akım kaynağı maruz kaldığı güneş ışınımıyla orantılı olarak bir akım sağlar.



Şekil 2.6. Fotovoltaik pil için basit bir eşdeğer devre diyot ile paralel gün ışığıyla sürülen akım kaynağından oluşur [2]

Mevcut PV ve eşdeğer devresi ile ilgili olarak özel iki durum vardır. Şekil 2.7’ de gösterildiği gibi birincisi terminallerin birleştirilip kısa devre edildiğindeki akan akım (kısa devre akımı I_{sc}) ve ikincisi PV uçlarının açık olduğu durumda terminaller boyunca görülen gerilimdir (açık devre gerilimi V_{oc}). PV hücrenin uçları kısa devre edildiği zaman, $V_d=0$ olacağı için diyottan akım akışı olmaz, böylece ideal kaynaktan akım kısa devre yolu

boyunca akar. Kısa devre akımı I_{sc} ’ ye eşitlendiği için, ideal akım kaynağının büyüklüğü I_{sc} ’ ye eşit olmak zorundadır.



Şekil 2.7. Fotovoltaiklerin iki önemli parametresi kısa devre akımı I_{sc} ve açık devre gerilimi V_{oc} [2]

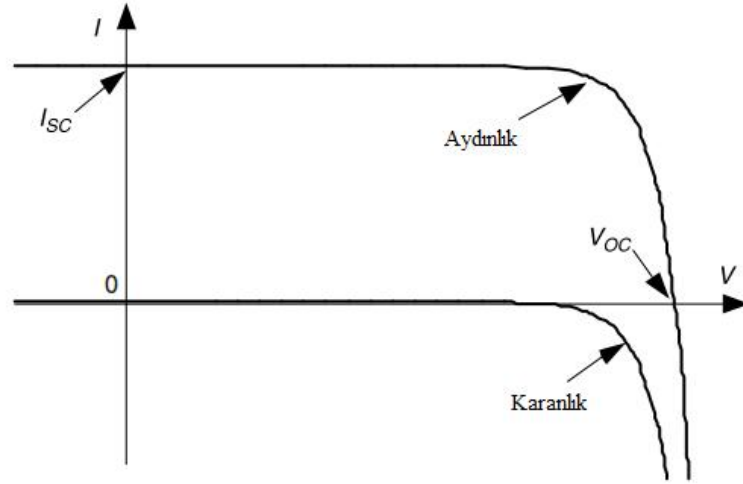
Şekil 2.6’ da gösterilen fotovoltaik pilin eşdeğer devresi için gerilim ve akım eşitlikleri

$$I = I_{sc} - I_d \quad (2.1)$$

$$I = I_{sc} - I_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.2)$$

şeklindedir.

Denklem (2.2)’ nin ikinci terimi negatif işaretli diyot eşitliğidir. Denklem (2.2)’ ye dayanarak karanlıkta ve aydınlıkta Şekil 2.8’ de PV hücre için akım-gerilim ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Karanlık ve aydınlık için fotovoltaiik akım-gerilim ilişkisi [2]

PV hücrenin uçları açıldığı zaman, $I=0$ ’ dır ve V_{oc} açık devre gerilimi için denklem (2.2) çözülürse

$$V_{oc} = \frac{k \cdot T}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.3)$$

25°C sıcaklık için, denklem (2.2) ve (2.3) aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I = I_{sc} - I_0 (e^{38.9 \cdot V} - 1) \quad (2.4)$$

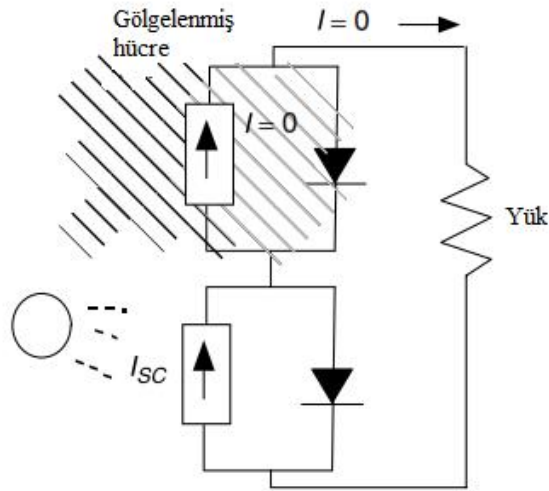
$$V_{oc} = 0.0257 \cdot \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Bu eşitliklerin ikisinde de kısa devre akımı I_{sc} ışıyım şiddeti direkt olarak orantılıdır. Bu, değişen güneş ışığı için PV akım-gerilim eğrilerinin kolayca çizilebileceğini göstermektedir [2].

2.2.2. Fotovoltaiik Pil İçin Daha Doğru Bir Eşdeğer Devre

Fotovoltaiik pillerin eşdeğeri için daha karmaşık devrelere ihtiyaç duyulduğu zamanlar vardır. Örneğin Şekil 2.9’ da gösterilen şekilde seri bağlantılı pillere gölgeleme etkisi

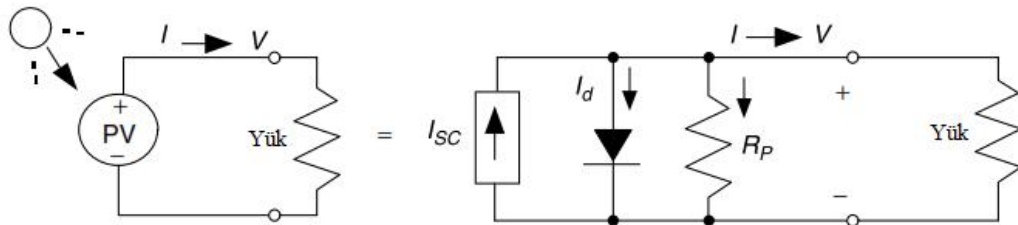
dikkate alınacaktır. Dizideki herhangi bir hücre karanlıktaysa (gölgelenmedeyse), o hücre akım üretmez. Gölgelenmiş hücre için basitleştirilmiş eşdeğer devremizde, pilin akım kaynağı boyunca akımı 0' dır ve diyot ters biaslanmıştır, böylece diyot herhangi bir akım geçirmez. Bu, hücrelerin herhangi biri gölgelendiği zaman, yüke güç sağlanamayacağını basit eşdeğer devre göstermektedir. Gerçekte güç akışı tamamen kesilmemekle beraber, bunu gösterebilmek için daha karmaşık modellere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.9. Seri bağlantılı hücre dizilerindeki basitleştirilmiş eşdeğer devre [2]

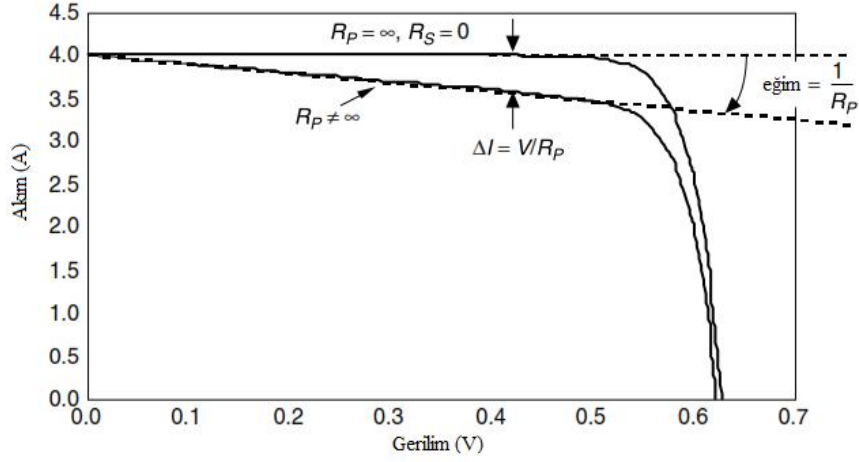
Şekil 2.10' da paralel sızıntı direnci R_p ' yi içeren PV eşdeğer devresini göstermektedir. Bu durumda ideal akım kaynağı I_{sc} diyota, paralel dirence ve yüke akım sağlamaktadır:

$$I = (I_{sc} - I_d) - \frac{V}{R_p} \quad (2.6)$$



Şekil 2.10. Eklenen paralel direnç ile basitleştirilmiş PV eşdeğer devresi [2]

Denklem (2.6)' da parantez içindeki terim basitleştirilmiş modeldeki ile aynı ifadedir. Burada paralel sızıntı direnci Şekil 2.11' de gösterildiği gibi ideal model için V/R_p ' nin sebep olduğu düşüşü içeren yük akımına sebep olur.



Şekil 2.11. Eklenen paralel dirençle idealleştirilmiş PV eşdeğer devresinin I-V eğrisi [2]

Paralel direnç nedeniyle pil kayıplarının %1' den daha az olması için, R_p yaklaşık aşağıdaki gibi olmalıdır:

$$R_p > \frac{100 \cdot V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.7)$$

Büyük hücreler için, I_{sc} 7A civarında olmalıdır, V_{oc} yaklaşık 0.6V olmalıdır. Paralel direnç yaklaşık 9Ω ' dan büyük olmalıdır.

İyi bir eşdeğer devre paralel direnç kadar seri dirençte içerecektir. Bu modeli geliştirmeden önce orijinal PV eşdeğer devresine sadece R_s seri direncini eklendiği Şekil 2.11' deki devreyi göz önüne alalım. Seri dirençler, hücreler ve onları bağlayan yollar arasındaki temas dirençleri ve yarı iletkenlerin kendi dirençlerinden meydana gelmektedir.

Şekil 2.11' i analiz etmek için, basit eşdeğer devre ifadesi:

$$I = I_{sc} - I_d = I_{sc} - I_0(e^{q \cdot V_d / k \cdot T} - 1) \quad (2.2)$$

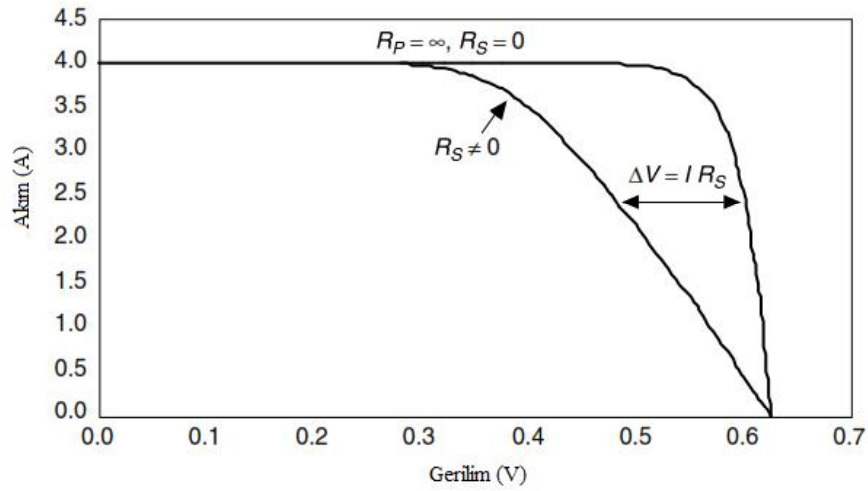
olup, bu ifadeye R_s ' in etkisi de eklenirse,

$$V_d = V + I \cdot R_s \quad (2.8)$$

$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V+I \cdot R_s)}{k \cdot T} \right] - 1 \right\} \quad (2.9)$$

elde edilir.

Denklem (2.9) eşitliği ile Şekil 2.12’ de gösterildiği gibi $\Delta V = I R_s$ tarafından sola kaydırılan herhangi bir akımdaki gerilim değeriyle ilgili olarak orijinal PV I-V eğrisi yorumlanabilir.



Şekil 2.12. PV eşdeğer devresine seri direnç eklenmesi ile I-V eğrisindeki değişim [2]

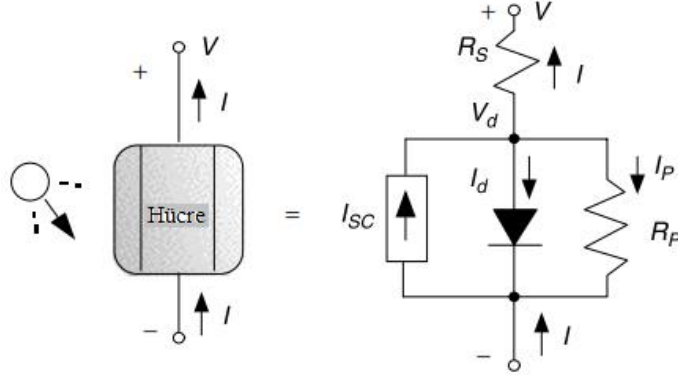
Bir hücre için, seri direnç nedeniyle %1’ den daha az kayıp olması için R_s yaklaşık aşağıda ifade edildiği gibi olmalıdır:

$$R_s < \frac{0.01 V_{oc}}{I_{sc}} \quad (2.10)$$

$I_{sc}=7A$ ve $V_{oc}=0.6V$ değerleri ile büyük bir hücre için R_s 0.0009Ω ’ dan daha küçük olacaktır.

Son olarak Şekil 2.13’ de gösterildiği gibi paralel ve seri dirençlerin ikisini de içerecek şekilde PV eşdeğer devresin de akım ve gerilim için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I \cdot R_s)}{k \cdot T} \right] - 1 \right\} - \left(\frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \right) \quad (2.11)$$



Şekil 2.13. PV hücre için seri ve paralel dirençlerin ikisini de içeren daha karmaşık bir devre [2]

Standart olarak farz edilen 25°C hücre sıcaklığı altında denklem (2.11) aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[e^{38.9(V + I \cdot R_s)} - 1 \right] - \frac{1}{R_p} (V + I \cdot R_s) \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) akım veya gerilimin her biri için çözümün açık olmadığı karmaşık bir eşitliktir. Hesap tablosu çözümü oldukça basit ve akıma karşı gerilim grafiğinin kolayca sağlanabilmesi için extra avantajlara sahiptir. Yaklaşım hesap tablosundaki diyot gerilimi V_d 'nin artışına dayanmaktadır. Her bir V_d değeri için, akım I ve gerilim V değerlerinin karşılığı kolayca bulunabilir.

Şekil 2.13' de gösterilen devre kullanılarak, diyotun üstündeki düğüme Kirchhoff' un akımlar kanunu uygulanarak aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$I_{sc} = I + I_d + I_p \quad (2.13)$$

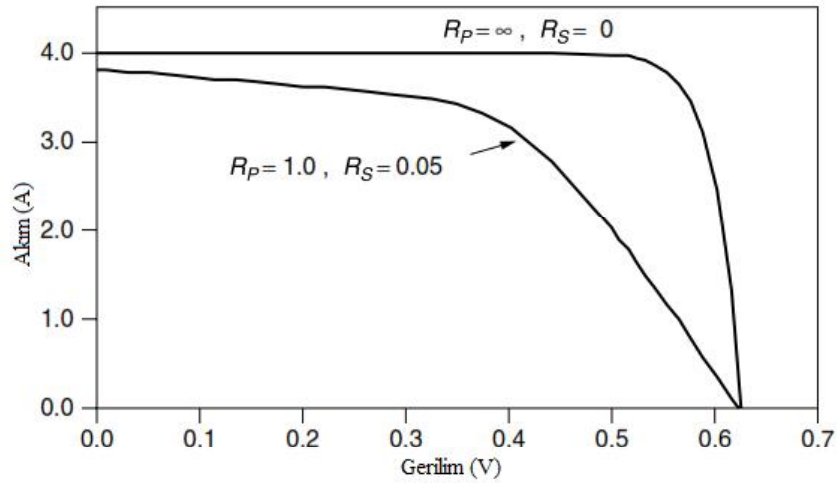
Bu ifade diyot denklemi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I = I_{sc} - I_0(e^{38.9V_d} - 1) - \frac{V_d}{R_p} \quad (2.14)$$

Hesap tablosunda V_d 'nin farz edilen değeri ile, I akımı denklem (2.14)'den bulunabilir. Ondan sonra tek bir hücre için gerilim aşağıdaki gibi bulunur:

$$V = V_d - I \cdot R_s \quad (2.15)$$

Eşdeğer devrenin $R_s=0.05\Omega$ ve $R_p=1\Omega$ ile sağlandığı denklem (2.12)'in çizimi Şekil 2.14' de gösterilmektedir. Beklendiği gibi grafik Şekil 2.11 ile Şekil 2.12' in özelliklerinin bileşimidir [2].



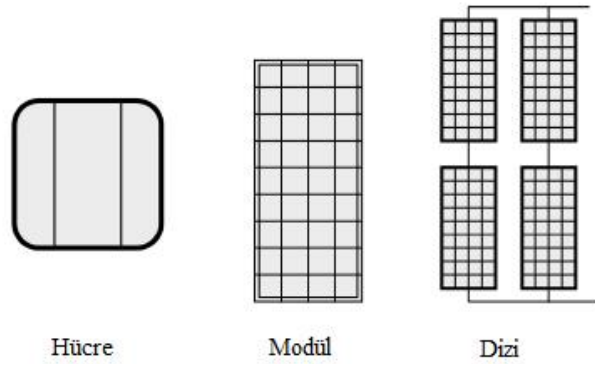
Şekil 2.14. PV eşdeğer devresindeki seri ve paralel dirençlerle sağlanan I-V eğrisi [2]

2.3. Hücrelerden Modül ve Modüllerden Dizilerin Elde Edilmesi

Tek bir hücre yaklaşık 0.5V ürettiği için, tek bir hücrenin kullanımı nadir bir uygulamadır. Yerine, PV uygulamalar için oluşturulan bloklar seri şekilde bağlantılı hücrelerden oluşturulmuş, fiziksel olarak dayanıklı olacak şekilde paketlenmiş ve hava şartlarına dayanıklı modüllerdir. Sıradan bir modül seri bağlantılı 36 hücreye sahiptir ve 12V' dan çok daha büyük gerilim sağlayabilme kapasitesine sahip olmasına rağmen sıkça 12V' luk modül olarak tasarlanır. Sadece 33 hücreye sahip birçok 12V' luk modüller çok basit batarya şarj sistemlerinde kullanılabilir. Büyük 72 hücreli modüller oldukça yaygındır. Bunların birçoğu 24V' luk modüller olarak tercih edildikleri durumlarda seri

bağlantılı hücelere sahiptirler. 72 hücreli modüller tüm hücrelerin seri şekilde bağlı olduğu 24V' luk modül olarak veya her birinin 36 hücreye sahip olduğu iki paralel dizi olarak 12V' luk modül şeklinde çalıştırılabilir.

Çoklu modüller gerilimi arttırmak için seri, akımı arttırmak için paralel bağlanır. PV sistem tasarımındaki önemli bir faktör enerji ihtiyacını karşılamak için modüllerin nasıl seri ve paralel bağlanacağına karar vermektir. Modüllerin kombinasyonu dizi olarak adlandırılır. Şekil 2.15' de hücre, modül ve dizi arasındaki farklılık gösterilmektedir [2].

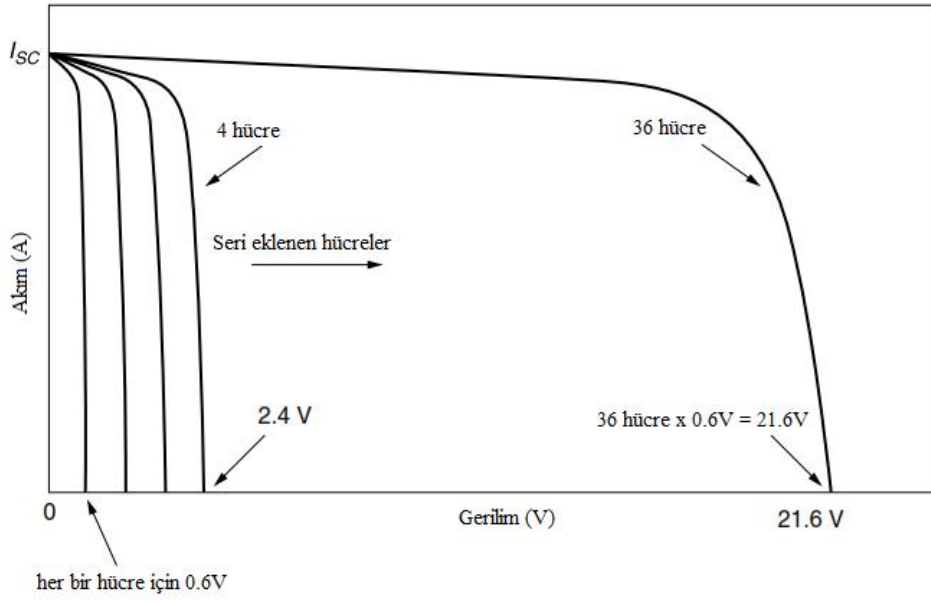


Şekil 2.15. Fotovoltaik hücre, modül ve dizi [2]

2.3.1. Hücrelerden Modül Elde Edilmesi

Fotovoltaikler seri bağlandığı zaman, Şekil 2.16' da gösterildiği gibi aynı akımı taşırlar ve gerilimleri toplanır. Yani modül sayısı ve hücre sayısının çarpılmasıyla tüm modül gerilimi denklem (2.16)' dan elde edilir.

$$V_{modül} = n(V_d - I \cdot R_s) \quad (2.16)$$

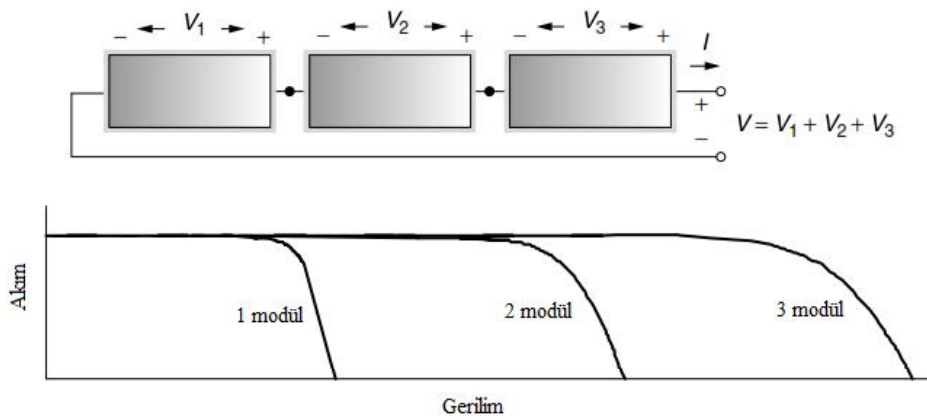


Şekil 2.16. Seri bağlantılı hücreler için herhangi bir verilen akımda gerilimlerin toplanması [2]

2.3.2. Modüllerden Dizi Elde Edilmesi

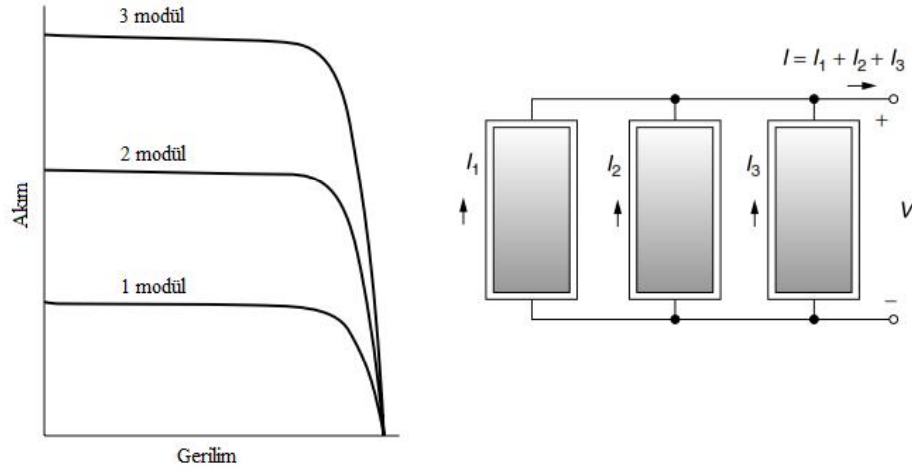
Modüller, gerilimi arttırmak için seri, akımı arttırmak için paralel bağlanabilir. Diziler gücü arttırmak için paralel ve seri modüllerin bileşiminden meydana gelmiştir.

Seri modüller için, I-V eğrileri basitçe gerilim eksenini boyunca toplanır. Herhangi bir verilen akımda, toplam gerilim Şekil 2.17’ de gösterildiği gibi sadece her bir modül geriliminin toplamıdır.



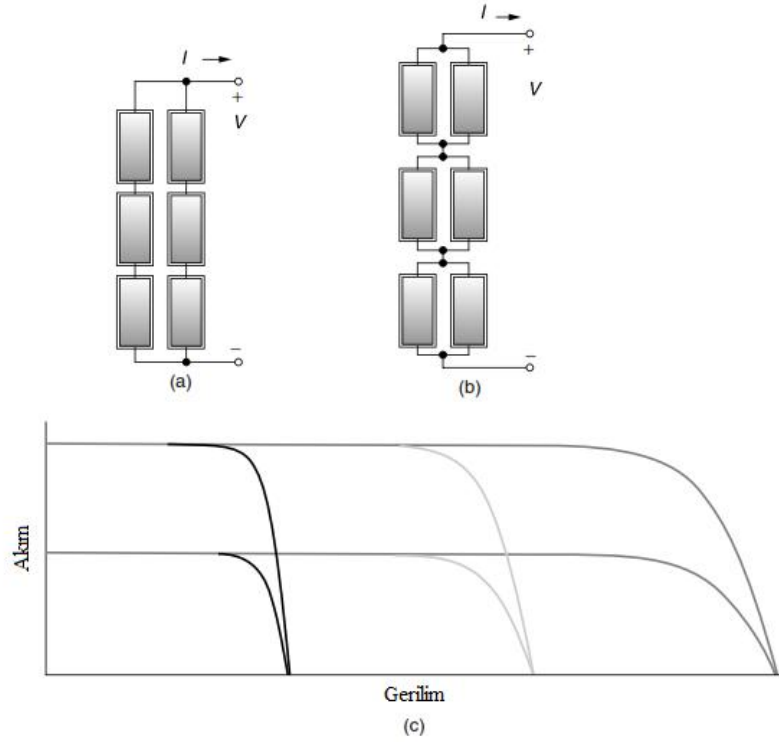
Şekil 2.17. Seri bağlı modüller için verilen herhangi bir akımda gerilimlerin toplanması [2]

Paralel modüller için, aynı gerilim her bir modülde mevcuttur ve toplam akım her bir modülün akımları toplamıdır. Yani herhangi bir verilen gerilimde, paralel birleştirilmiş I-V eğrisi o gerilimdeki her bir modül akımının toplamıdır. Şekil 2.18 paralel bağlantılı üç modülün akım gerilim eğrisini göstermektedir.



Şekil 2.18. Paralel modüller için, verilen herhangi bir gerilimde akımlar toplanır [2]

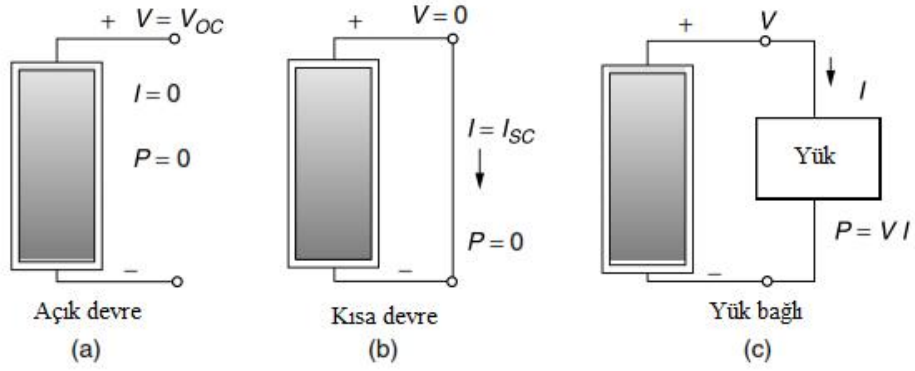
Yüksek güçlere ihtiyaç duyulduğu zaman, dizi genellikle toplam I-V eğrisinin her bir modülün I-V eğrilerinin toplamı olacağı seri ve paralel modüllerin farklı dizilimlerinden oluşacaktır. Şekil 19' dan görüldüğü gibi modüller seri/paralel kombinasyonlarda iki şekilde bağlanabilir. Toplam I-V eğrisi her modülün doğru çalıştığı durumdaki, modül I-V eğrilerinin toplamıdır. I-V eğrilerinin aynı olmasına rağmen, üç modülün her birinin iki sıra oluşturduğu Şekil 2.19 (a) tercih edilmektedir. Şekil 2.19 (a)' da paralel sıralı bağlantı kullanılmasının sebebi, eğer aynı sıra bir sebeple devreden çıkarsa, dizi akımı azalmasına rağmen hala yükün ihtiyacı olan gerilimi sağlamaya devam edecektir. Dizilerin toplam akım ve gerilim eğrisi Şekil 2.19 (c)' de gösterilmektedir [2].



Şekil 2.19. Seri üç modül ve paralel iki modül ile bir dizi bağlantısının iki yolu [2]

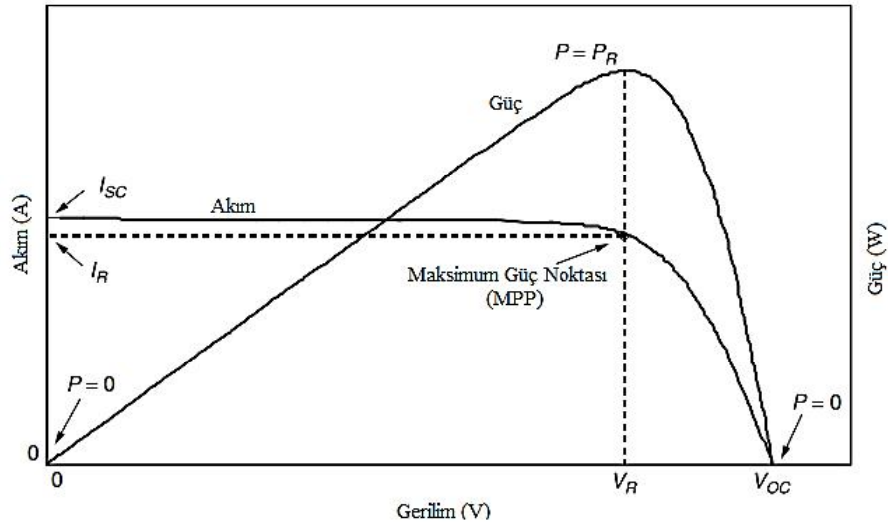
2.4. Standart Test Koşulları Altında PV I-V Eğrisi

Tek bir PV modül yükün birkaç çeşidine bağlanmak istenebilir (Şekil 2.20). Örneğin yük bir DA pompa motoru veya batarya olabilir. Yük bağlanmadan önce, PV panel güneş ışığının altındaysa açık devre gerilimi V_{oc} üretilcektir, fakat akım akmayacaktır. Eğer modülün terminalleri kısa devre edilirse, kısa devre akımı I_{sc} akacaktır, fakat çıkış gerilimi 0 olacaktır. Güç akım ve gerilimin üretilmesi olduğu için iki durumda da güç modül tarafından üretilmeyecektir. Yük bağlandığı zaman, akım ve gerilimin birçok kombinasyonu oluşacak ve güç sağlanacaktır. Gücün ne kadar çok olduğunu hesaplamak için yükün I-V karakteristiği kadar modülün akım gerilim karakteristiği de göz önüne alınmak zorundadır.



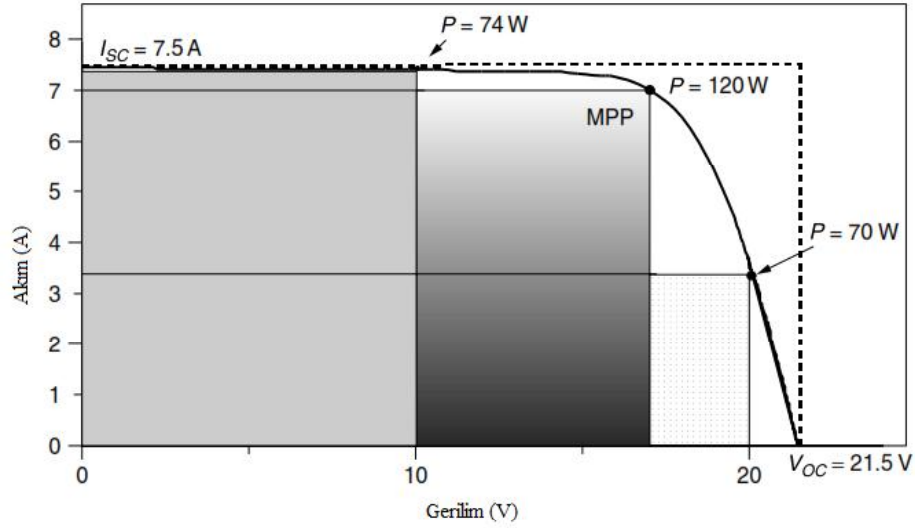
Şekil 2.20. Açık devre (a), kısa devre (b) ve yüke bağlı olma durumu (c) [2]

Şekil 2.21 PV modül için açık devre gerilimi V_{oc} ve kısa devre akımı I_{sc} 'nin de içinde yer aldığı birkaç anahtar parametreyi içeren genel I-V eğrisini göstermektedir. Gösterilen grafikte hem gerilim hem de akım üretilmektedir, yani modülden güç sağlanmaktadır. I-V eğrisinin son iki noktasında, akım veya gerilimin her biri sıfır olduğu için çıkış gücü de sıfır olacaktır. MGN akım ve gerilim üretiminin maksimuma ulaştığı I-V eğrisinin diz noktasıdır. MGN' de gerilim ve akım genelde V_m ve I_m olarak sembolize edilmektedir ve ideal test durumlarının karşılığı olan özel koşullar altında V_R ve I_R (orantılı gerilim ve orantılı akım) olarak sembolize edilmektedir [2].



Şekil 2.21. PV modülün çıkış gücü ve I-V eğrisi [2]

MGN' nın konumunu göz önüne getirmenin başka bir yolu I-V eğrisinin altındaki uygun olacak mümkün olan en büyük dikdörtgeni bulmayı görsel olarak denemektir. I-V eğrisinin karşılığı olan dikdörtgenin kenarları Şekil 2.22' de gösterilmektedir. Bu dikdörtgenin alanı gücü ifade etmektedir. Modül performansını karakterize eden başka bir nicelik dolum faktörü (FF- fill factor)' dür. Dolum faktörü V_{oc} ve I_{sc} ' yi üretmek için MGN' de gücün oranıdır, böylece FF Şekil 2.22' de belirtildiği gibi iki dikdörtgen alanının oranıdır. FF genelde kristal silisyum güneş modülleri için %70-75 civarındadır, çok bölgeli kristal yapısı olmayan silisyum modüller (Multijunction Amorphous-Si Modules) için %50-60' a yakındır [2].



Şekil 2.22. MGN, I-V eğrisinin altındaki uygun en büyük dikdörtgenin karşılığıdır [2]

$$Fill\ Factor\ (FF) = \frac{MGN\ 'deki\ güç}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_R \cdot I_R}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.17)$$

2.5. I-V Eğrilerinde Gölgeleme Etkileri

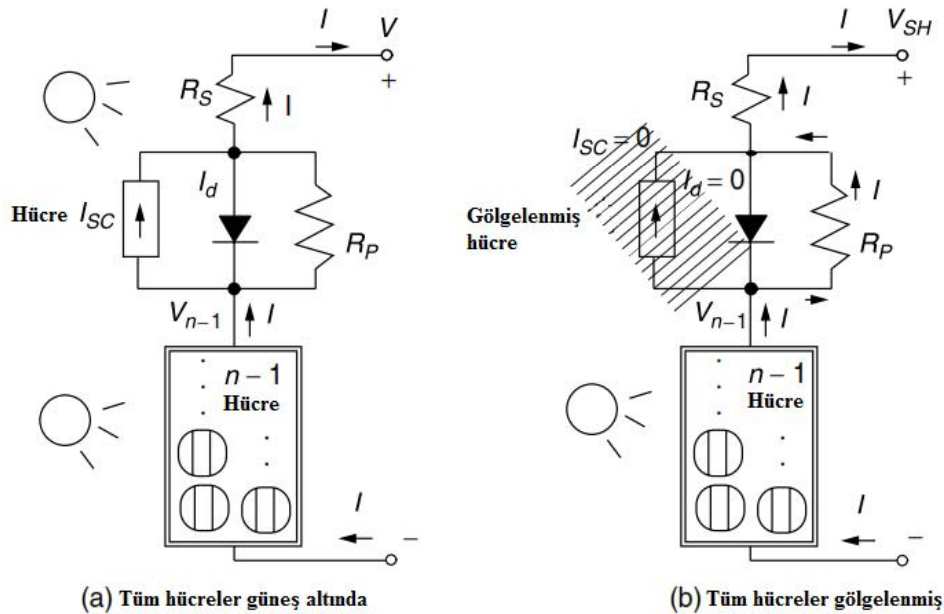
PV modülün küçük bir kısmı bile gölgelemeye maruz kaldığında çıkışı önemli şekilde düşmektedir. Gölgeleme problemlerini telafi edebilmek için özel bir çaba sarf edilmezse, uzun hücre dizilerindeki tek bir gölgelemiş hücre bile yarıdan daha fazla çıkış gücünü azaltabilir. PV üreticisi veya sistem tasarımcısı tarafından eklenmesi önerilen harici diyotlar PV performansını korumaya yardım edebilir. Diyotların asıl amacı PV I-V

eğrilerindeki gölgelenme etkilerini azaltmaktır. Bu diyotlar modüllere veya bir modülün içindeki hücre bloklarına paralel olarak yerleştirilir [2].

2.5.1. Gölgelemenin İncelenmesi

Gölgeleme olayının öneminin anlaşılmasına yardım etmesi amacıyla n -hücreli modülün I akımı ve V çıkış gerilimi ile değerlendirildiği Şekil 2.23' de devrede bir hücre diğerlerinden ayrılarak gösterilmektedir. Bu hücrenin eşdeğer devresi Şekil 2.13 kullanılarak elde edilmiştir. Diğer $(n-1)$ hücre akımı I ve çıkış gerilimi V_{n-1} olarak gösterilmektedir.

Şekil 2.23 (a)' da tüm hücreler güneşlenme altındadır ve seri bağlı oldukları için, aynı akım I her birinden akar. Şekil 2.23 (b)' de en üstteki hücre gölgelenmiştir ve akım kaynağı I_{sc} 0' a düşmüştür. Diyot ters biaslanmış olmasına rağmen R_p boyunca akım akışından dolayı gerilim düşer, böylece diyot akımı da aslında 0' dır. Yük yolu üzerindeki gölgelenmiş hücredeki R_p ve R_s dirençlerinin ikisinin üzerinden tüm akım akmak zorundadır. Yani en üstteki hücre çıkış gerilimine ekleneceği yerde aslında çıkış gerilimini düşürmektedir.



Şekil 2.23. En üstteki hücrenin de içinde yer aldığı n hücreli bir modül (a)' da güneşlenmede ve (b)' de gölgelenmede [2]

Altındaki n-1 hücre hala tam güneşlenmededir ve hala asıl I akımlarını taşımaktadır. Böylece asıl gerilimleri V_{n-1} i üreteceklerdir. Bunun anlamı bir hücrenin gölgelenmesi ile tüm modülde V_{SH} çıkış geriliminin düşeceğiğidir.

$$V_{SH} = V_{n-1} - I(R_P + R_S) \quad (2.18)$$

Güneşlenmede ve akım taşıyan n hücre ile çıkış gerilimi V idi. Böylece altındaki n-1 hücre için çıkış gerilimi:

$$V_{n-1} = \left(\frac{n-1}{n}\right) V \quad (2.19)$$

Denklem (2.18) ve (2.19) birleştirilirse aşağıdaki

$$V_{SH} = \left(\frac{n-1}{n}\right) V - I(R_P + R_S) \quad (2.20)$$

ifade elde edilir. Herhangi bir verilen akımda ΔV gerilimdeki düşüş aşağıdaki gibi ifade edilir:

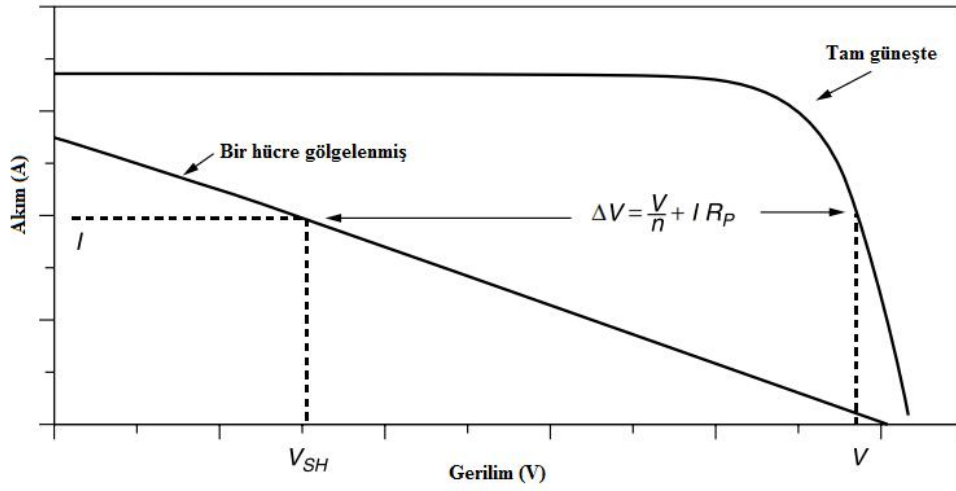
$$\Delta V = V - V_{SH} = V - \left(1 - \frac{1}{n}\right) V + I(R_P + R_S) \quad (2.21)$$

$$\Delta V = \frac{V}{n} + I(R_P + R_S) \quad (2.22)$$

Paralel direnç R_P seri direnç R_S ’ den çok büyük olduğu için, (2.22) basitleştirilir:

$$\Delta V \cong \frac{V}{n} + IR_P \quad (2.23)$$

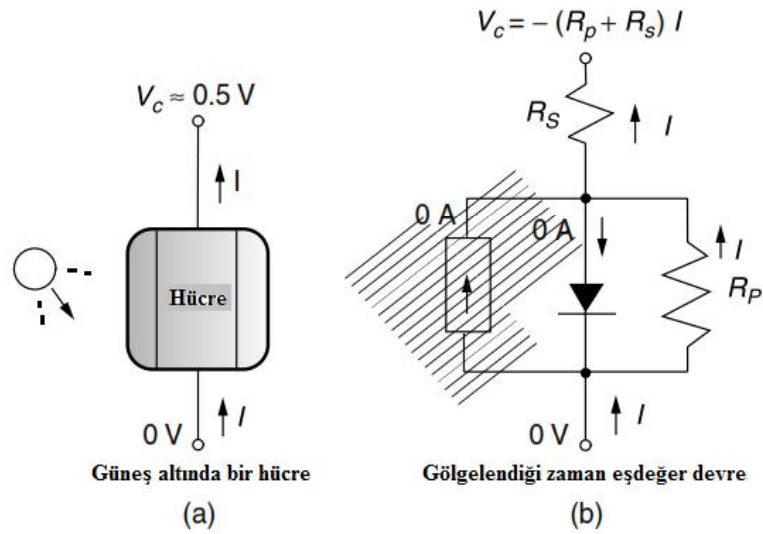
Herhangi bir verilen akımda, bir gölgelenmiş hücreye sahip modül için I-V eğrisi ΔV kadar düşer. Bunu büyük etkisi Şekil 2.24’ de açıklanmaktadır [2].



Şekil 2.24. n hücreli bir modüldeki gölgelenmiş bir hücrenin etkisi [2]

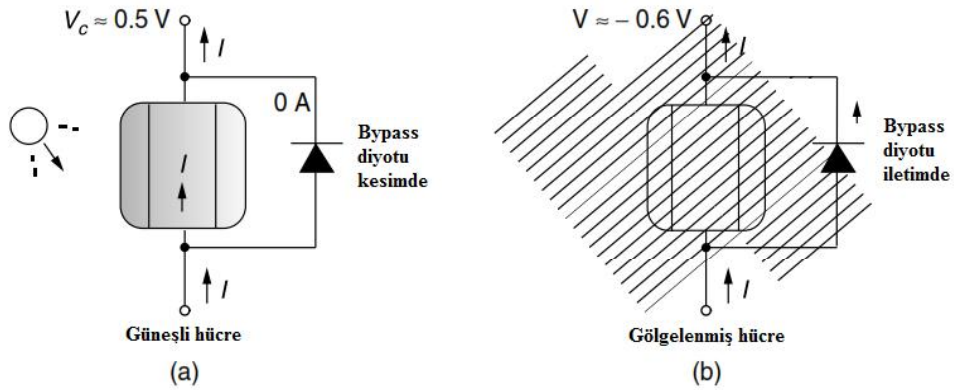
2.5.2. Gölgelemenin Etkisini Azaltmak İçin Bypass Diyotları

Şekil 2.25' de tipik bir durum gösterilmektedir. Şekil 2.25' de modülün çıkış gerilimine yaklaşık 0.5V normal değer aralığı içinde, tam güneşlenmede çalışmaktadır, fakat Şekil 2.25 (b)' de gösterilen gölgelenmiş bir hücrenin eşdeğer devresinde, paralel ve seri dirençler boyunca akımın akmasıyla gerilimin düşüşüyle karşılaşmıştır. Bu düşüş önemlidir.



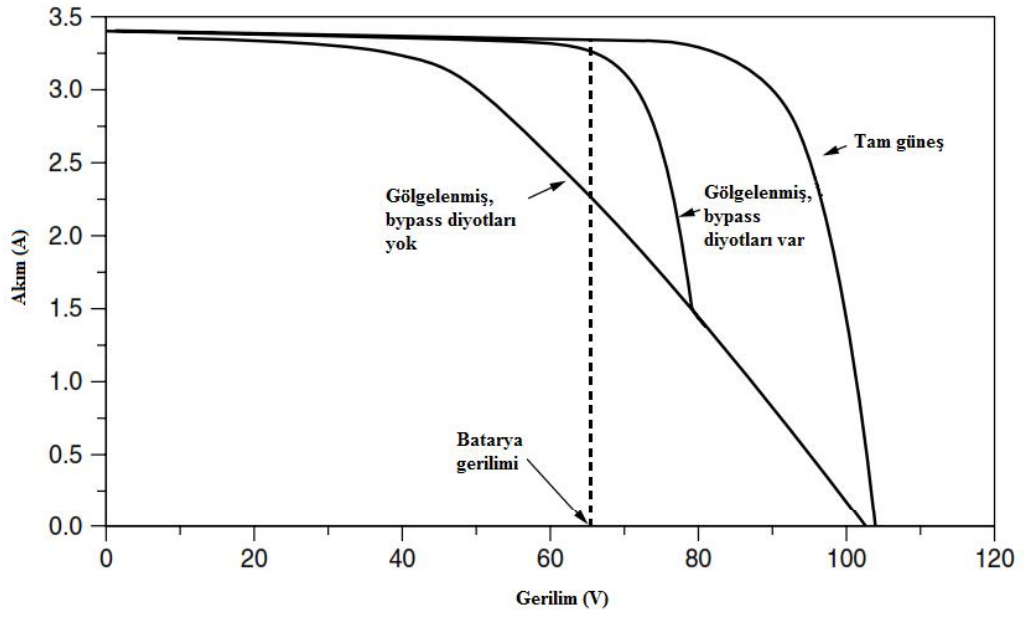
Şekil 2.25. Tam güneşlenmedeki bir hücre (a) ve gölgelenme durumundaki bir hücre (b) [2]

Gölgelenmiş hücredeki gerilim düşümü problemi Şekil 2.26' da gösterildiği gibi her bir hücre boyunca bypass diyotlarının eklenmesiyle düzeltilebilir. Hücre güneşlenmedeyken, hücre boyunca gerilimde yükselme vardır, böylece bypass diyotu kesimdedir ve üzerinden akım akmaz. Hücre gölgelendiği zaman, eğer herhangi bir akımı ileten hücre diyot boyunca akım ayrılıp bypass diyotundan devresini tamamlıyorsa gerilimde düşüş oluşur. Bypass diyotu iletimdeyken gerilim yaklaşık 0.6V düşer. Böylece, bypass diyotu gölgelenmiş hücre boyunca gerilim düşümünü kontrol eder, bypass diyotu olmadığında oluşacak büyük bir düşüşün yerine kabul edilebilir bir 0.6V' luk düşüşle gerilim düşümü sınırlanır.



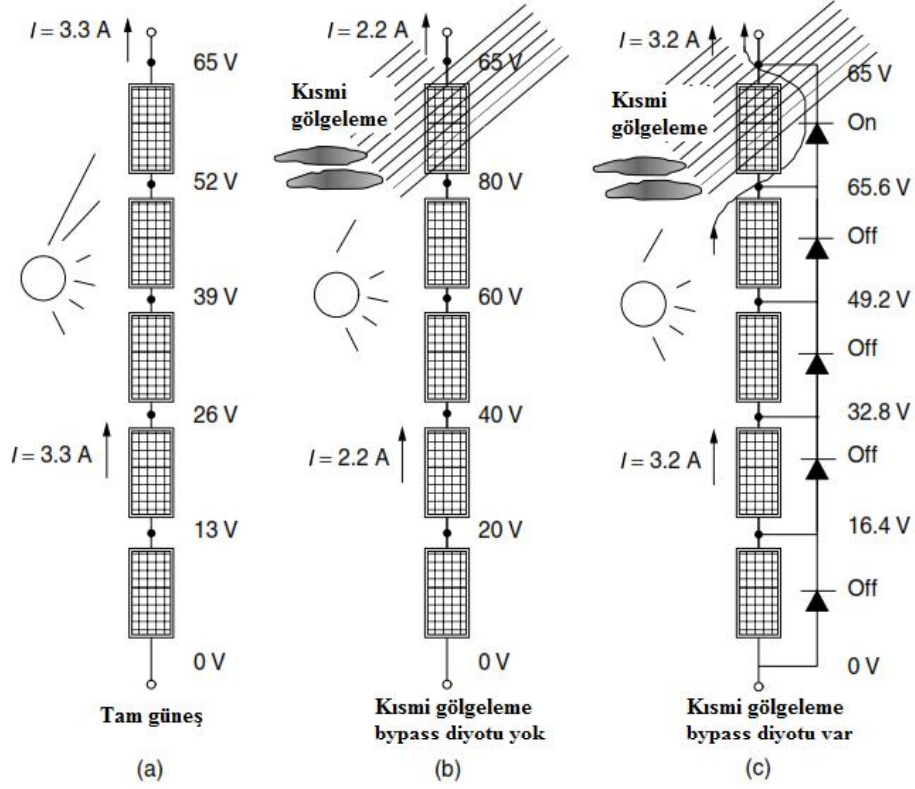
Şekil 2.26. Bypass diyotunun gölgelenme problemine etkisi [2]

Bypass diyotunun nasıl modüller ile paralel bağlanacağını görmek için 5 modülün paralel dizilimi için I-V eğrilerini gösteren Şekil 2.27' ye dikkat edilmesinin yararı olabilir. Grafik modülün tamamıyla gölgelendiği zamanki I-V eğrisi kadar tam güneşlenme altındaki modülünde I-V eğrisini göstermektedir. PV' lerin bataryaya yaklaşık 60-65V gerilimde şarj akımı sağlamaktadır. Görüldüğü gibi tam güneşlenmede yaklaşık 3.3A bataryaya sağlanmaktadır. Ancak, modül gölgelendiği zaman akım yaklaşık üçte biri kadar düşerek 2.2A olmuştur. Gölgelenmiş modüldeki bypass diyotu ile I-V eğrisi Şekil 2.27' de gösterildiği gibi önemli şekilde iyileştirilmiştir.



Şekil 2.27. Bypass diyotun etkisi [2]

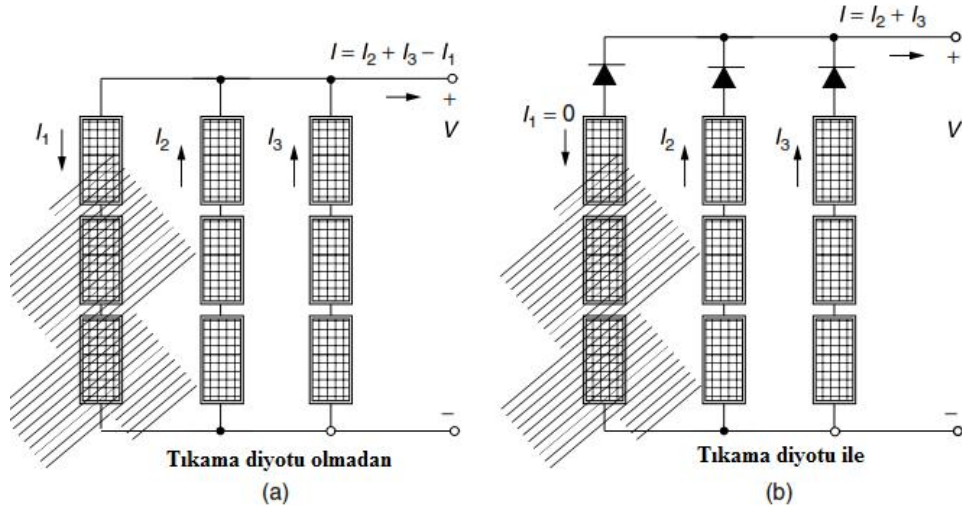
Şekil 2.28 bypass diyotunun görevini nasıl yaptığını açıklamamıza yardım eder. Seri bağlı 5 modül 65V' da çalışmak için modülü zorlayan bir bataryaya bağlıdır. Tam güneşte modüller 65V' da 3.3A akım sağlar. Hücrelerden herhangi biri gölgelendiği zaman, gerilim üretimi durur ve gerilim düşümüne yol açacak olan direnç gibi hareket etmeye başlar. Akımı ayırmak için bypass diyotu olmazsa, gölgelenen modül gerilim kaybeder ve diğer modüller gerilim artışıyla bu gerilim düşümünü telafi etmeye çalışır, fakat akım etkilenecek düşer. Eğer Şekil 2.28 (c)' de gösterildiği gibi bypass diyotunun eklenmesiyle, akım gölgelenmiş modül etrafından geçecek ve gölgelenme oluşmadan önceki seviyeye yaklaşmak için sıçrayacaktır [2].



Şekil 2.28. Modüller 65V' luk bir bataryayı şarj ederken, gölgelemenin etkisini azaltmada bypass diyotunun etkisini göstermektedir [2]

2.5.3. Tıkama Diyotu

Bypass diyotu bir dizilim içindeki modülün gölgelenmesinde veya görevini yerine getirememesi durumunda akımın etrafından akmasına yardım eder. Bu yalnızca dizi performansını geliştirmez aynı zaman da tek gölgelenmiş hücreye sahip olan sorunlu bölgenin gelişmesini önler. Modülün sıraları paralel şekilde bağlandığı zaman, sıralardan biri iyi işlemezse benzer bir problem ortaya çıkar. Diziye akım sağlamak yerine, işlevini yerine getiremeyen veya gölgelenmiş sıra dizide üretilen akımı azaltıcı bir ters akım oluşturabilir. Şekil 2.29' da gösterildiği gibi her sıranın üstüne yerleştirilen tıkama diyotuyla (izolasyon diyotları olarak da adlandırılırlar) gölgelenmiş sıranın çektiği ters akımı önleyebilir [2].



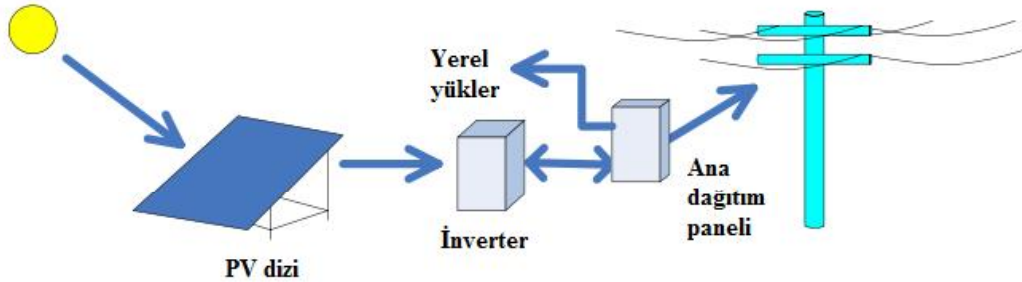
Şekil 2.29. Tıkama diyotunun görevini yerine getirmeyen veya gölgelenmiş sıradan ters yönde akacak akımı önlemesi [2]

3. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

PV sistem tasarımları; depolamanın olmadığı şebeke bağlantılı, depolama sahip şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısının olmadığı sistemleri içermektedir.

3.1. Depolamasız Şebeke Bağlantılı Sistem

Batarya içermeyen şebeke bağlantılı sistemin çoğu elemanı Şekil 3.1’ de gösterilmektedir. İnverter basitçe dizinin çalıştığı gerilimi ayarlar veya daha yaygın bir ifade ile dizi için en iyi çalışma geriliminin tanımlandığı MGN izleme görevini yerine getirir. İnverter şebeke ile aynı fazda çalışır ve gün ışığından elde edilebilecek olabildiğince fazla elektriksel gücü şebekeye aktarır. İnverter akım kaynağı olarak çalışır, sinüzoidal çıkış akımı üretir fakat herhangi bir yolla çıkış gerilimini düzenleyecek şekilde hareket etmez.



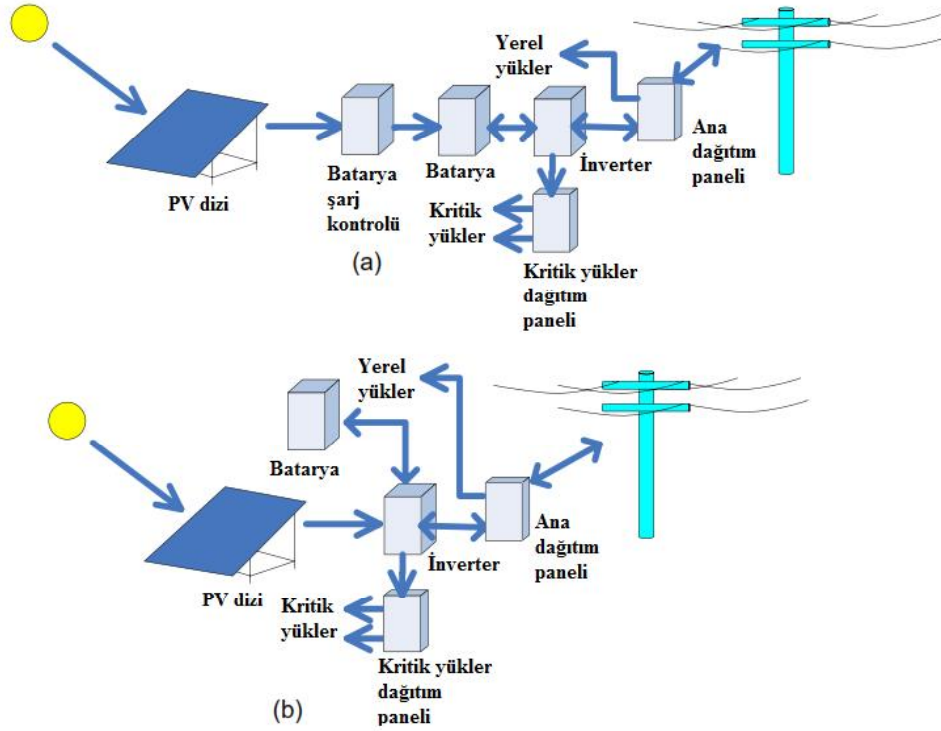
Şekil 3.1. Bataryaya sahip olmayan şebeke bağlantılı PV güç sistemi [4]

Şebeke bağlantısı dağıtım panelindeki devre açıcıya bağlantıyla veya dağıtım paneli ve sayaç arasındaki bağlantıyla yapılabilir. İki şekilde de PV üretim şebekeden çekilen gücü azaltır ve eğer bağlantı kurallarına uyulursa şebekeye güç akışı sağlar [4].

3.2. Bataryalı Şebeke Bağlantılı Sistem

Şekil 3.2 şebeke bağlantılı PV sistemler ile yaygın olarak bulunan iki temel depolama yapısını göstermektedir. Şekil 3.2 (a)’ da birçok eski sistemde kullanılan ayrı bir batarya şarj kontrol cihazının PV’ den elde edilen gücü toplayıp kontrol ettiği bir yapı gösterilmektedir. Yetersiz PV gücü mevcut olduğu zaman bu dizilim şebekeden yedek

batarya şarj kontrolünü sağlamak için inverteri ayırır, fakat bataryalar tamamıyla şarjlı olduğu zaman şebekeye aktarılacak fazla PV gücü verimli bir şekilde aktarılmasına izin vermez. Şekil 3.2 (b)' de uygun şekilde inverterden bataryaya veya şebekeye uygun yönde olacak PV dizi güç akışına izin veren modern şebeke bağlantılı PV güç sistemlerinin çok daha yaygın olan bir mimarisi gösterilmektedir.



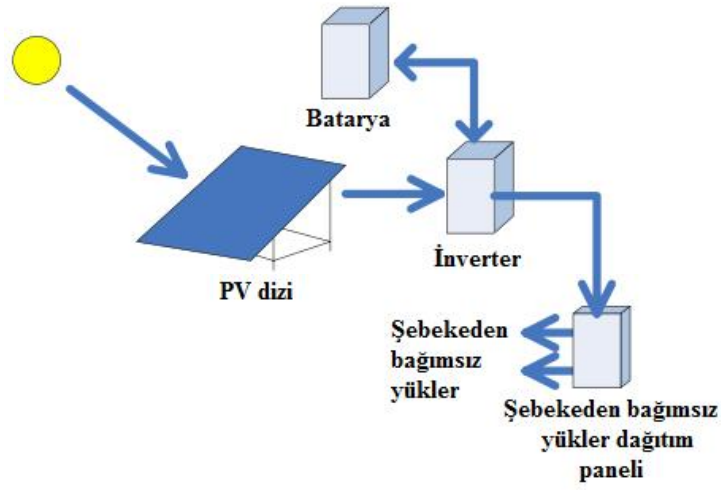
Şekil 3.2. Ayrı PV şarj kontrolü ve inverter şarj kontrolünün (a) ve birleşik şarj kontrolünün kullanıldığı (b) bataryaya sahip şebeke bağlantılı PV güç sistemi [4]

İki durumda da, batarya şebeke kesintisi olduğu sürece önemli yüklere güç sağlama fırsatını sağlar. Bu özelliğin bataryanın olmadığı sistemlerde sağlanması mümkün değildir.

Sadece şebeke bağlantılı dizilim ile önceden de belirtildiği gibi, PV üretim şebekeden güç alımını azaltır ve bağlantı kurallarına uyulduğu zaman şebekeye güç akışına da izin verebilir [4].

3.3. Bataryalı Şebeke Bağlantısı Olmayan Sistem

Şebeke bağlantısının olmadığı güç sistemleri elektrik veya diğer depolama sistemlerini (tankta su depolama gibi) ve hibrit sistem şeklinde diğer üretim kaynaklarını içerir. Şekil 3.3’ de AA yüklere sahip, ek bir generatörün olmadığı, elektriksel depolamaya sahip şebeke bağlantısı olmayan bir güç sisteminin çoğu birleşeni gösterilmektedir. Bu tip bir sistemde, enerji depolama kapasitesinin doğru şekilde boyutlandırılması önemli bir faktördür.



Şekil 3.3. Bataryaya sahip şebeke bağlantısının olmadığı PV sistem [4]

Bu sistem konfigürasyonunda, inverter şebeke bağlantılı sistemlere karşıt olarak bir gerilim kaynağı olarak hareket eder [4].

4. GÜNEŞ İZLEYİCİ SİSTEMLERİ

PV modül ayçiçeği gibi güneşi takip eden bir güneş izleyici sistem üzerine kurulmuşsa, günün sonuna kadar daha fazla enerji üretilir [5]. Güneş izleyici sistemleri güneş enerjisi uygulamalarının geliştirilmesinde, özellikle güneş enerjisinin termal veya elektrik enerjisine direkt olarak dönüştüren yüksek solar yoğunlaşmalı sistemlerde önemli rol oynamaktadır. Güneş izleme doğruluğunun yüksek bir seviyede olması güneş panellerinin gün boyunca maksimum güneş enerjisini üretebilme kapasitesinde olmasını sağlamaktadır.

Güneş izleme doğruluğunu yüksek derecede gerçekleştirilmesi amacıyla, güneş izleyici sistemleri alıcıdan sürekli olarak alınan maksimum güneş ışınları için kontrol sistemine hata sinyali geri beslemesinin yapılmasında sensörleri kullanmaktadır. Son yirmi yıldan fazladır, çeşitli stratejiler önerilmekte ve bunlar açık döngü, kapalı döngü ve hibrit güneş izleyici olmak üzere 3 kategoride sınıflandırılmaktadır. Açık döngü izleme yaklaşımında, kontrol programı güneşe doğru panellerin hareket etmesi için özel güneş izleme formüllerini kullanarak güneşin yörüngesini belirlemek amacıyla hesaplamalar gerçekleştirecektir. Açık döngü, sensörleri izleme eksenindeki dönme açısını belirlemek ve panellerin doğru açıda konumlanmasını garantilemek için kullanılmaktadır. Diğer taraftan kapalı döngü güneş izlemede, panellerin her zaman güneşi izleyebilmesi için paneller normal olarak geri besleme sinyali şeklinde kapalı döngü sensöre düşen güneş ışınlarını algılayacaktır. Yukarıdaki seçeneklerin yerine, birçok araştırmacı iyi bir izleme doğruluğu için açık döngü ve kapalı döngü sensörlerin ikisini de içeren hibrit bir sistem tasarlamıştır. Yukarıda ifade edilen izleme metotları güneşin pozisyonunu izleyebilmek için mikrokontrolöre dayanan kontrol sistemi veya PC tabanlı kontrol sistemiyle gerçekleştirilebilir.

Azimuth-elevation ve tilt-roll izleme mekanizmaları her zaman güneşe doğru güneş panellerini yönlendirmek için çok yaygın kullanılan güneş izleme metotları arasındadır. Bu iki güneş izleme metodunun her biri özel güneş izleme formüllerine sahiptir. Genel güneş izleme formülleri sadece matematiksel çözümler sunmaz, aynı zamanda güneş panellerinin kurulum hatalarının yakalanmasıyla güneş izleme doğruluğu geliştirilir. Güneş panellerinin kurulumu süresince kurulum sıralarının doğru olması gerekmektedir. Güneş izleme eksenlerindeki yanlış bir dizilim genel güneş izleyici formüllerindeki parametre değerlerindeki değişimle kolayca telafi edilebilir. Açık döngü güneş izleme sistemlerindeki yeni genel formüllerin birleştirilmesiyle, bu yöntem izleme doğruluğunda önemli bir

gelişmeyle güneş panellerinin kurulum hatalarının iyileştirilmesinde önemli bir yol olarak tanımlanabilir [6].

4.1. Güneş İzleme Yaklaşımları

İyi bir güneş izleyici sistemi güvenilir olmalıdır ve havanın kapalı olduğu zamanlarda bile doğru bir açıyla güneşi izleyebilmelidir. Son yirmi yılda, güneş izleyici mekanizmalarının değişen tipleri PV panellerin güneş enerjisi üretim performansını arttırdı.

Bu bölümde, konuyla ilgili birçok örnekle güneş izleme algoritmalarının başlıca 3 sınıfı tekrar gözden geçirilmektedir. Kapalı döngü güneş izleme yaklaşımı için, CCD sensör veya fotodiyot sensör gibi değişen aktif sensörler güneşin pozisyonunu algılamak için kullanılırlar ve eğer güneş sensörden uzağa hareket ederse kontrolöre geri besleme sinyali üretilir. Aktif sensörlerin kullanıldığı güneş izleyici sistemleri kapalı döngü güneş izleyici olarak da bilinir. Kapalı döngü izleyici sisteminin performansı hava durumu ve çevresel faktörlerden kolayca etkilenmesine rağmen, diğer güneş izleyicilere göre maliyet, zaman ve başarı kazanımları göz önüne alınmalıdır. Ek olarak, bu metot hava durumunun iyi olduğu süre boyunca birkaç mili-radian (mrad) aralığındaki izleme doğruluğunu gerçekleştirebilir. Bu sebeple kapalı döngü izleme yaklaşımı gelenekse olarak son yirmi yıldan fazladır aktif güneş izleme görevlerinde kullanılmaktadır.

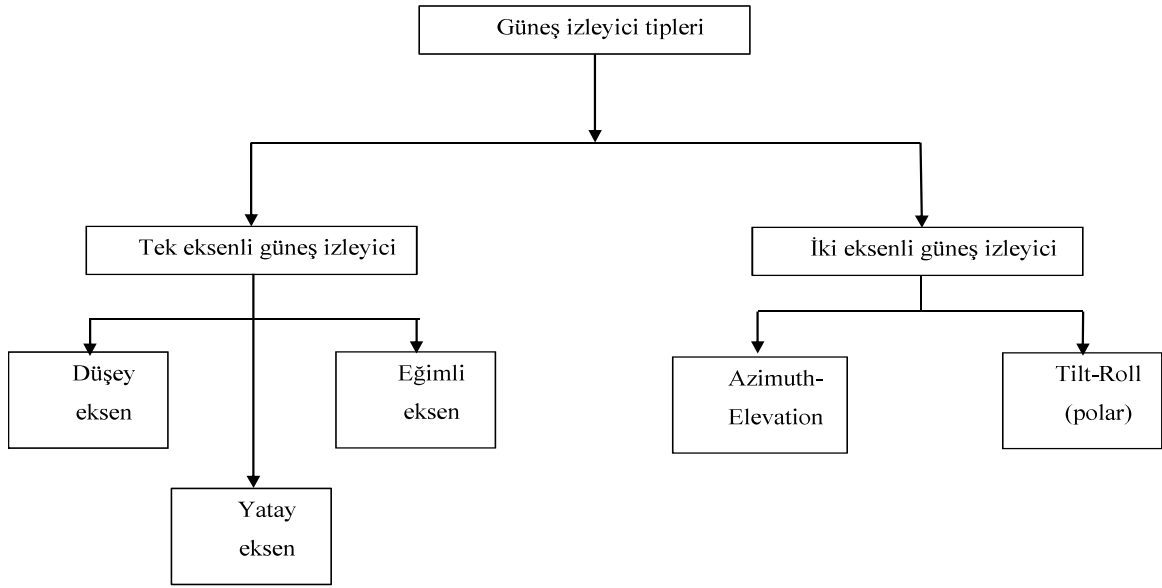
Kapalı döngü güneş izleme sistemi çok iyi bir izleme doğruluğu sağlamasına rağmen, bu tip bir sistem sensör gölgelendiği veya hava bulutlandığı zaman geri besleme sinyalini kaybedecektir. Sonuç olarak güneşi izlemeyi de kaybedecektir. Kapalı döngü güneş izlemenin sınırlamalarının üstesinden gelecek alternatif bir metot olarak, açık döngü güneş izleyici sistemleri geri besleme gibi herhangi bir güneş görüntüsüne ihtiyaç duyulmadığı açık döngü sistem sunmaktadır. Güneş panellerinin özel formüller veya algoritmalar kullanılarak hesaplanan açılara göre konumlandırılmasını açık döngü sistem sağlayacaktır. Güneşin azimuth ve elevation açılarını, verilen tarih, zaman ve coğrafi bilgiler kullanılarak formül veya algoritmalar yardımıyla belirlenir. Bu izleme yaklaşımıyla, dizilim çalışmasının mükemmel bir şekilde yapılmasıyla birlikte mekanik yapı tam olarak yapıldığı zaman $\pm 0.2^\circ$ izleme hatası gerçekleştirecektir. Genellikle bu algoritmalar, mikroişlemciye veya bilgisayara dayanan kontrolör içine yerleştirilmektedir.

Genelde, yukarıdaki güneş izleme yaklaşımlarının ikisi de bahsedilen etkinlik ve sakıncalara sahiptir, bu nedenle yüksek izleme doğruluğu elde etmek amacıyla açık döngü ve kapalı döngü sistemlerin ikisini de içeren birçok hibrit güneş izleyici sistemi tasarlanmıştır [6].

4.2. Güneş İzleyici Tipleri

Tüm güneş izleyici metotları incelendiğinde, güneş izleyicilerin tek eksenli ve çift eksenli olmak üzere iki gruba ayrıldığı görülmektedir [6]. Tek eksenli izleyici sistemleri önemli derecede ucuzdur ve kurulumu kolaydır, fakat verimleri iki eksenli izleyici sistemlerinden oldukça düşüktür [7]. İki eksenli, dikey eksenli, doğu-batı eksenli, kuzey-güney eksenli güneş izleyici sistemleri kuzeye 32° eğimli sabit yüzeyli fotovoltaik sistemle karşılaştırıldığında sırayla %43.87, %37.53, %34.43 ve %15.69 civarında fotovoltaik sistemin elektriksel çıkış gücünde artış sağladığı görülmektedir [8]. Şekil 4.1, tüm güneş izleyici tiplerini göstermektedir. Güneşten gelen ışınları, eksen etrafında dönerek toplayacak şekilde sistem çalışır. Yaygın olarak bilinen üç tip güneş izleyici vardır:

- 1) **Yatay Eksen İzleyici:** İzleme eksenini yeryüzü yüzeyine paralel kalmaktadır ve doğu-batı veya kuzey-güney yönlerinde yönlendirilmektedir.
- 2) **Eğimli Eksen İzleyici:** İzleme eksenleri kuzey-güney yönü boyunca yönlendirilen sabit bir açıyla yataydan eğilme ile güneş izleme gerçekleştirilir, örneğin enlem eğimli eksen güneş izleyici (latitude-tilted-axis sun tracker)
- 3) **Düşey Eksen İzleyici:** İzleme eksenini zenith eksenine ile paraleldir ve azimuth güneş izleyici olarak da bilinir.



Şekil 4.1. Güneş izleyici tipleri [6]

Azimuth-elevation ve tilt-roll (veya polar) güneş izleyici çeşitli güneş enerjisi uygulamalarında kullanılan çok popüler iki eksenli güneş izleyicilerdir. Azimuth-elevation güneş izleyici sisteminde, panel azimuth ve elevation eksenleri etrafında serbest olarak dönmek zorundadır. Birincil izleme eksenini veya azimuth eksenini zenit eksenine paraleldir ve elevation eksenini veya ikincil izleme eksenini her zaman yeryüzü yüzeyine paralel, azimuth eksenine de diktir. Alternatif olarak, tilt-roll (veya polar) izleme sistemi güneşin yörüngesinin yıllık olarak değişmesi nedeniyle kollektörün eğim açısının değişimi kadar, sabahdan akşama doğudan güneşin yükselişini ve batıdan batışını takip etmek için paneli hareket etme düşüncesi benimsenmiştir. Böylece tilt-roll izleme sistemi için dönen bir eksen, kutup yıldızını hedefleyen yeryüzü kutup eksenini ile paralel yerleştirilmiştir. Dönen diğer eksen bu polar eksene dikeydir [6].

5. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ METOTLARI

Sıcaklık ve güneş ışığına maruz kalan tüm PV sistemlerde, PV dizinin çıkış gücünün mümkün olduğu kadar fazla olması beklenir. Fakat ısıtım şiddeti ve sıcaklıktaki değişimler çıkış gücünü etkilemektedir. Tüm durumlarda, PV dizinin çıkış gerilimi ve akımı arasında nonlineer bir ilişki vardır. Bu karakteristik, teori ve pratikte PV dizi için MGNT' nin önemini göstermektedir [9].

İyi bir MGNT metodu, en az aşağıda ifade edilen 3 kritere sahip olmalıdır [11]:

- 1) Mühendislik uygulamalarında pratiklik: MGNT stratejilerini gerçekleştirmek sadece araştırmacılar için değil mühendisler içinde çok önemlidir.
- 2) Genel maksimuma hızlı ulaşma ve her zaman doğru yönde izleme: birkaç adımda karmaşık hesaplamalar ve yanlış yönde izleme olmadan genel maksimuma ulaşabilir olması.
- 3) Düşük maliyet ve yüksek verimlilik: basit yapısıyla etkili olmalıdır.

5.1. Önemli MGNT Teknikleri

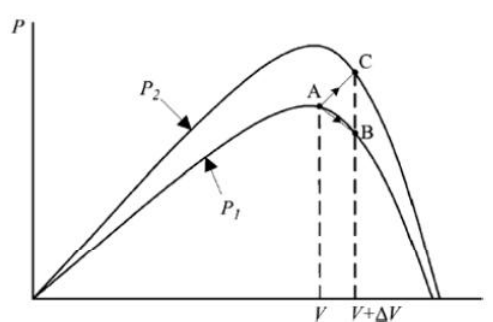
Bu bölümde çok kullanılan, teorik ve pratik olarak uygulanabilirliği yüksek MGNT teknikleri üzerinde durulacaktır. Bu teknikler şunlardır:

- Değiştir ve Gözlemle Metodu (Perturb & Observed Method),
- Geliştirilmiş Değiştir ve Gözlemle Metodu (Modified Perturb & Observed Method),
- Artan İletkenlik Metodu (Incremental Conductance Method),
- Beta Metodu,
- Üç Nokta Gücünü Karşılaştırma Metodu (Three Point Weight Comparison Method),
- Tablo Tarama Metodu,
- Sürekli (On-Line) MGN Arama Algoritması,
- PV Çıkış Algılamasız Kontrol Metodu,
- Değişebilen Adım Boyutlu Artan Direnç Metodu.

5.1.1. Değiştir ve Gözlemle Metodu (D&G)

D&G ve tepe tırmanma metotları aynı temel yöntemi uygulamak için iki farklı yoldur [12]. D&G metodu PV' nin çıkış terminal geriliminin periyodik olarak arttırılması ve azaltılması şeklinde çalışmaktadır. Önceki döngünün gücü ile şimdiki döngüden sağlanan güç karşılaştırılmaktadır. Eğer gerilim değişir ve güç artarsa, kontrol sistemi gerilimin değişimi yönünde çalışma noktasını değiştirir, aksi durumda karşıt yönde çalışma noktası değişir. Akım değişimi için yön bilindiği zaman, akım sabit oranda değişir [13,14,21]. PV dizinin DA/DA dönüştürücüye bağlı olması durumunda, güç dönüştürücünün görev oranını değiştirmek PV dizi akımını değiştirir ve sonuç olarak PV dizi gerilimi değişir [12]. Bu oran sürekli durumdaki düşük dalgalanma ile hızlı yanıt arasındaki uyumu göz önüne alan bir parametredir. Bu algoritmanın çalışma mantığı Şekil 5.1' de sunulmaktadır. Yüksek verimliliğin sonucu olarak, MGN' nin uzaklığına göre adımların değişimi ayarlanabildiği zaman geliştirilmiş bir metot elde edilmektedir. Bu yöntem maksimum güç noktasına ulaşmak için mükemmel bir metottur ve PV panelden bağımsızdır, buna rağmen bu yöntem sıcaklık ve ışıyım şiddetindeki hızlı değişimlerden olumsuz etkilenmektedir [13,23,43,44].

D&G ve tepe tırmanma metotları çalışma noktası A' dan başlayarak yani P_1 eğrisi kullanılarak Şekil 5.1' de örneklendiği gibi hızlı değişen hava şartları altında hatalı olabilir, eğer hava şartları yaklaşık olarak sabit kalabiliyorsa, PV gerilim V ' deki ΔV değişimi çalışma noktasını B noktasına getirecektir ve sonuç olarak değişim güçteki azalma nedeniyle ters olacaktır.



Şekil 5.1. MGN' den tepe tırmanma ve D&G metotlarının uzaklaşması [12]

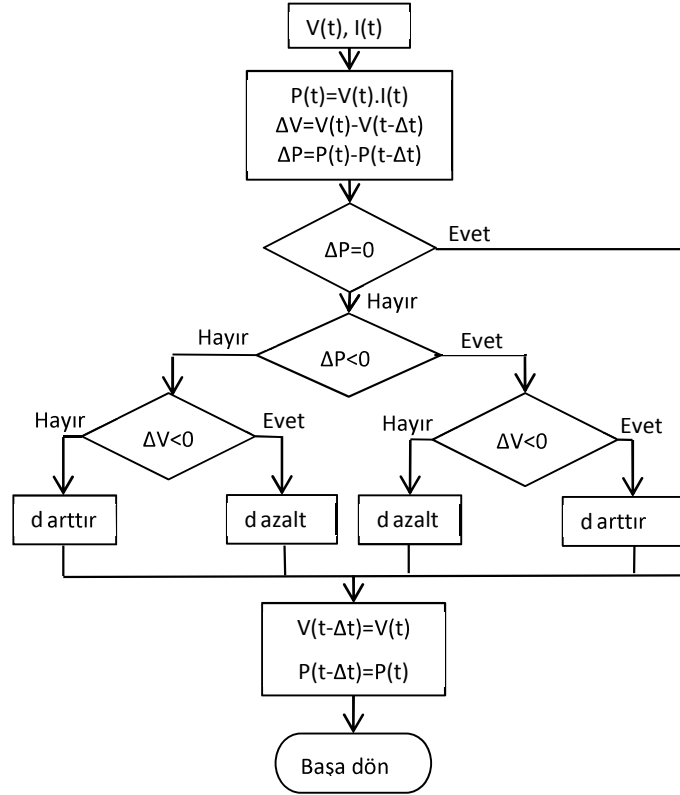
Ancak, eğer ışıyım şiddeti artar ve bir örnekleme periyodu içerisinde P_1 ' den P_2 ' ye güç eğrisi kayarsa, çalışma noktası A noktasından C' ye taşınacaktır. Bu gerilimdeki değişim aynı kalmasına rağmen yeni eğri P_2 nedeniyle güçte bir artış sunmaktadır. Sonuç olarak

Çalışma noktası MGN' den sapar. Eğer ışınım şiddeti sürekli değişirse çalışma noktası, sadece bu MGNT tekniğinde değil, bunun dışında literatürde son zamanlarda yer alan diğer MGNT tekniklerinde de MGN' den sapacaktır [12].

5.1.1.1. D&G metodunun avantaj ve dezavantajları

Bu metot geliştirilen metotlar arasında MGNT tekniklerinin en basitidir [10]. D&G metodu basit bir yapıya ve az sayıda lm parametrelerine sahiptir. Bu metodu geliştirmek ve uygun hale getirmek için birçok yöntem bulunmaktadır. Sürekli değişimle MGN' ye ulaşılır, MGN' ye ulaşılmasına rağmen, MGNT durmayacaktır. Artan iletkenlik metodu ile karşılaştırıldığında, D&G metodunun uygulanması daha kolaydır.

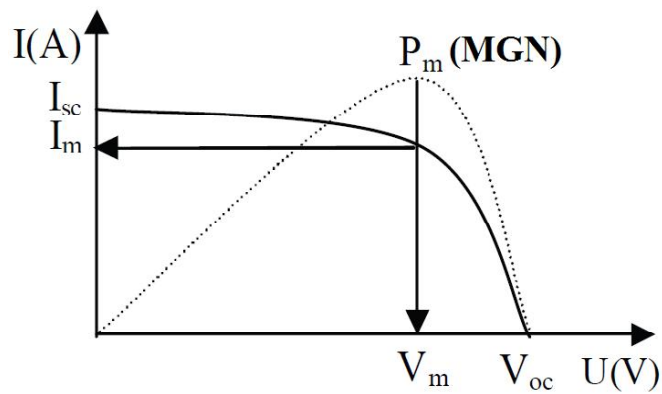
D&G metodu birçok dezavantaja da sahiptir. Değişimler bu metotta başlıca rol oynamak zorundadır. En uygun noktaya gelmenin sonucunda, düşük güç kayıplarıyla MGN' nin yakınında osilasyon yapılacaktır. Ek olarak, yanıt hızı ve izleme doğruluğunun ikisinin de iyi bir durumda olması için izleyici adımlarının belirlenmesi zordur. Eğer adım boyutları çok küçükse, arama yavaşlayacaktır. Eğer adım boyutu büyükse, kolay osilasyona yol açacaktır. Bu metot hızlı değişen hava şartları altında başarısız olabilmektedir [9,10,21].



Şekil 5.2. D&G algoritmasının akış diyagramı [14]

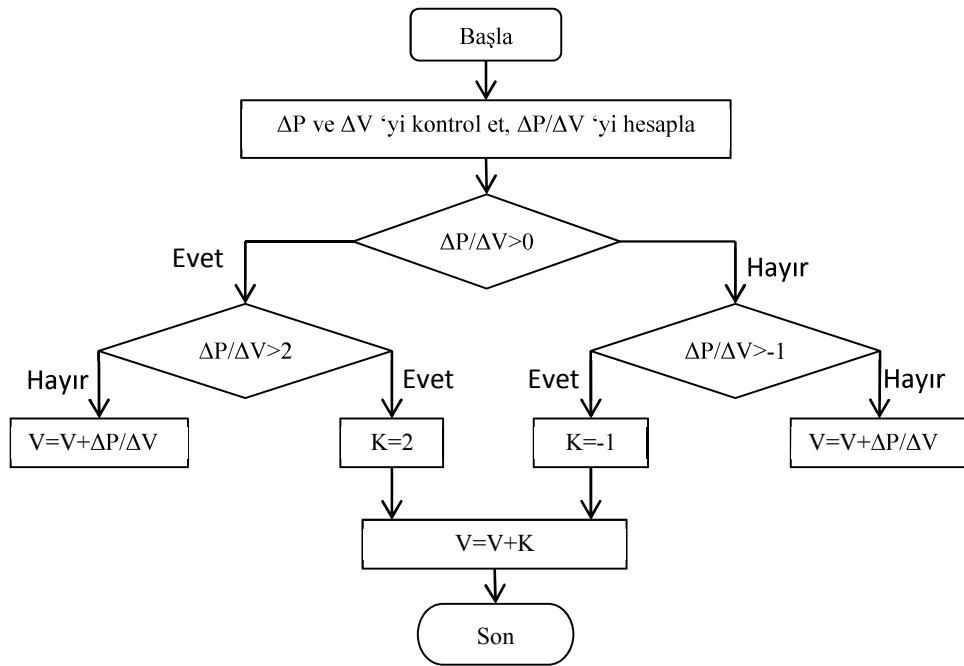
5.1.2. Geliştirilmiş D&G Metodu

D&G metodunun avantajına ve dezavantajına göre ileri bir metodun geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu metodun temel prensibi P' nin V' ye göre değişim oranının belirlenmesi ve çıkış gerilimi için uygun adım olarak dP/dV ' nin kullanılmasıdır. Şekil 5.3 MGN' nin sol tarafında dP/dV ' nin pozitif olduğunu, MGN' nin sağ tarafında dP/dV ' nin negatif olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.3. PV dizinin I-V karakteristik eğrisi [9]

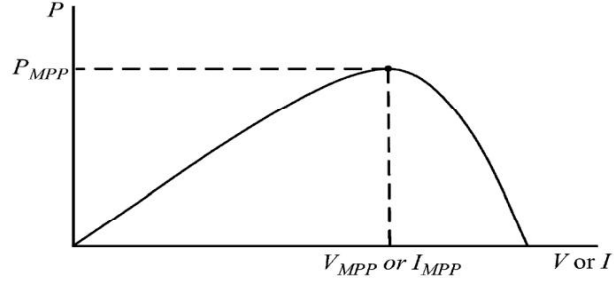
Eğer gerilim değişim miktarının ayarlanmasında adım olarak dP/dV kullanılırsa, gücü arttıracak yönde P ayarlanır. En büyük adım, en hızlı izlemeyi sağlayabilir. MGN' ye ulaşıldığı zaman, eğimin tam değeri küçülmeye başlar, adım büyüklüğü azalır, adım MGN' de en küçük olur ve MGN yanında oluşan osilasyon çok küçük aralıktadır. Bu metot yaygın olan D&G metoduyla karşılaştırıldığında adım belirlemeden dolayı oluşacak zorluğunun üstesinden gelebilir. P-V eğrisinde çıkış karakteristiklerinin, MGN' nin her iki tarafında simetrik olmadığı görülür, böylece aynı gerilimdeki değişimlerin MGN' nin her iki tarafında sebep olduğu güç değişimi çok farklıdır. MGN' nin sağında, aynı gerilim değişiminin sebep olduğu güç değişimi solundakinden daha büyüktür. Bu duruma göre, maksimum değiştirme adımının sol tarafı 2 iken, sağ maksimum değiştirme adımı -1' e ayarlanır. Geliştirilmiş D&G metodunun akış diyagramı Şekil 5.4' de gösterilmektedir [9].



Şekil 5.4. Geliştirilmiş D&G metodunun akış diyagramı [9]

5.1.3. Artan İletkenlik Metodu

Artan iletkenlik metodu MGN' de PV dizi güç eğrisinin eğiminin 0 olmasını gerçekleştirmeye dayanmaktadır. Eğim Şekil 5.5' de görüldüğü gibi MGN' nin solunda pozitif, sağında negatiftir.



Şekil 5.5. Karakteristik PV dizi güç eğrisi [12]

Matematiksel ilişkiler aşağıda gösterilmektedir [12,23]:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{MGN' de} \quad (5.1a)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{MGN' nin solunda} \quad (5.1b)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{MGN' nin sağında} \quad (5.1c)$$

PV dizinin P-V eğrisinden, eğimin maksimum noktada 0 olduğu görülür, böylece formüller aşağıdaki gibidir:

$$P_{max} = V \cdot I \quad (5.2)$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dU} = 0 \quad (5.3)$$

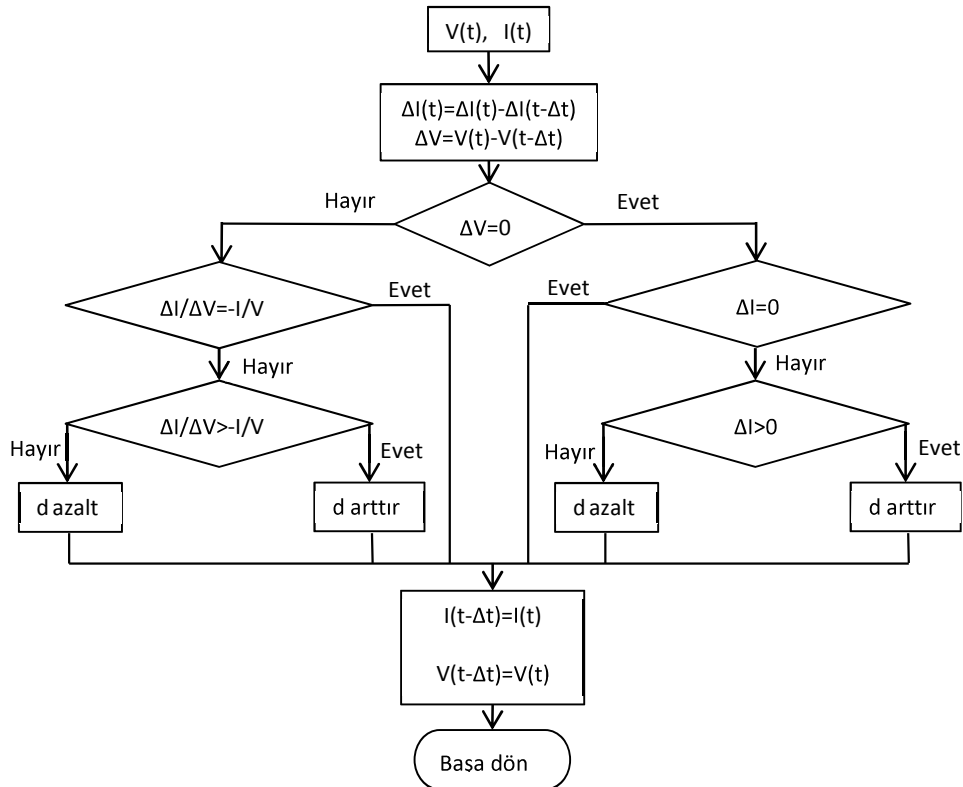
$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (5.4)$$

Denklem (5.4) MGN' ye ulaşma durumudur, çıkış iletkenliğinin değişimi çıkış iletkenliğinin negatifine eşit olduğu zaman, dizi maksimum güç noktasında çalışacaktır. Artan iletkenlik metodunun akış diyagramı Şekil 5.6' da gösterildiği gibi olacaktır. Burada akım ve gerilimin şimdiki değerleri okunur. Şimdiki değerler ile önceki değerler karşılaştırılır. Sonra gerilimin değişiminin 0 olup olmadığı belirlenir, gerilimin değişiminin 0 olmasına göre akımın değişiminin 0 olduğu veya olmadığı belirlenir. Eğer ikisi 0 ise empedansın aynı değerde kaldığı ve V_{ref} değerinin önceki ile benzer kalacağı görülecektir. Gerilimin türevi sıfırsa fakat akımın değişimi 0 değilse, ışıyım şiddetinin değiştiği görülür.

Akım değerinin değişimi 0' dan büyük olduğu zaman V_{ref} artacaktır; akım değerinin değişimi 0' dan küçük olduğu zaman V_{ref} azalacaktır [9]. V_{ref} , PV diziyi çalışması için zorlayan referans gerilimdir ve MGN' de V_{ref} , V_{MPP} değerine eşittir [12]. Gerilimin değişimi 0 değilse, denklem (5.4)' ün sağlanıp sağlanmadığına bakılır. Denklem (5.4) sağlandığı zaman, güç eğrisinin eğimi 0 olacaktır, bundan sonra sistemin maksimum güç noktasına ulaştığı anlaşılır. Eğer, iletkenlik değişimi negatif iletkenlik değerinden büyükse, güç eğrisinin eğiminin pozitif olduğu ve V_{ref} ' in artacağı anlaşılır, aksi durumda V_{ref} azalacaktır [9,23].

Artan iletkenlik metodu Şekil 5.5' de gösterildiği gibi MGN' de 0 ($dP/dV=0$), solda pozitif, sağda negatiftir. Bu metot D&G ile benzer yolla MGN' ye ulaşır ve geliştirilmiş bir metot karakteristiğindedir, fakat hava şartlarındaki hızlı geçiş durumlardan zarar görmez.

Artan iletkenlik metodu D&G metodu gibi PV' nin akım ve geriliminin ikisini izlemeye ihtiyaç duyar, ancak PV gücünü hesaplamak zorunlu değildir. Artan iletkenlik algoritmasının akış diyagramı Şekil 5.6' da gösterilmektedir [13].



Şekil 5.6. Artan iletkenlik metodu akış diyagramı [12]

5.1.3.1. Artan iletkenlik metodunun avantaj ve dezavantajları

Artan iletkenlik metodu birçok avantaja sahiptir. PV dizinin aldığı ışıının şiddeti değiştiği zaman, çıkış gücü düzgün bir şekilde değişimi takip edebilir. Çıkış güç osilasyonunun sabit durumda tekrarlanması önlenir. Gerilim dalgalanması küçüktür. Osilasyonu azaltmak için teknik değiştirilebilir. D&G metodu ile karşılaştırıldığında, gerilim dalgalanması düşüktür, böylece metot hızlı hava durumu değişimleri için uygundur.

Artan iletkenlik metodu birçok dezavantaja da sahiptir. İlk olarak bu algoritma çok karışıktır ve sensörün doğruluğu özellikle donanıma çokça bağlı olduğu için mikroişlemci ile kontrolünde birçok zorluklar olacağından A/D dönüşümü sağlamak çok zaman alacaktır. Ek olarak, sistemin tüm parçalarının yanıt hızının yüksek olması gereklidir. Diğer taraftan artan iletkenlik metodu adım ve eşik belirlemede birçok zorluğa sahiptir. Adımın boyutu izleme hızı belirleyecektir. Adım boyutu büyük ve sistem hızlıca yanıt verdiği zaman, sistem gerçek maksimum güç noktasında çalışmayabilir ve maksimum güç noktası etrafında dalgalanma oluşacaktır. Pratikte artan iletkenlik metodu için uygun bir V_{ref} gereklidir ve

$$\frac{dP}{dV} = \pm V_{ref} \quad (5.5)$$

olduğu zaman, sistem maksimum güç noktası etrafında çalışacaktır. Değişim referans geriliminden küçük olduğu zaman, gerilim aynı kalacaktır. Teoride, V_{ref} küçükse, son çalışma noktası maksimum güç noktasına yakındır, fakat eğer referans gerilimi çok küçük seçilirse sistem sabit duruma ulaşamaz [9,23].

5.1.4. Beta Metodu

Beta metodu, değişen β eşitliği yoluyla MGNT' yi gerçekleştirir. β ışıının şiddetinden bağımsızdır, fakat sıcaklığa bağımlıdır.

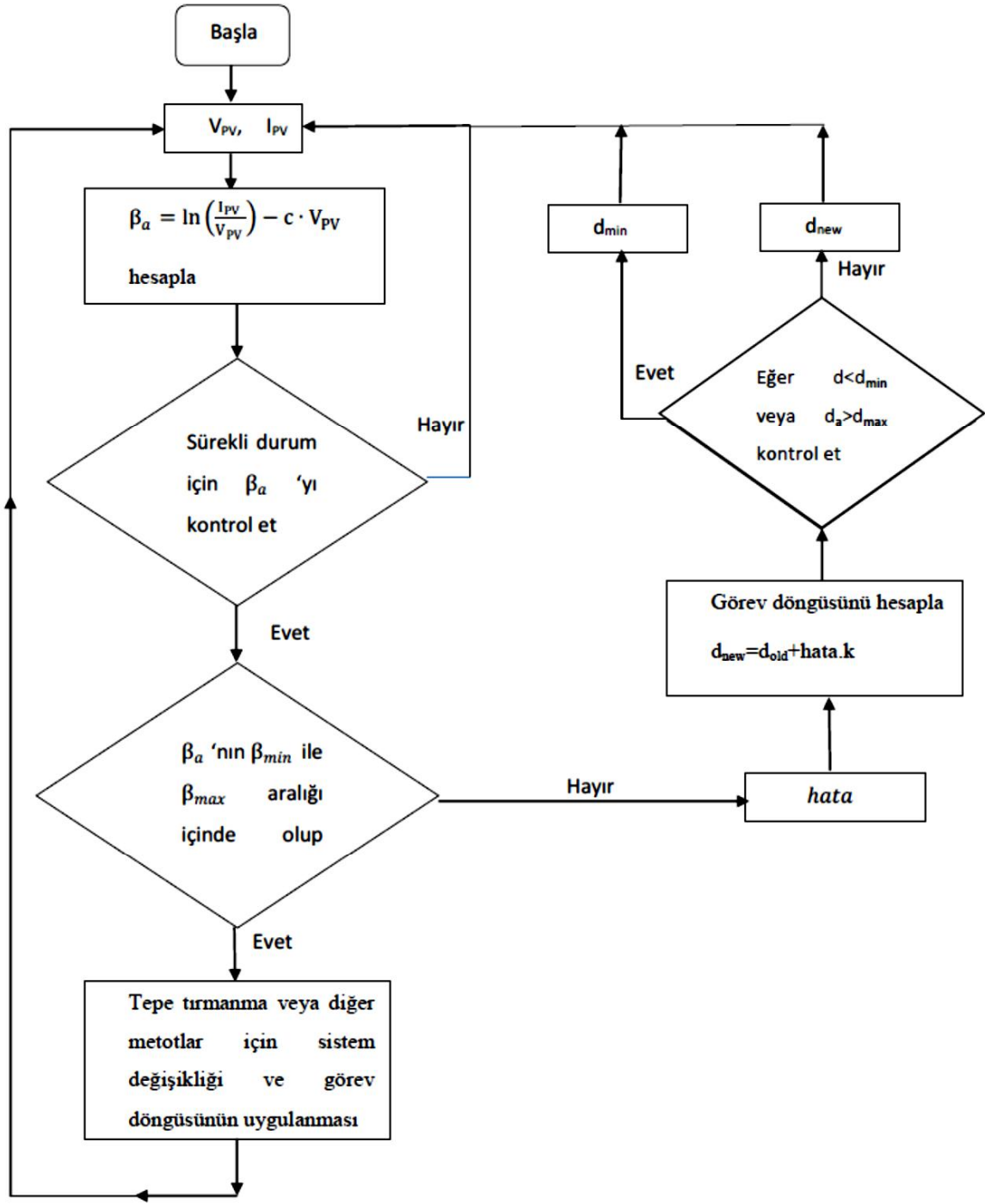
$$\beta = \ln \left(\frac{I_{PV}}{V_{PV}} \right) - c \cdot V_{PV} \quad (5.6)$$

$$\beta = \ln(I_0 \cdot c) \quad (5.7)$$

$$c = \frac{q}{A \cdot k \cdot T \cdot N_s} \quad (5.8)$$

c; elektron yüküne (q), jonksiyon panel kalite faktörüne (A), Boltzmann sabitine (k), sıcaklığa (T) ve serideki fotovoltaiik sayısına (N_s) bağlı bir sabittir. Çalışma durumları değiştiğinde optimum noktada β 'nın değeri hemen hemen sabit kalır. Böylece β panelin akımı ve gerilimi kullanılarak sürekli hesaplanabilir ve sabit referans ile kapalı döngüye sokulur.

İzlenen β ile çalışma noktası büyük tekrar adımları kullanılarak hızlıca MGN'ye yaklaşmak için kullanılmaktadır. Sonrasında küçük adımlarla (geleneksel MGNT teknikleri gibi) tam MGN'ye ulaşmak için kullanılabilir. Başka bir deyişle, geleneksel MGNT tekniğı tam MGN'yi izlemek için kullanılırken β metodu MGN'ye yaklaşır. β metodunun algoritması için akış diyagramı Şekil 5.7' de gösterilmektedir [12,13,24,25].

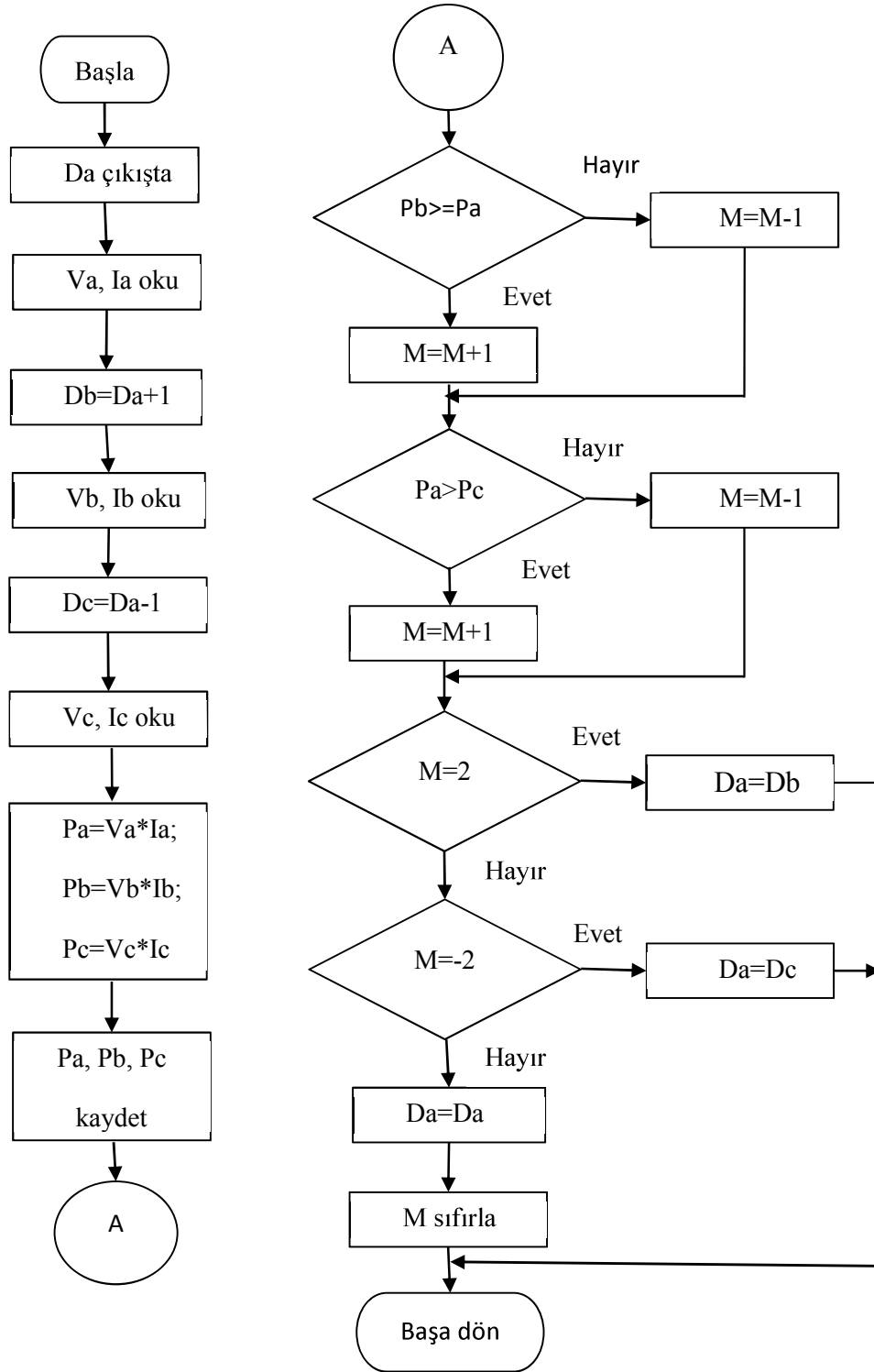


Şekil 5.7. β metodunun akış diyagramı [12]

5.1.5. Üç Nokta Güçlerini Karşılaştırma Metodu

Bu metot D&G metodundan geliştirilmiş bir metottur. D&G algoritmasının osilasyon problemini önlemektedir. D&G algoritması güçteki değişimi gözlemlediğimiz şimdiki ve

sonraki çalışma noktası olan iki noktayı karşılaştırır ve PV dizi geriliminin arttırılmasına veya azaltılmasına karar verilir. D&G algoritmaları özellikle hızlı değişen hava şartlarında güç kayıplarına sebep olan MGN çevresinde osilasyonlar oluşturmaktadır. Üç nokta metodu Şekil 5.8’ deki algoritma uygulanarak gerçekleştirilebilir. PV çıkış gücünün değiştirilmesi ve P-V eğrisinin üç noktasında PV çıkış gücünün karşılaştırılması periyodik olarak devam eder.

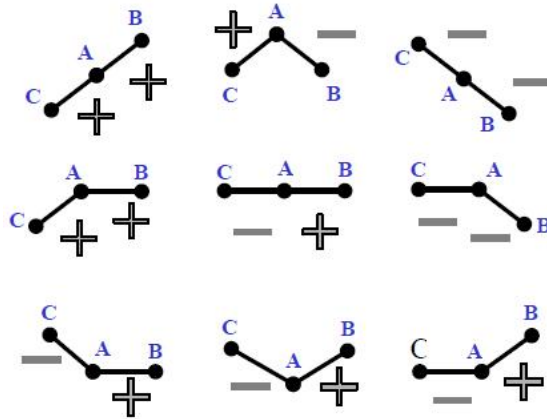


Şekil 5.8. Üç nokta metodu için algoritma [12,26]

Güneş ışıması çok hızlı değiştiği zaman, üç nokta metodu hızlı şekilde çalışma noktasının hareket etmesini önlemektedir. Işınım şiddetinin değişiminde satabil ve güç

kaybı düşük olacak şekilde, MGNT' yi gerçekleştirmektedir. Şekil 5.9 mümkün olan durumları göstermektedir.

Üç nokta metodu algoritması PV dizi terminal geriliminin değiştirilmesine ve PV çıkış gücünün karşılaştırılmasına periyodik olarak devam eder. P-V eğrisinin 3 noktasında çıkış gücü karşılaştırılır. 3 nokta şimdiki çalışma noktası A, A noktasından değişen bir nokta B ve A noktasından karşıt yönde değişen bir nokta C' dir [10]. A ve B noktaları için, eğer B noktasının gücü A noktasınıninkine eşit veya daha büyükse, durum pozitif önem arz eder. Aksi halde, durum negatif önem arz eder. A ve C noktaları için C noktasının gücü A noktasınıninkinden küçükse durum pozitif, aksi halde negatif önem arz eder. Üç ölçülen noktanın, eğer ikisi pozitifse, dönüştürücünün görev periyodu arttırılabilir. Karşıt olarak iki tanesi negatifse dönüştürücünün görev periyodu azaltılabilir. Birinin pozitif diğerinin negatif olduğu durumda, MGN' ye ulaşılmıştır [10,12,26].



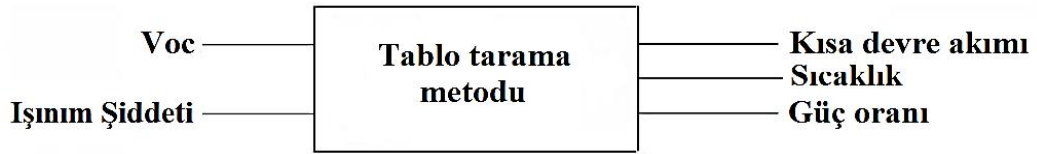
Şekil 5.9. Üç değişen noktanın olası durumları [12,26]

5.1.6. Tablo Tarama Metodu

PV panelin gerilim ve akımının ölçülen değerleri, önceden belirlenen iklim şartları altında maksimum güç noktasında çalışan kontrollü sistemde depolananlarla karşılaştırılır. Metotların birinde I_{PV} , denklem (5.9)' un bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$P_{PV} \cdot I_{MPP} = f(P_{MAX}) \quad (5.9)$$

Bu metotta, PI tipi bir kontrolör DA-DA dönüştürücünün görev periyodunu ayarlar [12]. Işınım şiddeti değiştiği zaman açık devre gerilimi V_{oc} sabit kalmasına rağmen kısa devre akımı I_{sc} farklı olacaktır. Ancak, I_{sc} aynı kaldığı zaman V_{oc} sıcaklıkla değişir. Böylece I_{sc} akımı gibi değerler standart PV değerleri kullanılarak tablo yapılabilir. Sıcaklık, V_{oc} ve ışınım şiddeti girişleri ile belirlenebilir. Tablo arama metodu Şekil 5.10' da gösterilmektedir [11].



Şekil 5.10. Tablo tarama metodu [11]

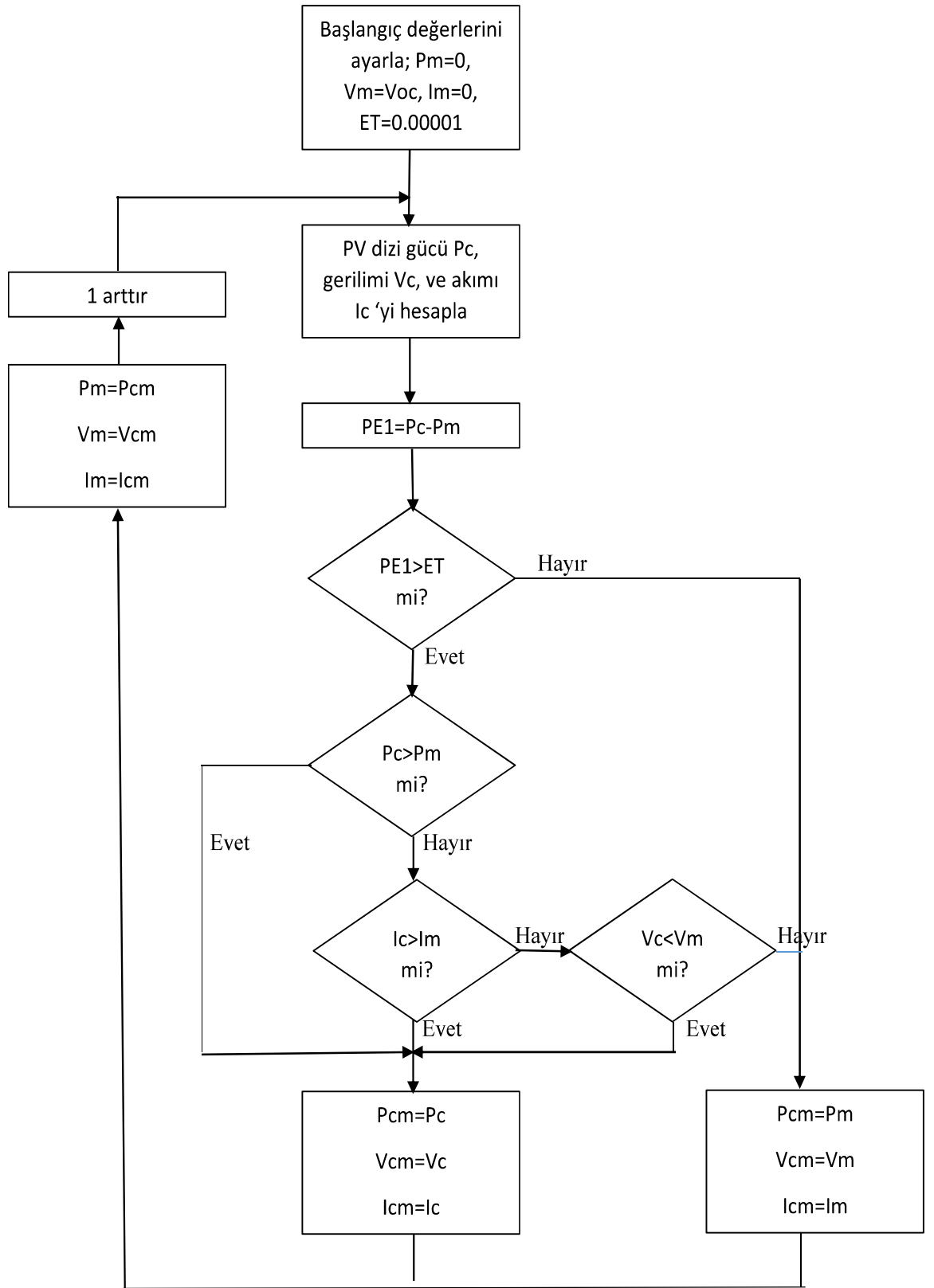
PV üreticinin akım ve gücü I_{MPP} ve P_{MAX} ' in önceden belirlenen değerlerine eşit olduğu zaman, sıfır hataya ulaşılır. Işınım şiddeti veya yükteki herhangi bir değişim, uyumlu sistemde bozulmaya sebep olur ve PI kontrolör tekrar optimum çalışma noktasına sistemi getirir.

Bu algoritmalar, bilgileri depolamak için büyük bir hafıza kapasitesine gerek duyulması dezavantajına sahiptirler. Dahası, uygulama PV panel özelliklerine uygun olmak zorundadır. Ek olarak, tüm mümkün olabilecek sistem durumlarını kaydetmek ve depolamak zordur. Fakat bu metot birçok avantaja da sahiptir. Sistem basittir ve maksimum noktayla ilgili tüm bilgilerin mevcut olmasından dolayı hızlı bir izleme gerçekleştirebilir [12,15].

5.1.7. Sürekli MGN Arama Algoritması

Bu algoritmada ne sıcaklık ve ışınım şiddeti seviyelerinin ölçümü ne de tablo arama metodundaki gibi PV dizi modeli gereklidir. Bu algoritmada, asıl görev maksimum referans gücünün değerini belirlemek ve ondan sonra son ölçülen güç değeriyle onu karşılaştırmaktır. Bu karşılaştırma sonucu elde edilen fark maksimum güç hatası olarak adlandırılır. PV diziyi MGN' de çalıştırabilmek için maksimum güç hatası sıfır veya sıfıra yakın olmalıdır. Çalışma gücü yüke aktarılan PV dizi çıkış gücüdür ve PV dizi akımıyla çıkış geriliminin çarpımından elde edilir. Burada ilk olarak RPM (referans maksimum güç)

gereklidir. RPM sıcaklıktaki ve güneş ışıınım seviyesindeki değişimle değiştii için, sabit bir referans değildir ve PV dizi referans maksimum gücünün izlenmesini zorlaştıran kesin olmayan bir non-lineerliğe sahiptir. Referans maksimum gücü elde etmek ve maksimum gücü hatasını bulmak için Şekil 5.11’ de verilen akış diyagramı kullanılır. Eğer referans MGN sıcaklık ve güneş ışıınım seviyesi ile değişirse, algoritma PV dizi gerilimini ayarlayacak ve yeni maksimum gücü noktasını bulacaktır. Yük gücü veya akımı, PV dizinin MGN gücü veya akımından çok küçükse bu algoritma PV dizi maksimum gücü noktasını belirleyemeyecektir. Bu durumda PV dizinin maksimum gücü noktasında çalışabilmesi için PV dizi akımını arttırmak amacıyla ek yükler bağlanmalıdır. Genellikle ek yük olarak bataryalar şarj edilmektedir [15,27]

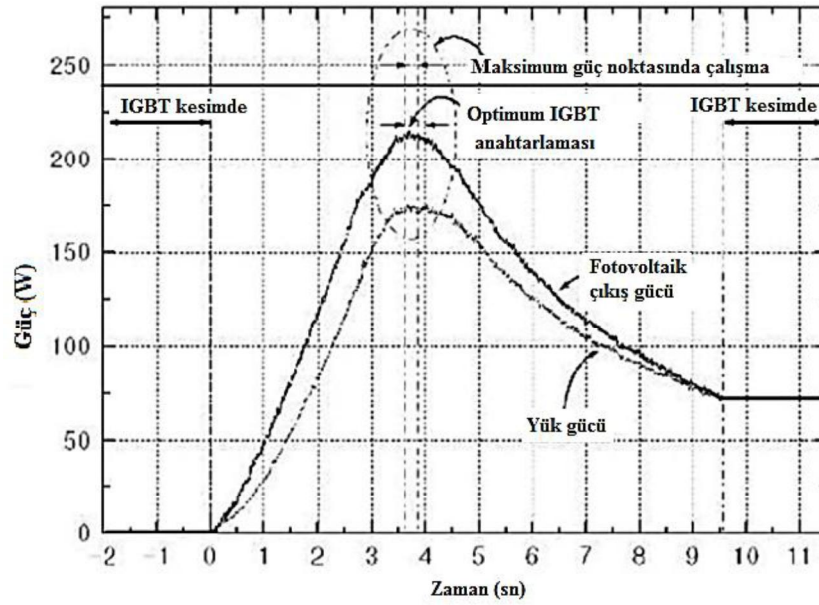


Şekil 5.11. Sürekli araştırma algoritmasının akış diyagramı [12,27]

5.1.8. PV Çıkış Algılamasız Kontrol Metodu

Bu kontrol metodu, karmaşık kontrol yapılarını ve geleneksel kontrolörlerin izleme yeteneğini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çıkış algılamasız MGNT metodu her zaman optimum güç noktasını izler. Aynı zamanda izleme hatası olasılığı sadece yüke akan akımın geri beslemesi sayesinde minimum yapılabilir.

Çıkış algılamasız MGNT kontrol metodunda yük gücü Şekil 5.12’ de örneklendiği gibi PV dizi gücüyle orantılıdır. Yükün gücü yük terminallerindeki akım ile gerilimin çarpımına eşittir. Eğer yük gücü arttığı zaman yük akımı artarsa, yük akımı PV dizi gücüyle orantılıdır. Böylece çıkış algılamasız MGNT metodu bu basit algoritma ile tüm PV üretim sistemlerine uygulanabilir.



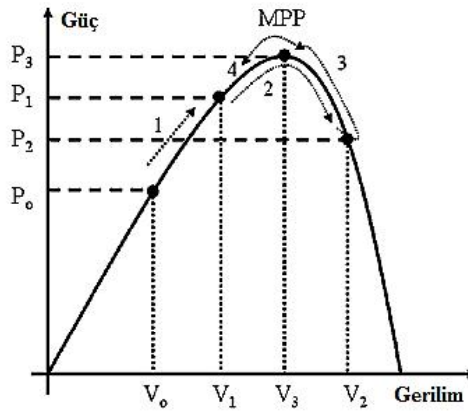
Şekil 5.12. PV dizi ve yükün çıkış karakteristiği [16]

Şekil 5.13 çıkış algılamasız MGNT kontrol metodunun algoritmasını göstermektedir. Çıkış algılamasız MGNT kontrolünde PV üretim sisteminin yük akımı I , MGNT kontrol metodunun önemli bir bileşenidir. Güç dönüşüm sistemi PWM kontrolörle kontrol edilir. Görev periyodundaki bir artış aynı zamanda yük akımı da olan güç dönüştürücü çıkış akımında bir artışa yol açar.

Tablo 5.1. Çıkış algılamasız MGNT kontrol metodunun sonuçsal açıklaması [16]

İzleme	Görev oranı	Akım (I)	Δ Görev oranı
1 ($V_0 \rightarrow V_1$)	(-)	(+)	(-)
2 ($V_1 \rightarrow V_2$)	(-)	(-)	(+)
3 ($V_2 \rightarrow V_3$)	(+)	(+)	(+)
4 ($V_3 \rightarrow V_4$)	(+)	(-)	(-)

Tablo 5.1’ de izleme 1 durumunda görev periyodu azalır ve akım artarsa, Δ görev periyodu değişimi negatif olacaktır. İzleme 1, PV dizi çıkış geriliminin V_0 ’ dan V_1 ’ e yer değiştirmesi anlamındadır ve PV dizi çıkış gücü P_0 ’ dan P_1 ’ e artacaktır. İzleyici 2’ in görev periyodu Şekil 5.14’ de gösterildiği gibi azalacaktır. İzleyici 2’ de görev periyodu ve akım azalır, Δ görev periyodu değişimi pozitif olacaktır. İzleme 2, PV dizi çıkış gücünün V_1 ’ den V_2 ’ ye hareket etmesi anlamındadır ve PV dizi çıkış gücü P_1 ’ den P_2 ’ ye azalır. İzleyici 3’ ün görev periyodu artacaktır. İzleyici 3’ de eğer görev oranı ve akım artarsa, Δ görev periyodu değişimi de pozitif olacaktır. İzleyici 3, PV dizi çıkış geriliminin V_2 ’ den V_3 ’ e azaldığı anlamındadır ve çıkış gücü P_2 ’ den P_3 ’ e artar. İzleyici 4’ ün görev oranı artacaktır. İzleyici 4’ de görev oranı artar ve akım azalır, görev periyodu değişimi negatif olacaktır. İzleyici 4 çıkış geriliminin V_3 ’ den V_1 ’ e azaldığı ve çıkış gücünün P_3 ’ den P_1 ’ e düştüğü anlamına gelir. İzleyici 1’ in görev periyodu azalacaktır.



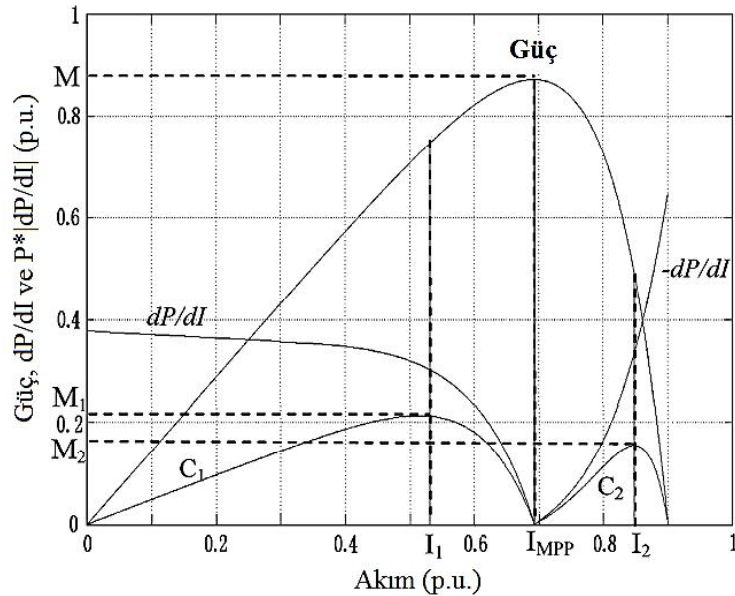
Şekil 5.14. P-V karakteristik eğrisi kullanılarak çıkış algılamasız MGNT kontrol metodunun açıklaması

[16]

Tüm bu adımlar Tablo 5.1’ deki gibi tekrarlanacaktır. Çıkış algılamasız MGNT kontrol metodunun yönü ilk nokta V_0 ’ dan ikinci nokta V_1 ’ e ve ondan sonra Şekil 5.14’ de gösterildiği gibi $V_1 V_2 V_3 V_1 V_2$ gibi değişir. Sonuç olarak çıkış algılamasız MGNT kontrol metodu son nokta MGN’ ye ulaşır [12,16].

5.1.9. Değişken Adım Boyutlu Artan Direnç Metodu

Artan iletkenlik MGNT metodu için adım boyutu MGN’ nin ne hızda izlendiğini belirler. Hızlı izleme büyük artışlar ile gerçekleştirilebilir, fakat sistem MGN’ de tam olarak çalışmaz, MGN etrafında osilasyonlar yapar; böylece metot düşük verimli olur. MGNT küçük artışlarla gerçekleştirildiği zaman bunun tersi bir durum oluşur. Sistem dinamikleri ve osilasyonlar arasındaki gerekli olan değişim sabit adım boyutlu MGNT için yapılmaktadır. Değişken adım boyutu iterasyonu, zorlu tasarım problemlerini çözebilir. Şekil 5.15’ de, PV çıkış gücü yanıtını, çıkış gücüne karşı çıkış akımının eğimini, çıkış gücünün üretilmesini ve çıkış gücünün eğim eğrilerini göstermektedir.



Şekil 5.15. Normalleştirilmiş güç, güce karşı akım eğrisi, gücün üretimi, ($C_1=P*(dP/dI)$, $C_2=P*(-dP/dI)$) eğrileri [17]

Geliştirilmiş değişken adım boyutu algoritması, artan direnç MGNT metodu (AD MGNT) metodu için önerilmektedir. Basittir, izleme dinamikleri ve izleme doğruluğunu iyileştirmek için verimli bir yoldur. Bu algoritma ile diğerleri arasındaki birinci farklılık; AD MGNT metodunun adım boyutunun, PV dizi çıkış gücü P^n ve PV dizi gücünün

türevinin mutlak değeriyle $\left| \frac{dP}{dI} \right|$ üretilen C eşik fonksiyonunun uç değerleri veya noktalarıyla DA/AA dönüştürücünün anahtarlanabilmesidir. Eşik fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$C = P^n \cdot \left| \frac{dP}{dI} \right| \quad (5.10)$$

n , expolansiyel için bir göstergedir. Şekil 5.15' de gösterildiği gibi PV dizi gücü P ve onun türevi dP/dI ' nin birinci derece expolansiyeli ($n=1$) AD MGNT' nin adım boyutunu kontrol etmek için kullanılır. Şekil 5.15' de görüldüğü gibi üretilen eğri MGN' nin iki yanında iki akım değeri I_1 ve I_2 ' nin karşılığı olan iki uç değer M_1 ve M_2 ' ye sahiptir. PV dizi çıkış akımı I_1 ve I_2 arasında olduğu zaman AD MGNT metodu değişebilen adım boyutu uygulamaktadır. Aksi halde, sabit adım boyutu uygulanmaktadır. Bu düşünce aşağıdaki gibi formülleştirilebilir:

$$\frac{\Delta C}{\Delta I} \geq 0, \text{ sabit adım boyutu durumunda (MGN' nin solu)} \quad (5.11a)$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta I} < 0, \text{ değişken adım boyutu durumu (MGN' nin solu)} \quad (5.11b)$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta I} > 0, \text{ değişken adım boyutu durumu (MGN' nin sağ)} \quad (5.11c)$$

$$\frac{\Delta C}{\Delta I} \leq 0, \text{ sabit adım boyutu durumu (MGN' nin sağ)} \quad (5.11d)$$

Bu metot aşağıda verildiği gibi PV dizi güç eğrisinin eğimini MGN' de 0, MGN' nin solunda pozitif, sağında negatif olmasına dayanmaktadır:

$$\frac{dP}{dI} = 0, \text{ maksimum güç noktasında} \quad (5.12a)$$

$$\frac{dP}{dI} > 0, \text{ maksimum güç noktasının solunda} \quad (5.12b)$$

$$\frac{dP}{dI} < 0, \text{ maksimum güç noktasının sağında} \quad (5.12c)$$

Böylece,

$$\frac{dP}{dI} = \frac{d(VI)}{dI} = V + I \frac{dV}{dI} \cong V + I \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (5.13)$$

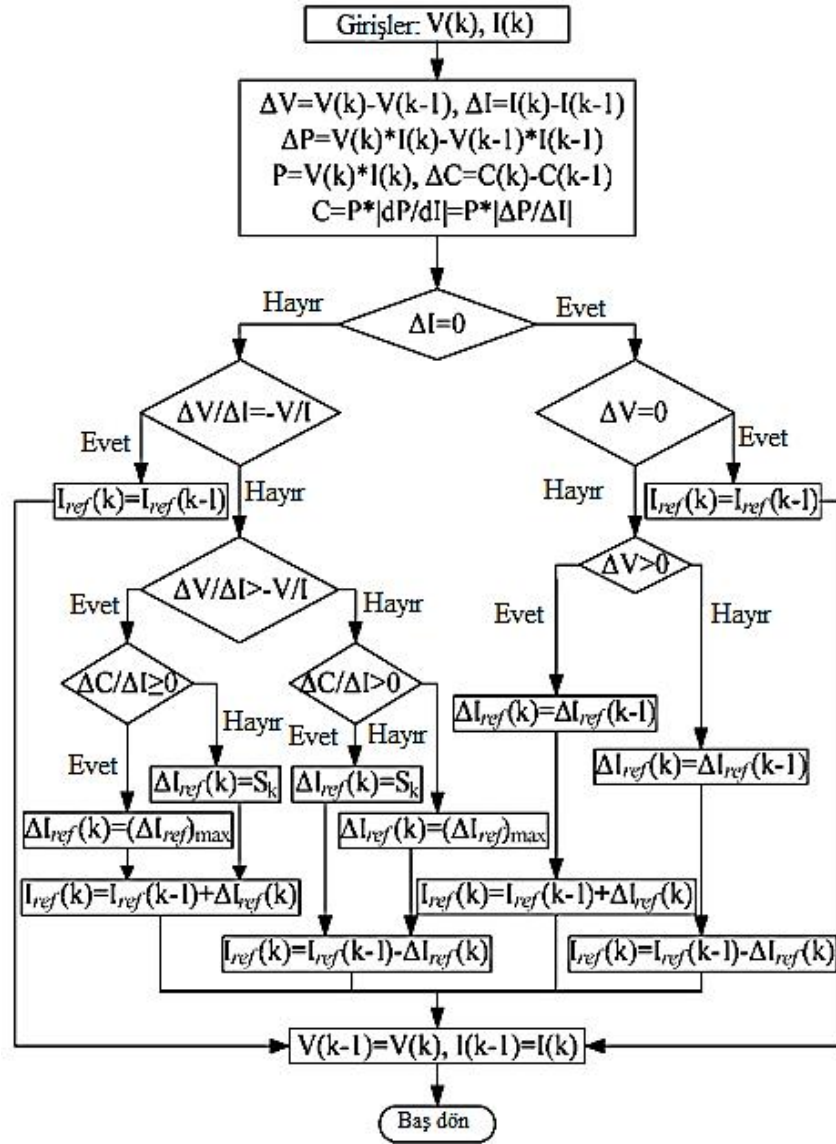
Aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} = -\frac{V}{I} \text{ maksimum güç noktasında} \quad (5.14a)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} > -\frac{V}{I} \text{ maksimum güç noktasının solunda} \quad (5.14b)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta I} < -\frac{V}{I} \text{ maksimum güç noktasının sağında} \quad (5.14c)$$

Maksimum güç noktası böylece Şekil 5.16' daki akış şemasında gösterildiği gibi anlık direnç (V/I) ile artan direnç ($\Delta V/\Delta I$)' in karşılaştırılmasıyla izlenebilir. I_{ref} , PV diziyi çalışmaya zorlayan referans akımdır. MGN' de I_{ref} , I_{MPP} ' ye eşittir. MGN' ye ulaşıldığı zaman, hava durumundaki değişimleri ifade eden ΔV ' de bir değişim belirlenmedikçe bu noktada kalınır [12,17].



Şekil 5.16. Değişken adımli artan direnç MGNT algoritmasının akış şeması [17]

5.2. Diğer MGNT Teknikleri

Bu bölümde literatürde yer alan, daha az kullanılan veya diğer MGNT tekniklerine yardımcı teknik olarak kullanılan yöntemler incelenecektir.

5.2.1. Sabit Görev Periyodu Metodu

Sabit gören döngüsü metodu, metotların en basitini sunar ve herhangi bir geri beslemeye ihtiyaç duymaz. Yük empedansı maksimum güç noktası için sadece bir defa ayarlanır ve tekrar ayarlanmaz [13,14].

5.2.2. Sabit Gerilim Metodu

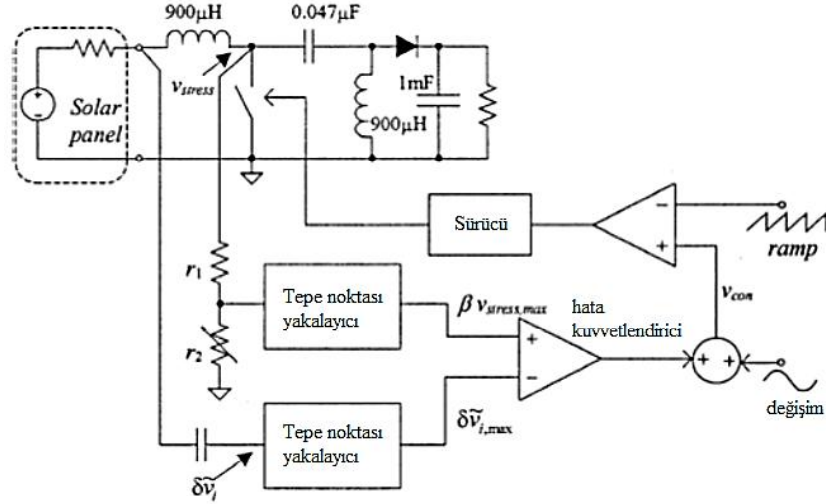
Sabit gerilim metodunda MGN geriliminin standart atmosfer koşullar için PV açık devre geriliminin (V_{oc}) %70-80 olduğu deneysel sonuçlar kullanılır. MGN' ler arasında (değişken atmosfer durumlarında), PV modül terminallerindeki gerilim, güneş ışınlarının yoğunluğu değiştiği zaman çok az değişir. Fakat PV modül terminallerindeki gerilim sıcaklık değiştiği zaman önemli derecede değişmektedir. Bundan dolayı bu metot sıcaklığın çok az değiştiği bölgelerde kullanılmak zorundadır. Bir artı nokta, sadece PV geriliminin ölçülüyor olmasıdır. Basit bir kontrol döngüsüyle MGN' ye ulaşılabilir [13,14].

En iyi sabit gerilim algoritmasını elde etmek için ışıınım şiddeti ve sıcaklık ile ilgili olarak istatistiksel bilgiler bir yılın tüm periyodunda toplanmalıdır. Kontrolör en iyi sabit gerilime, PV dizinin çalışma noktasını veya nominal yük gerilimini ayarlar. Bu algoritmanın avantajları basit ve kolay uygulanmasıdır. Ancak verimliliği sınırlıdır ve PV diziden daha fazla güç üretmek için sabit gerilimi belirleyebilmek iyi matematiksel istatistiklere bağlıdır. Metot bu nedenle asla MGN' de çalışmaz [12]. Çalışma noktası ile ilgili bilgilere farklı coğrafi bölgeler için sahip olunmalıdır [18]. Bu sebeplerden dolayı bu metot, verimliliği arttırmak için diğer metotlarla birleştirilerek kullanılabilir [14,18].

5.2.3. Sistem Osilasyon Metodu

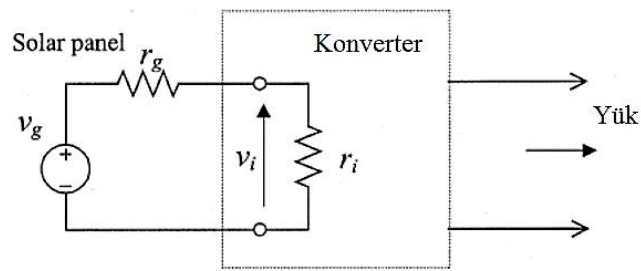
Değişen hava durumları altında güneş panelinden maksimum çıkış gücünün verimli şekilde elde edilmesi için uygulanan yeni bir tekniktir. Yöntemin uygulanma şekli güneş paneli ile yük veya batarya yolu arasında darbe genişlik modülasyonu (PWM) ile kontrol edilen DA/DA sepic veya cuk converterin bağlantısına dayanmaktadır. Çıkış akımı sürekli olmasına rağmen, dönüştürücü sürekli olmayan kondansatör gerilimi modunda çalışır. Ana anahtarın görev periyodunda küçük sinüzoidal sinyal değişiminin modülasyonu ve giriş

gerilimindeki maksimum değişim ile ana anahtardaki gerilim baskısı karşılaştırılarak, panelin MGN Şekil 5.17’ deki gibi bulunabilir.

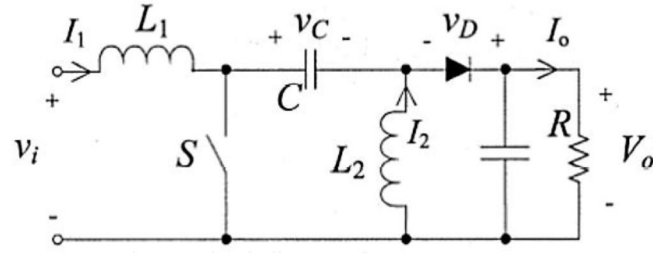


Şekil 5.17. Sistem osilasyon MGN izleme metodunun blok diyagramı [12]

MGN’ de dönüştürücünün giriş direncinin, güneş panelinin çıkış direncine eşit olması için dönüştürücünün anahtarının nominal görev periyodu bir değere ayarlanır. Bu yaklaşım, hesaplama için mikroişlemci kontrolü olmadan tüm durumlarda maksimum güç transferini garantiler. MGN, PV terminalleri boyunca görünen tepe dinamik direnci oranında güç dönüştürücü ara yüzünün çalışmasıyla izlenebilir [12].



Şekil 5.18. Dönüştürücüye bağlı güneş panelinin eşdeğer devresi [12]



Şekil 5.19. SEPIC dönüştürücünün devre şekli [12]

5.2.4. Oransal Açık Devre Gerilimi Metodu

Değişen ışınlam şiddeti ve sıcaklık seviyeleri altında PV dizinin V_{MPP} ve açık devre gerilimi arasındaki yaklaşık lineer ilişki oransal açık devre gerilimi metodunu açıklamaktadır. V_{OC} ve V_{MPP} arasındaki ilişki yaklaşık lineerdir.

$$V_{MPP} \approx K_1 \cdot V_{OC} \quad (5.15)$$

K_1 oransalı kullanılan PV dizinin karakteristiğine bağlı olduğu için sabittir. Farklı ışınlam şiddeti ve sıcaklık seviyelerinde belirli bir PV dizi için deneysel olarak belirlenen V_{MPP} ve V_{OC} yardımıyla genellikle önceden hesaplanmaktadır. K_1 sabiti 0.71 ile 0.78 arasındaki bir değer almaktadır.

K_1 bilindiği için, V_{MPP} gerilimi güç dönüştürücünün anlık olarak durdurulup periyodik olarak V_{OC} 'nin ölçümüyle hesaplanır. Ancak bu sürekli güç kaybı gibi birçok dezavantaj oluşturmaktadır. Bunu önlemek için V_{OC} 'nin ölçülebileceği bir deneme hücresi kullanılabilir. Bu deneme hücresi PV dizi karakteristiğine yakın bir karakteristikte olacak şekilde dikkatlice seçilmelidir.

V_{MPP} 'ye yaklaşıldığı zaman, dönüştürücünün kapalı döngü kontrolü bu arzu edilen gerilime ulaşmak için kullanılabilir. V_{MPP} ile V_{OC} arasındaki ilişki sadece bir yaklaşım olduğu için, PV dizi teknik olarak hiçbir zaman MGN' de çalışamayacaktır [12,23].

5.2.5. Oransal Kısa Devre Akımı Metodu

Oransal kısa devre akımı metodu, değişen hava şartları altında, I_{MPP} 'nin PV dizi I_{SC} akımıyla yaklaşık lineer ilişkisi göz önüne alınarak gerçekleştirilmektedir.

$$I_{MPP} \approx K_2 \cdot I_{SC} \quad (5.16)$$

Oransal açık devre gerilimi tekniğindeki gibi, K_2 oransal sabiti, kullanımdaki PV diziye göre belirlenmektedir. K_2 sabiti genellikle 0.78 ile 0.92 arasında bulunmaktadır. Çalışma boyunca I_{SC} ölçümü problemlidir. Eklenen bir anahtar genellikle I_{SC} akımını akım sensörü kullanarak ölçmek için PV diziyi periyodik olarak kısa devre yapmak amacıyla güç dönüştürücüye eklenmektedir. Bu bileşenlerin sayısını ve maliyetini arttırmaktadır. Bu metodun çok sayıda sakıncaya sahip olduğu açıktır. Güç çıkışı I_{SC} akımı bulunduğu zaman azalır ve aynı zamanda MGN iyi bir şekilde izlenemez [12,23].

5.2.6. Akım Tarama Metodu

Akım tarama metodu PV dizi akım-gerilim karakteristiğini sağlayan ve sabit zaman aralıklarında güncellenen PV dizi akımı için taranmış bir dalga şekli kullanılır. V_{MPP} ondan sonra benzer aralıktaki karakteristik eğrilerden hesaplanabilir. Tarama dalga şekli için seçilmiş fonksiyon türeviyle doğrudan orantılıdır:

$$f(t) = k4 \cdot \frac{df(t)}{dt} \quad (5.17)$$

$k4$ oransal sabittir. PV dizi gücü böylece:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot f(t) \quad (5.18)$$

$$\frac{dp(t)}{dt} = v(t) \cdot \frac{df(t)}{dt} + f(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt} \quad (5.19)$$

Böylece denklem (5.17) ve (5.19)' dan

$$\frac{dp(t)}{dt} = \left[v(t) + k4 \cdot \frac{dv(t)}{dt} \right] \cdot \frac{df(t)}{dt} = 0 \quad (5.20)$$

(5.17)' deki diferansiyel eşitlik aşağıdaki çözüme sahiptir:

$$f(t) = C \cdot e^{t/k4} \quad (5.21)$$

C, $\tau=k4$ zaman sabiti ile exponansiyel fonksiyonun azalmasının sonucu olan maksimum PV dizi akımı I_{max} ' a eşit olması için seçilir.

Aşağıdaki ifade elde edilir:

$$f(t) = I_{max} \cdot e^{-t/\tau} \quad (5.22)$$

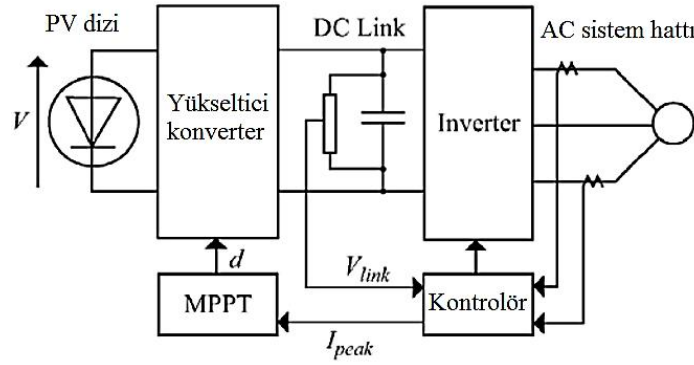
Denklem (5.22)' de akım bir kapasite üzerinden birkaç deşarj akımı kullanılarak kolayca sağlanabilir. Denklem (5.22)' in türevi 0 olmadığı için, denklem (5.20) $df(t) / dt$ ' den ayrılır ve $f(t) = i(t)$ ile basitleştirilir:

$$\frac{dp(t)}{di(t)} = v(t) + k4 \cdot \frac{dv(t)}{dt} = 0 \quad (5.23)$$

V_{MPP} akım taramasından sonra hesaplandığı için denklem (5.23), MGN' ye ulaşıp ulaşılmadığını iki defa kontrol etmek için kullanılır. Bu MGNT tekniği sadece, eğer izleme ünitesinin güç tüketiminin tüm PV sistemin kazandığı güçteki artıştan daha küçük oluyorsa uygulanabilir [12,23,28].

5.2.7. DA Bağlantılı Kapasite Düşüş Kontrolü

DA bağlantılı kapasite düşüş kontrolü metodu Şekil 5.20' de gösterildiği gibi bir AA sistem hattı ile kaskat bağlı bir PV sistemin çalışması için özel olarak tasarlanmış bir MGNT tekniğidir.



Şekil 5.20. DA bağlantılı kapasite düşüş kontrolünün topolojisi [12]

İdeal yükseltici dönüştürücünün görev oranı D olarak verilmiştir.

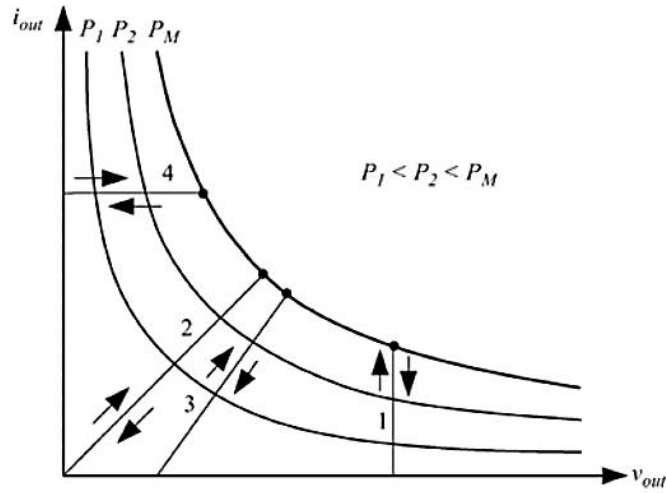
$$D = 1 - \frac{V}{V_{link}} \quad (5.24)$$

V , PV dizi gerilimidir ve V_{link} , DA bağlantı boyunca gerilimdir. V_{link} sabit tutulursa invertöre gelen akım arttıkça yükseltici dönüştürücünün güç çıkışı artar ve sonuç olarak PV diziden elde edilen güç artar. Akım artmasına rağmen, V_{link} gerilimi inverter tarafından PV diziden sağlanabilecek mevcut gücü aşamayacak şekilde güce ihtiyaç duyulduğu süre boyunca sabit tutulabilir. Aksi halde V_{link} düşmeye başlar. Bunu düzeltmek için inverterin akım kontrol emri I_{peak} maksimuma getirilir ve PV dizi MGN' de çalışır. AA sistem hat akımı ölçülerek V_{link} ' deki düşüşü önlemek için geri besleme yapmaktadır ve D I_{peak} akımını maksimuma getirilmek için optimize edilmektedir [12,29].

5.2.8. Yük Akımı ve Yük Geriliminin Maksimuma Getirilmesi Metodu

MGNT tekniklerinin amacı PV diziden üretilen gücü maksimum yapmaktır. PV dizi bir güç dönüştürücüye bağlandığı zaman, PV dizi gücünün maksimum olması dönüştürücünün çıkış gücünü maksimum yapar. Tersine, dönüştürücünün çıkış gücünün maksimum yapılması dönüştürücü kayıplarının olmadığı farz edilerek PV dizi çıkış gücünün maksimum yapılmasıdır.

Çoğu yükün; gerilim kaynağı, akım kaynağı, direnç veya Şekil 5.21' de gösterildiği gibi bu tip yüklerin bileşimi olabilir.



Şekil 5.21. Farklı yük tipleri; 1) gerilim kaynağı, 2) direnç (omik), 3) direnç ve gerilim kaynağı, 4) akım kaynağı [12]

Bu grafikten gerilim kaynağı yük için, maksimum çıkış gücü P_M ' e ulaşabilmek için yük akımını I_{out} maksimum olmalıdır. Akım kaynağı tip yük için, yük gerilim V_{out} maksimum olmalıdır. Diğer yük tipleri için I_{out} veya V_{out} ' un her biri kullanılabilir.

Bu yüzden hemen hemen tüm yükler için yük gücünü maksimum yapmak amacıyla yük akımı veya yük geriliminin her birinin maksimuma getirilmesi yeterlidir. Sonuç olarak sadece bir sensöre ihtiyaç duyulur. MGN, ikinci bir parametre algılanmadan veya geleneksel giriş güç kontrolü gerekmeden I_{out} veya V_{out} değerlerinin herhangi birinin maksimuma ulaştırılmasıyla takip edilebilir. Çoğu sistemde batarya, ana yük veya bir destek olarak kullanılmaktadır. PV dizi MGN' ye yakın çalışır. Tam olarak MGN' de çalışma hemen hemen hiç gerçekleşmez, çünkü bu MGNT metodu güç dönüştürücü kayıplarının olmadığı varsayımına dayanmaktadır [12,30].

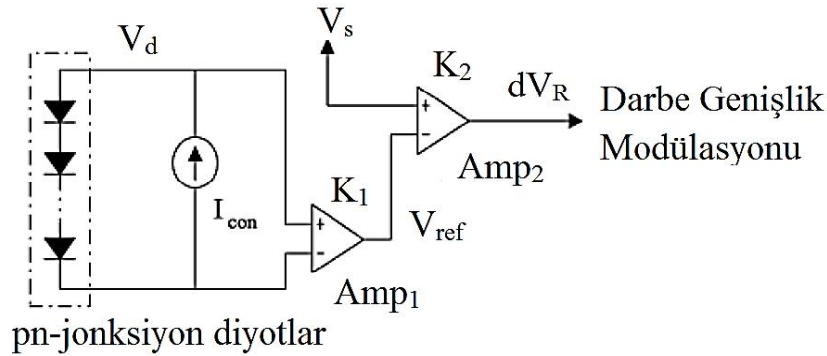
5.2.9. dP/dV veya dP/dI Geri Besleme Kontrolü Metodu

Dijital sinyal işleyiciler ve mikrokontrolörlerin karmaşık hesaplamaları gerçekleştirebiliyor olmaları nedeniyle, oluşturulan MGNT algoritmalarının açık bir yöntemi PV güç eğrisinin dP/dV veya dP/dI eğimlerini hesaplamak ve eğimi 0 'a getirmek için birçok kontrolör ile güç dönüştürücünün geri beslemesini gerçekleştirmektir. Eğim yönü hesaplanır ve onun işareti geçen birkaç döngü için depolanır. Bu işaretlerin temelinde, güç dönüştürücünün görev oranının MGN' ye ulaşılması için artırılması veya

azaltılması vardır. Dinamik adım boyutu sistemin geçici yanıtını geliştirmek için kullanılmaktadır [12,31].

5.2.10. Sabit Gerilim İzleyici Metodu

Şekil 5.22’ de sabit gerilim izleyicinin devre konfigürasyonu verilmiştir. Bu sabit gerilim izleyici p-n jonksiyon diyotunun sıcaklık karakteristiğinin güneş piliyle çok benzer olmasından fiziksel olarak yararlanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Çevreyle değişen güneş pili yüzey sıcaklığı, sabit gerilim izleyicinin referans gerilim olarak kullandığı p-n jonksiyon diyotunun ileri gerilim düşümünü belirler.



Şekil 5.22. Sabit gerilim izleyicinin kontrol devresi konfigürasyonu [12]

Şekil 5.22’ de darbe genişlik modülasyonunun (PWM) giriş gerilimi dV_R aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$dV_R = K_2(V_S - V_{ref}) = K_2(V_S - K_1V_d) \quad (5.25)$$

Burada V_S , PV dizinin çıkış gerilimi, V_{ref} V_S ’ in referans gerilimi, V_d p-n jonksiyon diyotunun ileri gerilim düşümü, K_1 ve K_2 sırayla kuvvetlendiriciler Amp_1 ve Amp_2 ’ nin kazançlarıdır. Bu durumda diyotun sıcaklık sabitinin PV dizininki ile orantılı olduğunu söylemek önemlidir. Bu nedenle PV dizi maksimum güç noktasını çevre sıcaklığındaki değişime rağmen izlenebilir. Hem de ışık yoğunluğu değiştiği zaman anlık yanıtı p-n jonksiyon diyotunun referansı ile ulaşılabilir [12,19].

5.2.11. Lineer Akım Kontrol Metodu

Bu metotta MGNT devresinin sadece PV dizinin maksimum gücünü anlık izleyebiliyor olması değil, aynı zamanda kolay uygulanabilir olması da amaçlanmaktadır. Metodun ana düşüncesi, maksimum güç eğrilerinde iki eğrinin kesişme noktasında olduğu gibi iki cebirsel ifadenin çözümünün grafiksel yorumlanmasına dayanmaktadır.

İlk olarak PV dizinin genel I-V karakteristik eğrisi aşağıda verilmektedir:

$$I = I_S - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{AKT} (V + I \cdot R_S) \right] - 1 \right\} \quad (5.26)$$

Burada;

I_S : verilen yalıtım altında üretilen akım,

I_0 : ters saturasyon akımı,

R_S : PV dizinin gerçek direnci,

K : boltzman sabiti,

T : mutlak sıcaklık,

q : elektron yükü,

A : p-n jonksiyonun ideallik faktörüdür.

Böylece önerilen MGNT kontrolörü için, ilk eğri aşağıda gösterildiği gibi güç-akım eğrisinde $f(P, I) = 0$ tarafından ifade edilmektedir.

$$f(P, I) = P - VI = P - \frac{q}{AKT} I \ln \left[\frac{(I_S + I_0 - I)}{I_0} \right] - I^2 R_S = 0 \quad (5.27)$$

İkinci olarak, maksimum güç noktası aşağıdaki şartı sağlamalıdır.

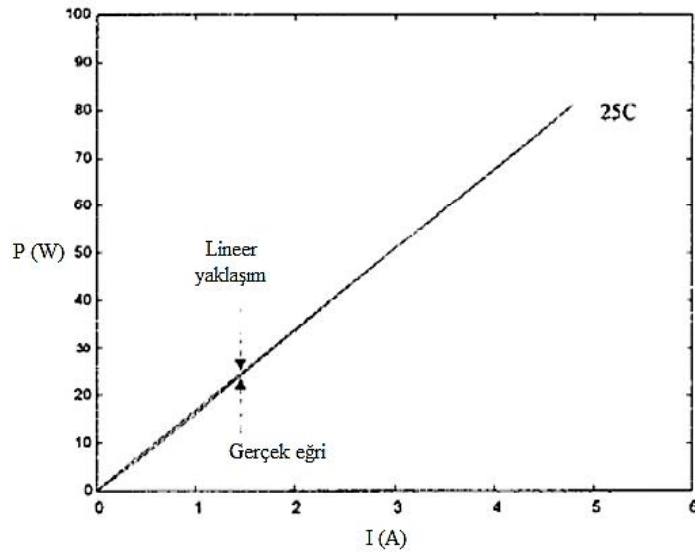
$$\frac{dP}{dI} = 0 \quad (5.28)$$

Denklem (5.26) ve (5.28) eşitliklerinden aşağıdaki ikinci maksimum güç noktası eşitliği elde edilir:

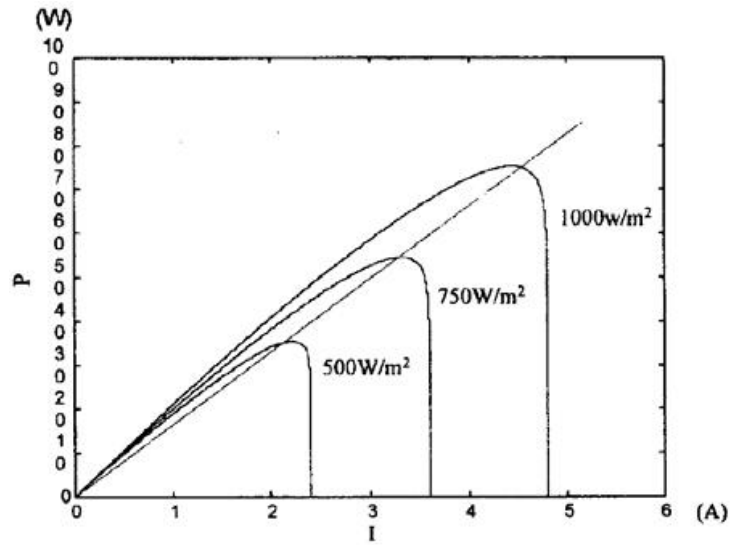
$$g(P, I) = P - \alpha I \ln \left[\frac{\alpha I^2}{(P - I^2 R_S) I_0} \right] + I^2 R_S = 0 \quad (5.29)$$

$$\alpha \cong \frac{AKT}{q} \quad (5.30)$$

Pratik PV dizi eşitliği denklem (5.29) için Şekil 5.23 ve Şekil 5.24' de gösterildiği gibi basit donanım uygulamalarıyla lineer bir yöntemle yaklaşılabildiği görülmektedir [12]



Şekil 5.23. Kesişme noktasında maksimum çıkış gücü eğrisi [12]



Şekil 5.24. Maksimum güç noktası kesişme noktalarında konumlandırılmış [12]

5.2.12. I_{MPP} ve V_{MPP} Hesaplama Metodu

I_{MPP} ve V_{MPP} genellikle ölçümü kolay olmayan sıcaklık ve ışıyım şiddeti seviyelerini içeren eşitliklerden hesaplanır. I_{MPP} ve V_{MPP} sağlandığı zaman, geri besleme kontrolü MGN’ de çalışmak için PV diziyi zorlayacaktır. Işıyım şiddeti Q ve modül sıcaklığı T değerlerinde, PV dizi akımı I ve terminal gerilimi V aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$I = \left\{ I_S + I_{SC} \left(\frac{Q}{Q_0} - 1 \right) + \alpha(T - T_S) \right\} N_P \quad (5.31)$$

$$V = \left\{ V_S + \beta(T - T_S) - R_S \left(\frac{1}{N_P} - I_S \right) - \frac{KI}{N_P} (T - T_S) \right\} N_S \quad (5.32)$$

I ve V standart test koşullarında (STC) PV modülün çıkış akımı ve terminal gerilimidir. STC, standart ışıyım şiddetinin (Q_0) 1 kW/m^2 , standart modül sıcaklığı 25°C ve güneş spectrumunun 1.5 hava kütleinde olduğu durumlar olarak tanımlanmaktadır. Dahası I_{SC} standart test koşullarındaki kısa devre akımı, α akım sıcaklık sabiti, β gerilim sıcaklık sabiti, R_S modülün seri direnci, K eğriyle ilgili faktördür.

PV dizi çıkış gücü P aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P = IV = I \left[V_S + \beta(T - T_S) + R_S I_S - \frac{I}{N_P} (R_S + KT - T_S N_S) \right] \quad (5.33)$$

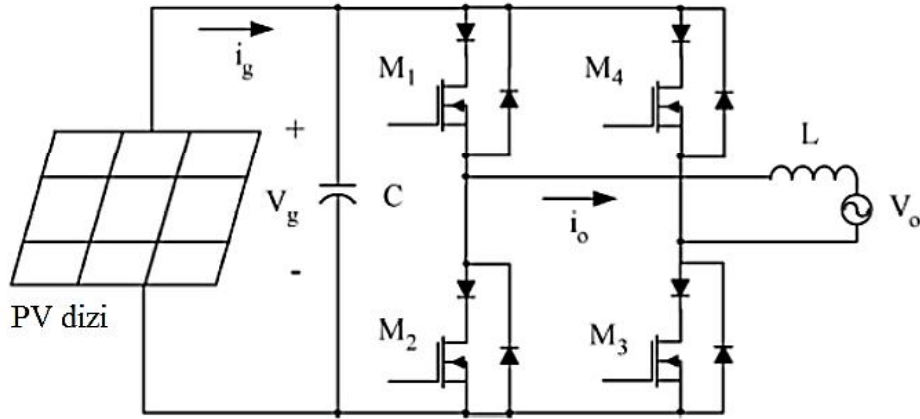
Maksimum çıkış gücündeki I_{MPP} akımı ve V_{MPP} gerilimi P ’ nin I ’ ya göre türeviyle hesaplanabilir [12,32].

$$I_{MPP} = \frac{N_P}{2} \frac{V_S + \beta(T - T_S) + R_S I_S}{R_S + K(T - T_S)} \quad (5.34)$$

$$V_{MPP} = \frac{V_S + \beta(T - T_S) + R_S I_S}{2} N_S \quad (5.35)$$

5.2.13. Tek Döngü Kontrol Metodu

Bu kontrol metodu çıkış akımıyla uyumluluk özelliğine dayanmaktadır. İnverterin çıkış akımı Şekil 5.25’ de maksimum gücü elde edebilmek için PV gerilimine göre ayarlanabilir.



Şekil 5.25. PV hücrenin şebekeyle bağlantı noktasında inverter güç bölgesi arayüzü [12]

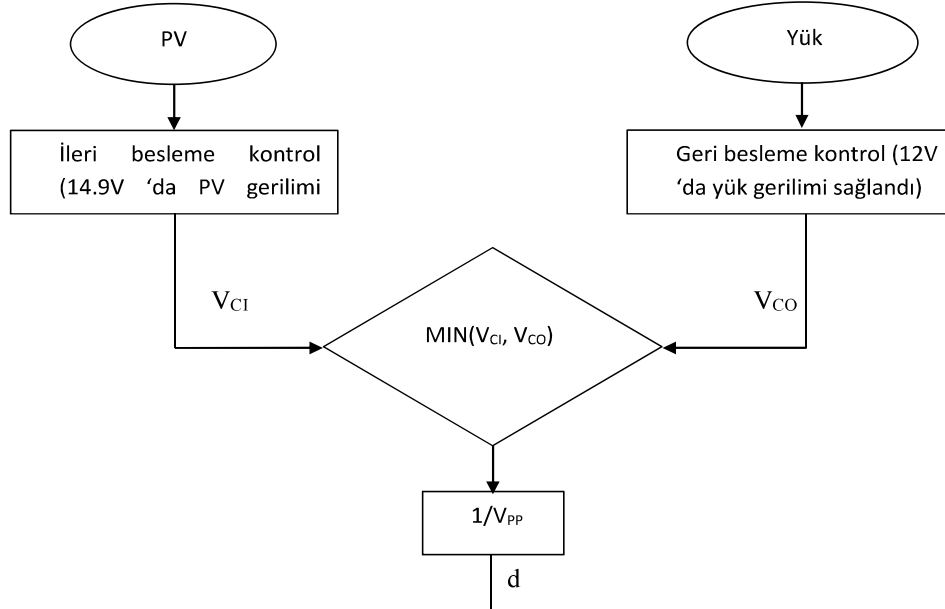
Basit düşük fiyatlı tek bölgeli bir inverter ile MGNT doğru bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Önerilen yöntem iki fonksiyona sahiptir: otomatik olarak gün ışığı seviyesine göre çıkış gücünün ayarlanması ve şebekeye sinüzoidal çıkış gücü verilmesi. Bu yöntem aşağıdaki özelliklere sahiptir [12,23,33]:

- 1) Sabit anahtarlama frekansı
- 2) Düşük çıkış akımı harmonikleri ve yüksek güç faktörü, yani $GF=1$
- 3) Tek bölgeli güç dönüştürücü ile basit devre
- 4) Sadece birkaç lineer birleşene sahip olan basit bir kontrolör, yani DSP veya çoklayıcılar gerekli değil
- 5) Doğru bir şekilde maksimum güç noktası izlenmesi
- 6) Düşük fiyat ve yüksek verimlilik

5.2.14. En İyi Sabit Gerilim Algoritması

İstatistiksel bilgiler bir yılın tüm periyodunda ışıınım şiddeti ve sıcaklık seviyeleri için toplanmaktadır ve MGN’ yi gösteren en iyi sabit gerilim bulunur. Kontrol işlemi en iyi sabit gerilim için PV dizinin çalışma noktasını veya nominal yük geriliminde çıkış gerilimini ayarlar. Bu algoritmanın avantajları basitliği ve uygulamasının kolay olmasıdır.

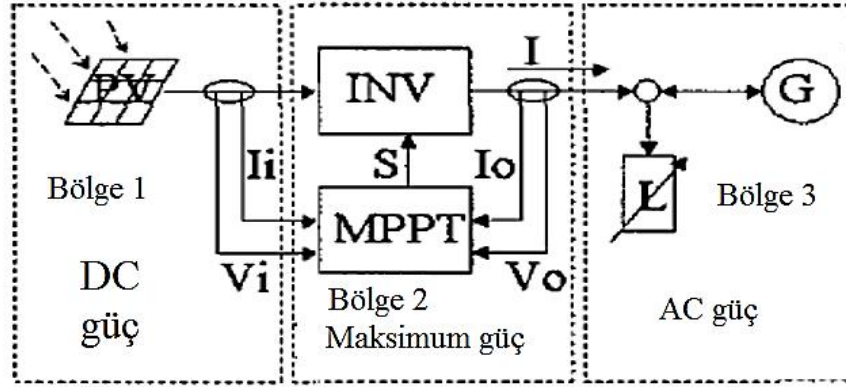
Ancak, verimliliği sınırlıdır ve PV diziden daha fazla güç elde etmek için en iyi sabit gerilimi bulmak iyi matematiksel istatistiklerin araştırılmasına bağlıdır. Fakat çalışma bu nedenle hiçbir zaman tam olarak MGN' de değildir ve farklı bilgiler farklı coğrafi bölgeler için toplanmak zorundadır [12,23,34].



Şekil 5.26. En iyi sabit gerilim algoritması akış şeması [12]

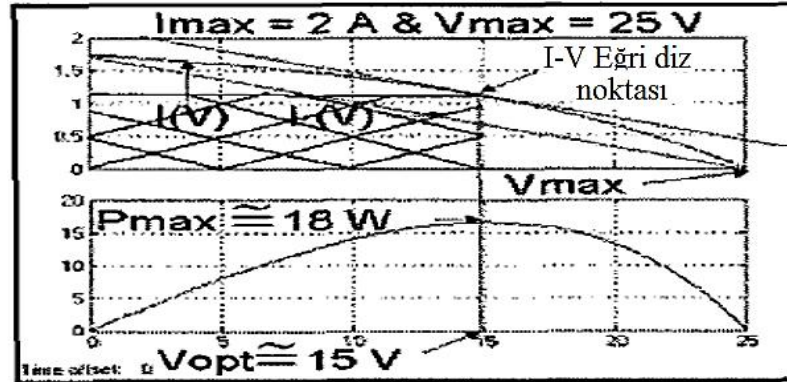
5.2.15. Lineer Tekrar Yönlendirilen Koordinatlar Metodu

Bu metot MGN için PV dizi karakteristik denklemini iterasyonla çözer. Eşitlik, MGN' yi sembolik bir yaklaşımla bulmak için ele alınmaktadır. V_{OC} , I_{SC} ve PV dizi karakteristik eğrisinde sunulan diğer sabitleri ölçmek gereklidir. MGN' ye yaklaşabilmek için kullanılan bu metotta hata %0.3 olarak bulunur, fakat bu simülasyon sonuçlarına dayanmaktadır. Şekil 5.27' de PV güç sisteminin yapısını göstermektedir.



Şekil 5.27. Kullanılan metot için PV inverter sistemi. [12]

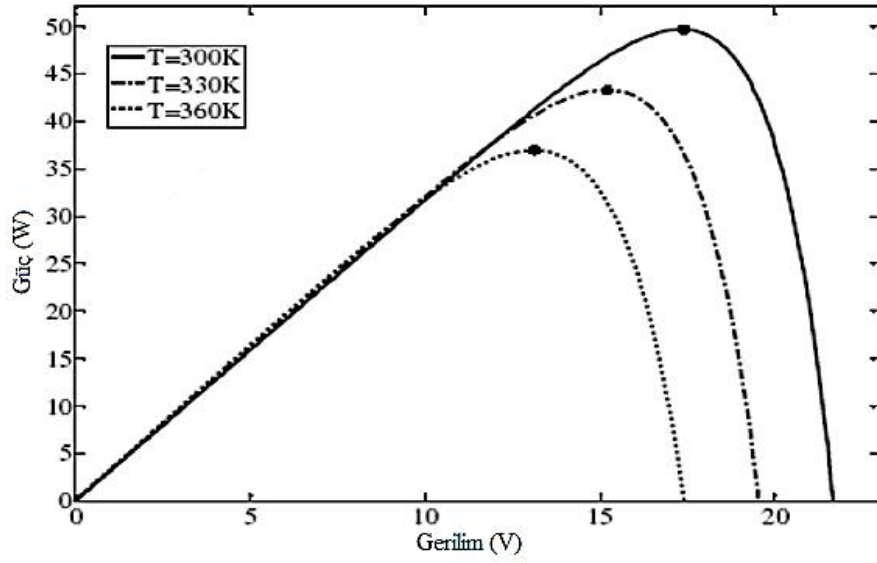
Bu metodun ana düşüncesi Şekil 5.28’deki I-V eğrisinin diz noktasını bulmaktır. I-V eğrisinin diz noktası P_{MAX} ’ı üretmek için optimum akım (I_{OPT}) ve optimum gerilim (V_{OPT}) olduğu noktadır. I-V eğrisi kullanılarak, lineer akım denklemi başlangıçtaki ve sonuçtaki değerlerden belirlenebilir. Diz noktasındaki I-V eğrisinin eğimi lineer akım denkleminin eğimiyle benzerdir [12,23,35].



Şekil 5.28. Lineer tekrar konumlandırılan koordinatlar metodunu P-V ve I-V eğrileri [12,35]

5.2.16. Sıcaklık Metotları

PV hücrenin açık devre gerilimi V_{OV} Şekil 5.29’da gösterildiği gibi hücre sıcaklığı ile değişir. Kısa devre akımı ısıtım şiddeti seviyesiyle direkt olarak orantılıdır ve ısıtım şiddetine bağlı olarak hücre üzerindeki sıcaklık değişir.



Şekil 5.29. Üç farklı sıcaklık için PV panel karakteristiği [12]

PV hücrenin açık devre gerilimi V_{OV} aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir.

$$V_{OV} \cong V_{ovSTC} + (T - T_{STC}) \frac{dV_{OV}}{dT} \quad (5.36)$$

$V_{ovSTC} = 21.8V$ standart test koşulları (STC) altında açık devre gerilimi, $\frac{dV_{OV}}{dT} = -0.08 V/K$ sıcaklık eğimi, T hücre sıcaklığı ($^{\circ}K$) ve T_{STC} , STC altında hücre sıcaklığıdır. Diğer taraftan, optimum gerilim denklem (5.37) ile tanımlanır.

$$V_{op} \cong (u + S \cdot v) - T \cdot (w + S \cdot y) \quad (5.37)$$

Tablo 5.2. Optimum gerilim eşitliğinin parametreleri [12]

$S [W/m^2]$	u	v	w	y
100÷200	0.43404	0.1621	0.00235	-6e-4
200÷300	0.45404	0.0621	0.00237	-7e-4
300÷400	0.46604	0.0221	0.00228	-4e-4
400÷500	0.46964	0.0131	0.00224	-3e-4
500÷600	0.47969	-0.0070	0.00224	-3e-4
600÷700	0.48563	-0.0169	0.00218	-2e-4
700÷800	0.49270	-0.0270	0.00239	-5e-4
800÷900	0.49190	-0.0260	0.00223	-3e-4
900÷1000	0.49073	-0.0247	0.00205	-1e-4

Tablo 5.2 ışı nım şiddeti seviyesi (S) ile ilgili olarak optimum gerilim eşitliğinin her bir parametresini göstermektedir. PV dizi gerilimi (V_{PV}) ve sıcaklık (T)' den en az birinin ölçülmesinin gerekli olduğu iki farklı metot literatürde mevcuttur.

Sıcaklık eğim algoritması eşitlik (5.37)' den açık devre gerilimi V_{OV} ' yi belirlemek için sıcaklık T' yi kullanır. Optimum çalışma gerilimi V_{OP} açık devre çalışma nedeniyle güç kayıplarını önlemek için açık devre gerilim tekniğindeki gibi belirlenebilir.

Sıcaklık parametrik metodunda T ve S' nin ölçülmesiyle eşitlik (5.35)' den anlık olarak açık devre gerilimi V_{OP} belirlenir. Bu nedenle ışı nım şiddeti S' nin ölçülmesi de gereklidir [12,18,36]

5.2.17. Biyolojik Sürü Takip Algoritması

Yeni bir PV maksimum güç noktası izleme metodudur. Biyolojik sürü takibi davranışına dayanmaktadır. Modüllerle birleştirilmiş PV güç sistemi için MGNT performansını arttırdığı ileri sürülmektedir. Her bir modül ayrı bir parça olarak göz önüne alınır; sonuç olarak maksimum güç noktası hareketli bir hedef olarak görülmektedir. Böylece, her PV modül otomatik olarak maksimum güç noktasını takip edebilir. Teorik olarak deneyler geçici durumdaki maksimum güç noktası takip performansını açıkça geliştirdiğini kanıtlamaktadır. Tipik D&G MGNT metodu ile önerilen Bio-MGNT karşılaştırıldığında, MGNT veriminin geçici durumda yaklaşık %12.19 iyileştirmektedir. Deneysel sonuçlar ileri sürülen Bio-MGNT algoritmasının değişen çevreye iyi adapte olabileceğini, uyumlu ve kuvvetli olduğunu göstermektedir. Bir kontrolöre bu metodu uygulamak için ihtiyaç duyulmaktadır [12,37]

5.2.18. Değişebilen İndüktans MGNT Metodu

Son yıllarda PV' lere artan bir ilgi vardır ve bu maksimum güç noktası takibinde (MGNT) daha ileri çalışmalara yol açmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde MGNT normal olarak D&G veya artan iletkenlik metotlarıyla gerçekleştirilmektedir. Artan iletkenlik yaklaşımında, PV panelin çıkış direnci maksimum güç teoreminde de bahsedildiği gibi yük direncine eşitlenecektir. Bu Şekil 5.32' de gösterildiği gibi çalışma noktasıyla ilgili PV panelin I-V karakteristiğinin lineerliğiyle gösterilebilir. Böylece maksimum güç noktasında eşdeğer direnç r takip eden eşitlik ile bulunabilir:

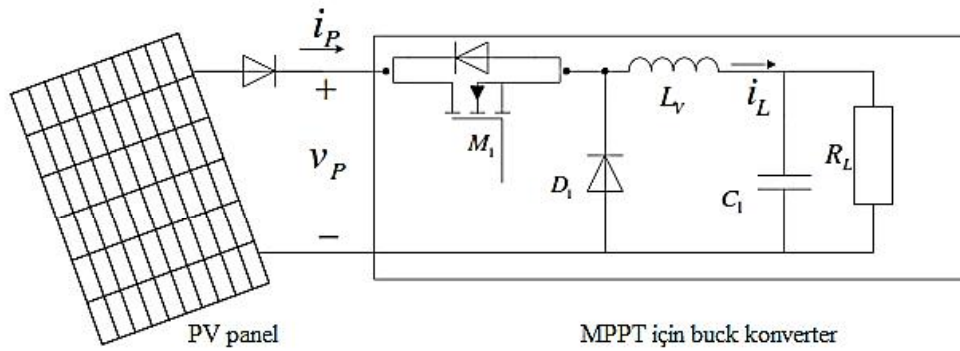
$$-r = -\frac{\Delta V}{\Delta I} = R_{LR} = \frac{V_P}{I_P} \quad (5.38)$$

R_{LR} , MGNT' yi gerçekleştirmek için düzenlenen dirençtir. V_P ve I_P MGN' de PV gerilimi ve akımıdır.

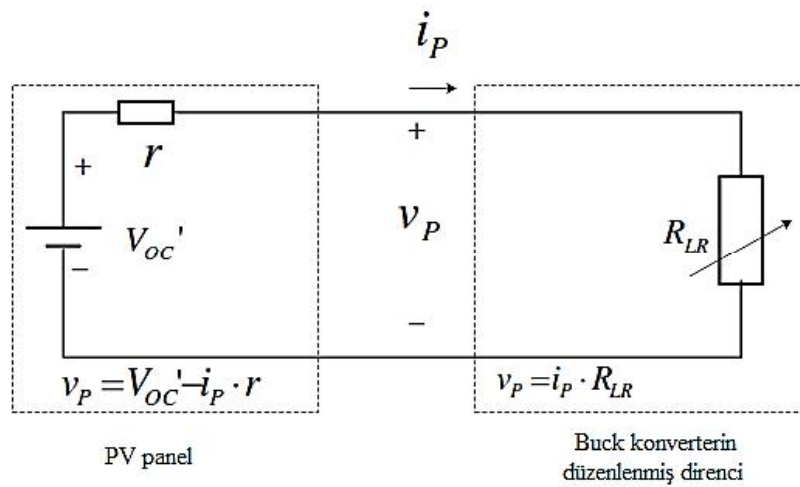
Asıl yük direnci görev periyodu D ' nin kontrolüyle buck dönüştürücüyle R_{LR} ' ye eşitlenir. Düzenlenen direnç R_{LR} :

$$R_{LR} = \frac{1}{D^2} R_L \quad (5.39)$$

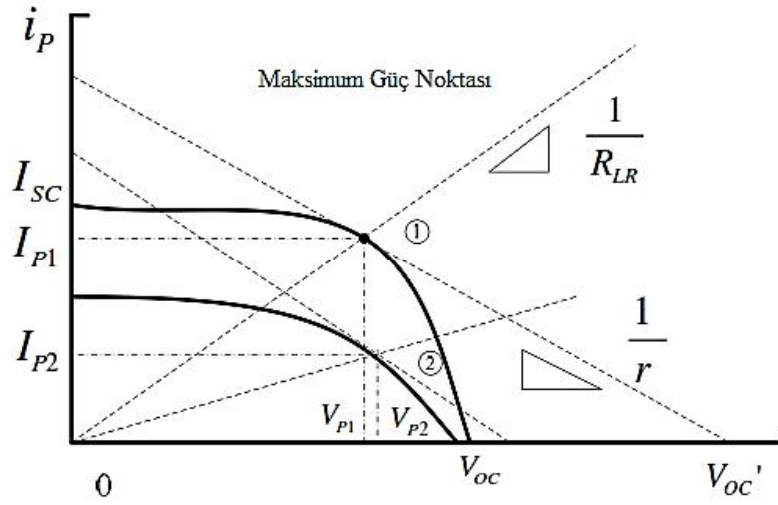
D buck dönüştürücünün görev periyodudur ve R_L buck dönüştürücülerin yük direncidir.



Şekil 5.30. Bir PV modülde maksimum güç transferi [20]



Şekil 5.31. Thevenin eşdeğer devresi [20]



Şekil 5.32. Empedans izleyiciye dayanan MGNT [20]

Şekil 5.32’deki 1 ve 2 noktalarındaki ışınım şiddetinin iki seviyesi göz önüne alınırsa, MGN akımı MGN ‘de PV direncinin değerinin değiştiği 1 noktasından 2 noktasına azalacaktır. MGNT’yi gerçekleştirmek için, düzenlenen direnç R_{LR} denklem (5.37)’deki görev periyodu D’ nin değiştirilmesiyle ayarlanabilir.

Buck dönüştürücü denklem (5.37)’yi gerçekleştirmek için sürekli akım modunda (CCM) çalıştırılmalıdır. Sürekli olmayan iletkenlik modunda bu ilişki geçerli değildir ve dönüştürücünün dengeli çalışması çok karmaşıktır. Sürekli iletkenlik modunda yük gücü değişimi için, görev periyodu geçiş süresi boyunca değişir, fakat sürekli durumda V_{out}/V_{in} eski haline döner. Diğer taraftan sürekli olmayan iletkenlik durumunda güç kullanılmayan zamanın bir fonksiyonudur ve bu nedenle farklı kontrol stratejileri CCM’den DCM’ye ve tam tersi çift kontrol hareketini içermesi gereklidir.

CCM’de buck dönüştürücüde minimum indüktans aşağıdaki gibi verilmektedir:

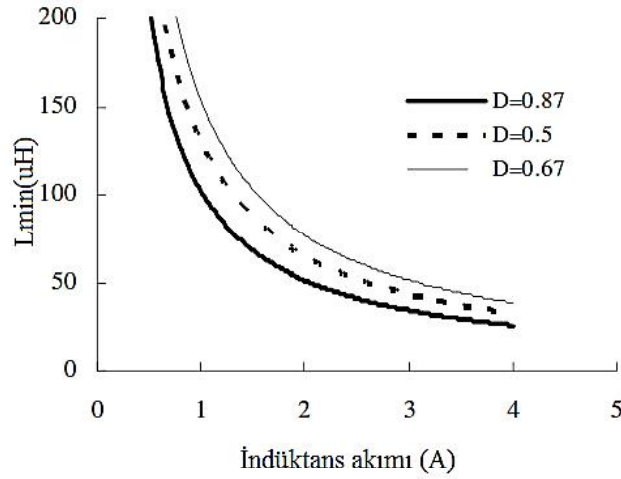
$$L_{min} = \frac{R_L(1-D)}{2f_s} \quad (5.40)$$

f_s , anahtarlama frekansıdır.

Minimum indüktansın elde edilmesi için (5.38), (5.39) ve (5.40)’ün birleştirilerek tekrar ifade edilir.

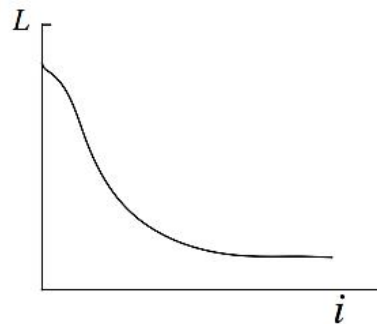
$$L_{min} = \frac{D^2(1-D)V_P}{2f_s I_P} \quad (5.41)$$

Böylece minimum indüktans D görev periyodunun bir fonksiyonudur ve sabit anahtarlama frekansı ($f_s=20\text{kHz}$) altında I_P PV panelin çıkış akımıdır. Farklı görev döngüleri altında minimum indüktansın karakteristikleri Şekil 5.33’ de gösterilmektedir.



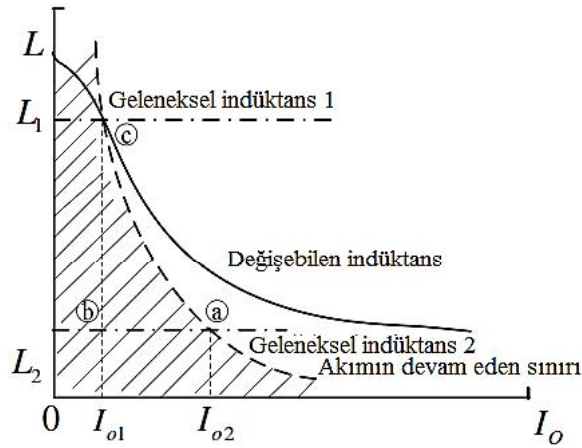
Şekil 5.33. Farklı yük durumları altında minimum indüktansın karakteristikleri [20]

Açıkça CCM’ yi gerçekleştirmek için minimum indüktans güneş yoğunluğu arttığı gibi düşer. Düşük yüklerde gerekli olan indüktansın yüksek değeri indüktans büyüklüğü arttırılmadan gerçekleştirilebilir. Değişebilen indüktans çekirdeği akım artışıyla sürekli saturasyona sokularak eğimli hava boşluğu kullanılarak gerçekleştirilebilir. Alternatif olarak, güçlü bir demir çekirdek Şekil 5.34’ de verilen L -i karakteristiğini elde etmek için arttırılan akımla düzenli olarak saturasyona sokmak için kullanılabilir.



Şekil 5.34. Değişebilen indüktansın karakteristikleri [20]

Buck dönüştürücünün sürekli çalışmasında değişebilen indüktansın rolü şekil % referansı ile açıklanabilir. Sürekli iletkenlik sadece Şekil 5.35’ de kesik çizgiyle gösterilen akımın üstündeki indüktans değerleriyle gerçekleştirilebilir. Düşük ısıtım şiddetinin karşılığı olan indüktansın en düşük sınırı indüktans değeri L_1 ’ den büyük olduğu sürece I_{o1} ile verilmektedir. Yüksek akım I_{o2} ’ de (ve yüksek ısıtım seviyelerinde) en küçük indüktans L_2 ’ nin alacağı değerin azaltılması avantajının eklenmesiyle yeterli olacaktır. Tersine L_2 ‘de ayarlanan indüktans I_{o2} ’ den daha büyük akım değerleri için düşük yük aralığıyla sınırlandırılacaktır. Şekil 5.34’ de gösterilen L-i karakteristiği ile değişebilen indüktans yük aralığının artması ve %60’ a kadar indüktans değerinin azaltılması avantajına sahiptir.



Şekil 5.35. Değişebilen indüktans ile bir MGNT DA/DA dönüştürücüde CCM durumlarının karşılaştırılması [20]

İndüktans üzerindeki gerilim akı ilişkisiyle ilgilidir ve bunun dönüşümü akımla ilgilidir, akımda indüktansın bağımlılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V = \frac{d\lambda}{dt}, \quad (5.42a)$$

$$\lambda = L(i) \cdot i; \quad (5.42b)$$

$$V = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}, \quad (5.42c)$$

$$V = (L + i \frac{dL}{di}) \frac{di}{dt}, \quad (5.42d)$$

$$V = L_{eff} \frac{di}{dt} \quad (5.42e)$$

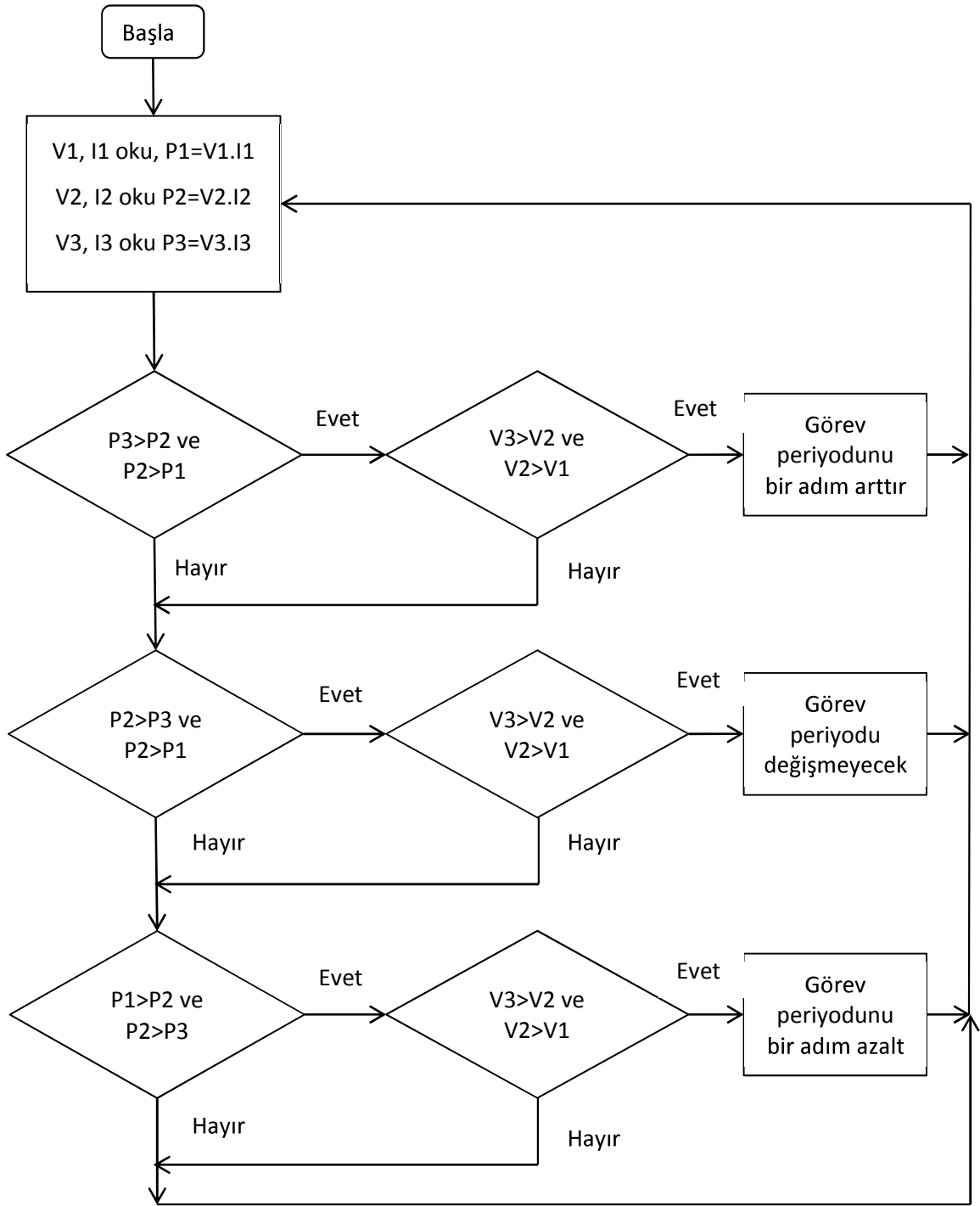
L_{eff} indüktansın L/i karakteristiğinden kolayca bulunabilir [12,20].

6. GERÇEKLEŞTİRİLEN HİBRİT MGNT METODU VE MATLAB SİMÜLASYONLARI

6.1. Üç Nokta Güçlerini Karşılaştırma Metodu

Bu metod D&G metodundan geliştirilmiş bir tekniktir ve ışıının şiddetinin hızlı değişim gösterdiği durumlarda çalışma noktasının hızlıca hareket etme zorunluluğunu ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Işıının şiddeti sabit olduğu zaman MGNT hızlı bir şekilde gerçekleştirilir ve güç kayıpları düşüktür. Üç nokta gücünü karşılaştırma metodu değişimin yönüne, P-V eğrisi üzerindeki üç noktada PV çıkış gücünü karşılaştırarak karar vermektedir. Bu üç nokta şu anki çalışma noktası A, A noktasında bir değişimle elde edilen nokta B ve B' den karşıt yönde iki kat daha büyük bir değişimle elde edilen nokta C' dir [10,18]. A ve B noktaları için B noktasının gücü A noktasınıninkine eşit veya büyük ise durum pozitif önem arz etmektedir. Aksi halde negatif önem arz eder. A ve C noktaları için C noktasının gücü A noktasınıninkinden küçükse durum pozitif önem arz etmektedir. Aksi halde negatif önem arz eder. Bu üç ölçüm noktasının ikili karşılaştırmalarında eğer ikisi pozitif önem durumundaysa, dönüştürücünün görev periyodu arttırılmalıdır. Karşıt olarak iki tanesi negatif önem durumdaysa, dönüştürücünün görev periyodu azaltılmalıdır. Biri pozitif diğeri negatifse, MGN' ye ulaşıldığı anlaşılmaktadır.

Üç nokta gücünü karşılaştırma metodu, maksimum güç noktasını takip etmek için sıkça kullanılan D&G metodunun osilasyon problemlerini önlemektedir [12]. Bu metoda ait akış şeması Şekil 6.1' de verilmektedir.



Şekil 6.1. Üç nokta gücünü karşılaştırma metoduna ait akış şeması

6.2. Beta MGNT Metodu

Beta metodu β ara değişkeni eşitliği ile maksimum güç noktasına yaklaşmaktadır [1,6]. Bu metot hızlı ve doğru izleme avantajına sahiptir.

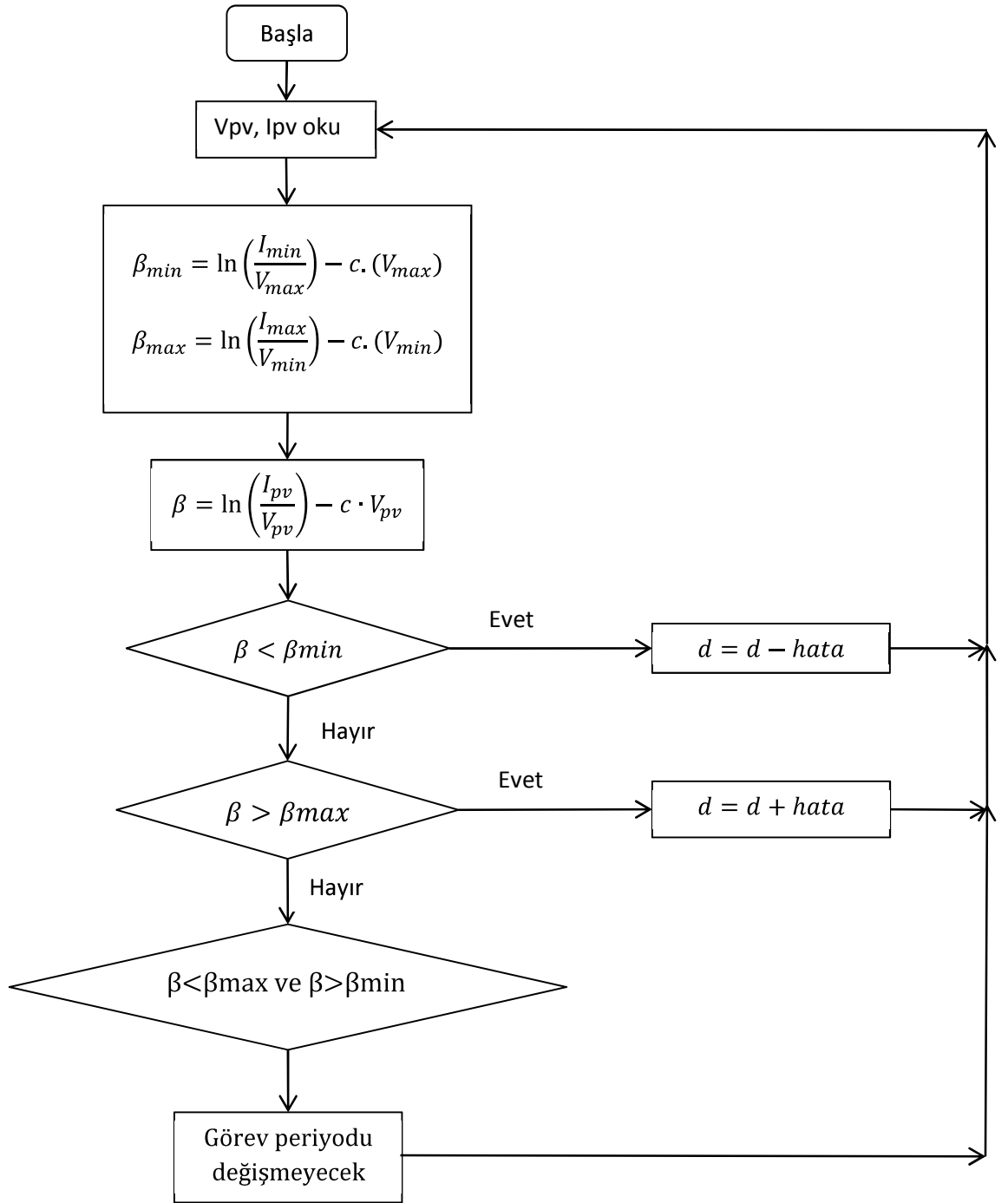
$$c = \frac{q}{\eta \cdot k \cdot T \cdot N_s} \quad (6.1)$$

$$\beta = \ln \left(\frac{I_{pv}}{V_{pv}} \right) - c \cdot V_{pv} \quad (6.2)$$

Denklem 6.1’ de c; elektron yüküne, panelin kalite faktörüne, Boltzmann sabitine, sıcaklığa ve seri fotovoltaiik hücre sayısına bağılı bir sabittir. Çalışma şartları değışse bile β değeri optimum bir aralıkta hemen hemen sabit kalmaktadır. β değeri panelin akım ve gerilimi kullanılarak sürekli hesaplanmaktadır [13, 14].

Dizinin MGN’ ye yaklaşması için dar bir band aralığında kalan β değeri gözlenmektedir. β ’ nın izlenmesiyle çalışma noktası hızlı bir şekilde büyük çalışma adımları kullanılarak hareket etmektedir. MGN’ ye yaklaşıldığında çalışma adımları küçülmektedir. Diğer taraftan geleneksel MGNT teknikleri tam MGN izlemek için kullanılırken beta metodu MGN’ ye yaklaşmaktadır [15].

Uygulanan β metoduna ait algoritma Şekil 6.2’ de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Uyguladığımız beta metodunun akış şeması

6.2. Hibrit MGNT Metodu

Bu metotta beta ve üç nokta güçlerini karşılaştırma metodlarının diğer metotlara göre üstünlük sağladığı noktalar alınarak hibrit bir metot elde edilmiştir. Beta algoritması birkaç iterasyon ile asıl maksimum güç noktasına çok yakın bir noktaya çalışma noktasını getirir.

Bu işlem yapılırken beta değeri için bir referans aralığı kullanılmaktadır. Bu referans aralığı içinde beta değeri yer alıncaya kadar beta algoritması çalışmaktadır. Beta referans aralığı V_{max} ve V_{min} değerleri kullanılarak elde edilmiştir. P-V eğrisine göre beta değerinin değişimi Şekil 6.3' de verilmektedir. β_{max} ve β_{min} değerlerini elde etmek için ilk olarak I_{max} ve I_{min} değerleri hesaplanmıştır. I_{max} ve I_{min} değerleri denklem (6.3) ve (6.4)' de verilmektedir.

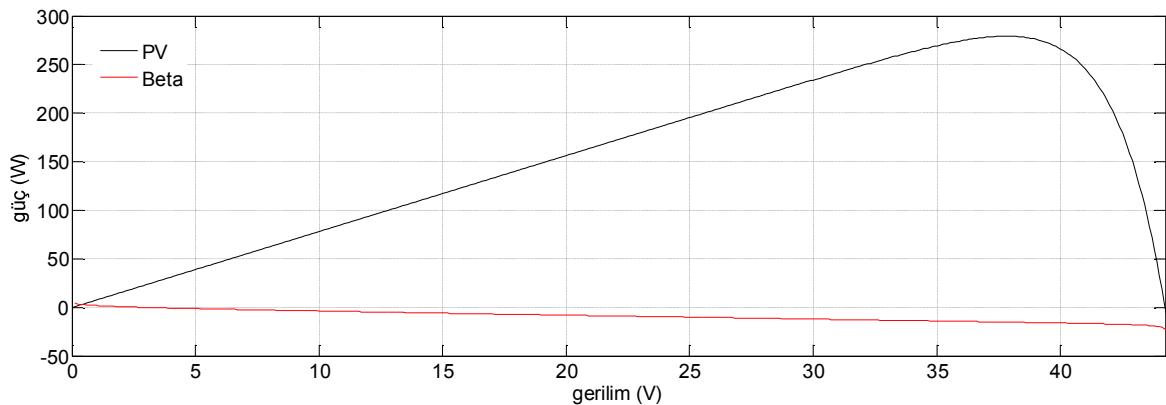
$$I_{min} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{max}}{V_{ta}} \right) - 1 \right] \quad (6.3)$$

$$I_{max} = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{min}}{V_{ta}} \right) - 1 \right] \quad (6.4)$$

Bu akım değerlerini elde etmek için maksimum ve minimum gerilim değerleri belirlenmiştir. Gerilimin maksimum ve minimum olarak belirlendiği değerler ile betanın maksimum ve minimum olduğu değerler arasında karşıt bir ilişki vardır. $V_{\beta_{min}}$ için β_{max} değerindedir, $V_{\beta_{max}}$ için ise β_{min} değerindedir. Gerilim değerleri belirlenirken ise MGN' nin içinde yer alabileceği en geniş gerilim aralığı seçilmiştir. β_{max} ve β_{min} değerleri denklem (6.5) ve (6.6)' da verilmektedir.

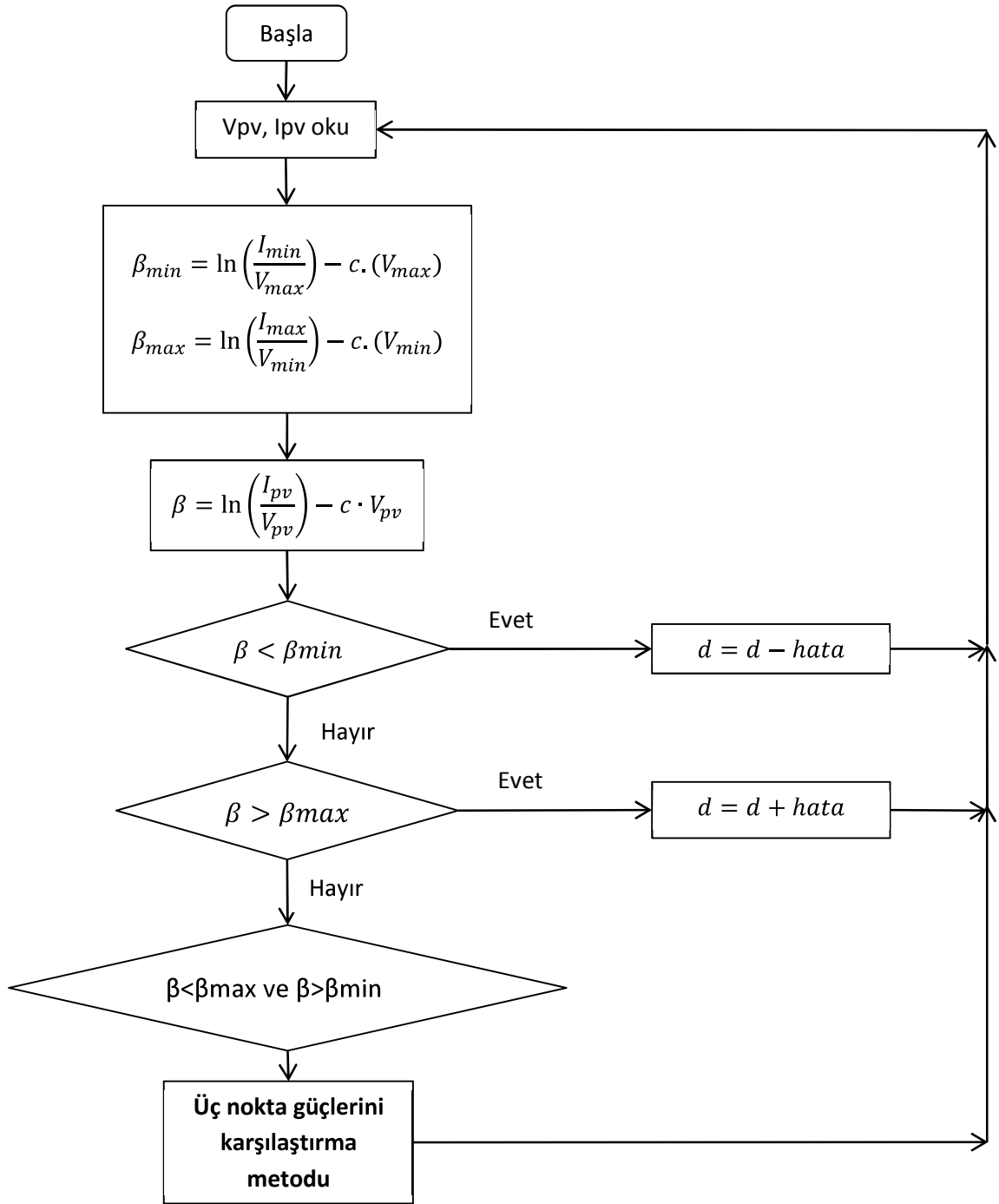
$$\beta_{min} = \ln \left(\frac{I_{min}}{V_{max}} \right) - c \cdot (V_{max}) \quad (6.5)$$

$$\beta_{max} = \ln \left(\frac{I_{max}}{V_{min}} \right) - c \cdot (V_{min}) \quad (6.6)$$



Şekil 6.3. Beta değerinin güç-gerilim eğrisine göre değişimi

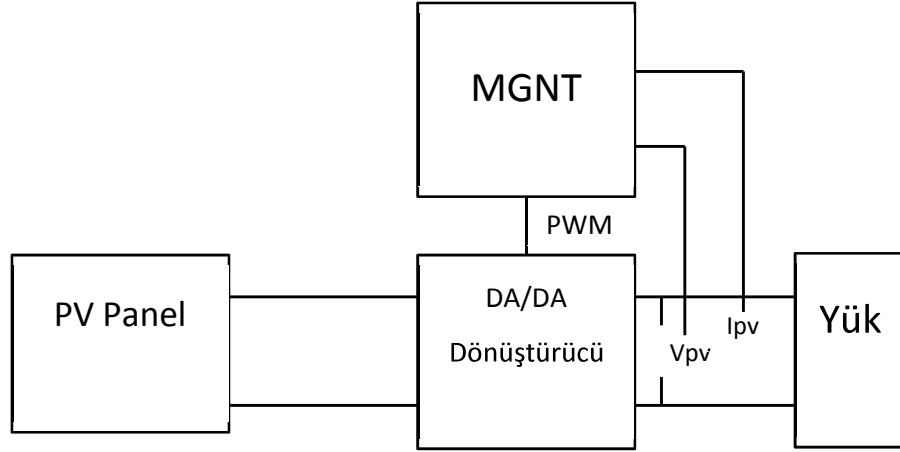
Beta referans aralığına girildikten sonra üç nokta gücünü karşılaştırma metodu devreye girmektedir. Üç nokta gücünü karşılaştırma metodu, değişimin yönüne P-V eğrisi üzerindeki üç noktada PV çıkış gücünü karşılaştırarak karar vermektedir ve MGN takibini gerçekleştirmektedir. Beta değeri belirtilen referans aralığı içinde olduğu sürece üç nokta gücünü karşılaştırma metodu çalışmaktadır. Bu metoda ait akış şeması Şekil 6.4' de verilmektedir.



Şekil 6.4. Hibrit metoda ait akış şeması

6.3. MGNT Devre Konfigürasyonu

Uygulanan MGNT sistemi PV panel, DA/DA dönüştürücü, MGNT bloğu ve yükten oluşmaktadır. Bu sisteme ait devre konfigürasyonu Şekil 6.5' de verilmektedir.



Şekil 6.5. MGNT devre konfigürasyonu

Simülasyonda PV panel çıkışında yer alan DA/DA dönüştürücü çıkışından alınan akım ve gerilim bilgileri MGNT bloğunda değerlendirilmekte ve MGNT bloğu çıkışında PWM sinyali üretilmektedir. Bu PWM sinyali ile DA/DA dönüştürücünün kontrolü gerçekleştirilmektedir. Gerçekleştirilen bu kontrolle PV panelin MGN' de çalışması sağlanmaktadır.

6.4. PV Panelin Modellenmesi

Burada PV panel temel akım denklemleri kullanılarak modellenmiştir. PV panelin ürettiği akım ışıyım şiddetinin lineerliğine bağlıdır ve denklem (6.7)' den görüldüğü gibi sıcaklık değişimlerinden de etkilenmektedir.

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (6.7)$$

Burada I_{pv} PV panelin ürettiği akım, K_I açık devre akım katsayısı, G panel yüzeyindeki ışıyım şiddeti, G_n nominal ışıyım şiddeti (25°C ve 1000W/m^2), $I_{pv,n}$ nominal ışıyım şiddetinde PV panelin ürettiği akım, T gerçek sıcaklık, T_n nominal sıcaklık, ΔT sıcaklık farkı ($\Delta T = T - T_n$)' dır.

Saturasyon akımı aşağıdaki denklem (6.8) ve (6.9)' dan elde edilmektedir.

$$V_t = N_s k T / q \quad (6.8)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_I \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \Delta T}{V_{t,n} A}\right) - 1} \quad (6.9)$$

Burada N_s seri hücre sayısı, k Boltzmann sabiti (1.38×10^{-23} C), q elektron yükü (1.602×10^{-19} C), K_V açık devre gerilim katsayısı, $I_{sc,n}$ nominal kısa devre akımı, $V_{oc,n}$ nominal açık devre gerilimi, $V_{t,n}$ nominal seri hücre gerilimi, V_t seri hücre gerilimidir.

PV panel çıkışından alınacak akım ise denklem (6.10)' dan elde edilmektedir.

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{V_{t,n} A}\right) - 1 \right] \quad (6.10)$$

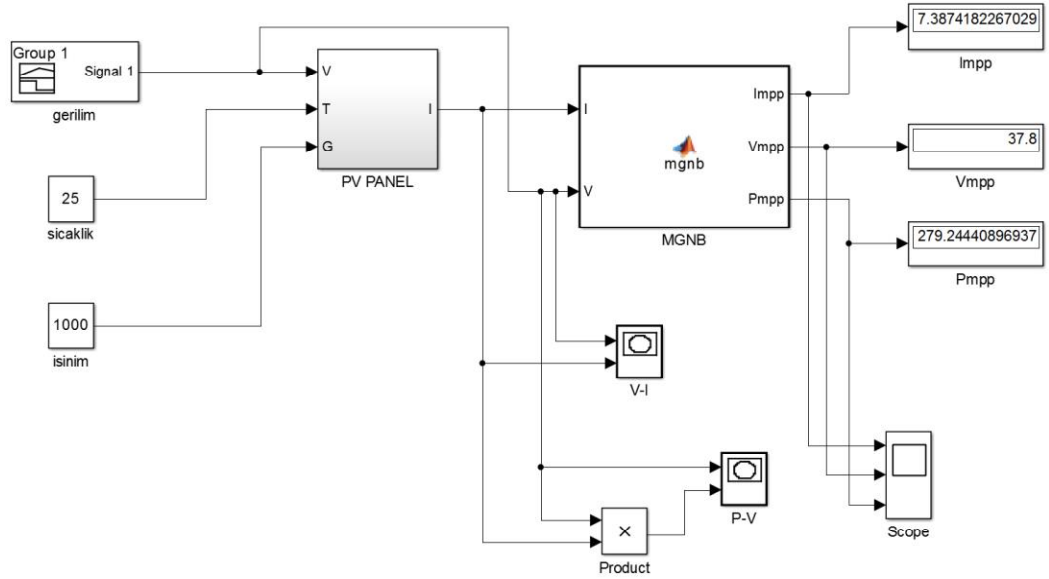
Burada A diyot sabitidir, isteğe bağlı olarak seçilebilir, genellikle 1 ile 1.5 arasında seçilmektedir, I ise PV panel çıkışından aldığımız akım değeridir [38,39,40,41,42]

Tablo 6.1. SL280-24M yüksek verimlilikli mono-kristal solar panel değerleri

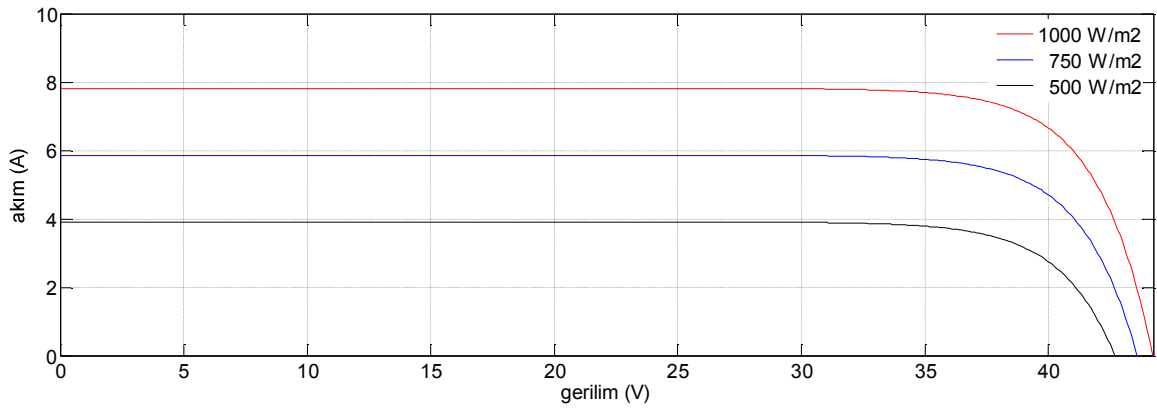
SL280-24M Yüksek Verimlilikli Mono-Kristal Solar Panel	
Seri Solar Hücre Sayısı	72
Nominal Tepe Gücü (W_p)	280 W
Nominal Gerilim (V_{mp})	35.8 V
Nominal Akım (I_{mp})	7.82 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	44.5 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	8.86A
Panel Verimi	%14.2
Çalışma Sıcaklığı	-40~+85°C
Nominal Çalışma Hücre Sıcaklığı (NOCT)	45±2°C
Gerilim Sıcaklık Katsayısı	-0.35%/°C
Akım Sıcaklık Katsayısı	+0.055%/°C
Güç Sıcaklık Katsayısı	-0.45%/°C
Minimum Güç Hatası	±%3

Tablo 6.1' de yer alan SL280-24M model PV panele ilişkin katalog değerleri PV panel modelini oluşturmak için kullanılmıştır.

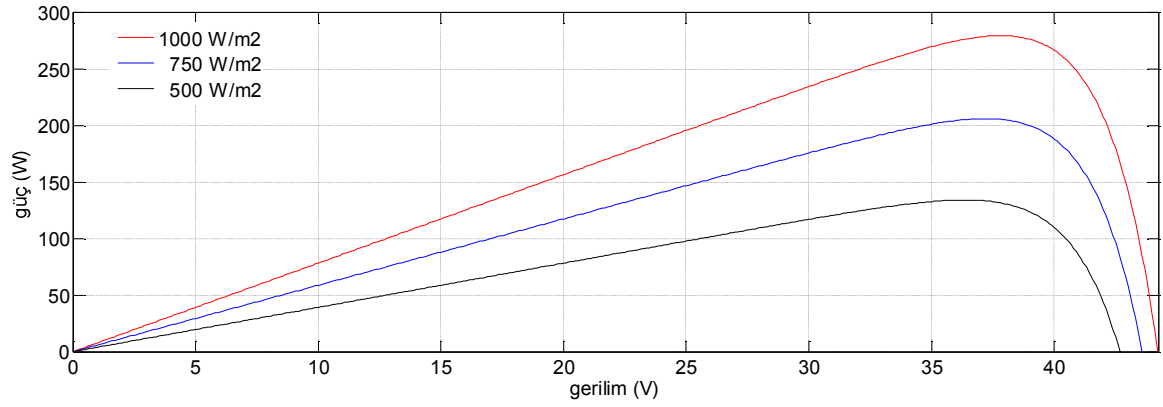
Elde edilen matematiksel ifadeler kullanılarak 280W gücünde PV panelin Matlab/Simulink modeli gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda PV panelin MGN akımı, gerilimi ve gücü gerilim tarama algoritması yardımıyla hesaplanmıştır. Kurulan sistem Şekil 6.6' de verilmektedir.



Şekil 6.6. PV panelin modellenmesi ve MGN değerlerinin bulunması



Şekil 6.7. I-V eğrisi

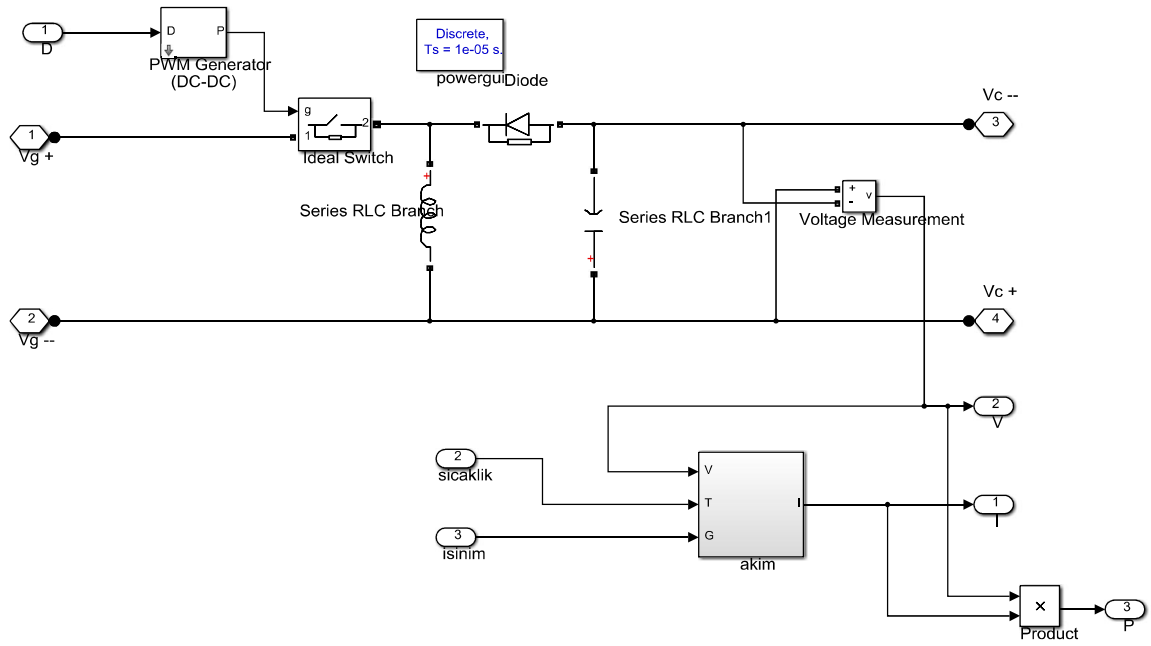


Şekil 6.8. P-V eğrisi

Bu panele ait I-V ve P-V eğrileri de Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’ de verilmiştir. Bu eğriler sırasıyla 1000 W/m^2 , 750 W/m^2 ve 500 W/m^2 ışıınım değerleri için azalan şekilde verilmiştir.

6.5. DA/DA Buck-Boost Dönüştürücünün Modellenmesi

PV panel çıkışındaki gerilimi hem düşürebilmek, hem de yükseltebilmek amacıyla DA/DA buck-boost dönüştürücü tercih edilmiştir. Dönüştürücü yardımıyla PV panel çıkış gerilimi MGN gerilim değerine, uygulanan algoritma ile getirilmektedir. Kullanılan DA/DA buck-boost dönüştürücüye ilişkin simulink bloğu Şekil 6.9’ da gösterilmektedir.



Şekil 6.9. Buck-boost dönüştürücünün simulink modeli

DA/DA dönüştürücüye, MGNT algoritması yardımıyla belirlenen D görev periyodu değeri uygulanmaktadır. Bu değer 0-1 aralığında bir değerdir. D görev periyodu DA/DA dönüştürücü anahtarına PWM (Pulse Width Modulation) sinyali olarak uygulanmaktadır. Böylece DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimi kontrol edilmektedir [45,46].

6.6. MGNT Devresinin Modellenmesi

MGNT devresinin modellenmesinde Matlab Function bloğu kullanılmıştır. Her bir MGNT algoritmasına ait program Matlab Function bloğu içerisine yerleştirilmiştir. Bu bloğa giriş olarak dönüştürücü çıkışından aldığımız akım ve gerilim değerleri girilmiştir. Ayrıca bu akım ve gerilim değerlerini algoritmada değerlendirebilmek için gerekli olacak gecikmeler Matlab’ da yer alan hafıza blokları yardımıyla veya program içinde gerçekleştirilecek bir gecikme döngüsüyle sağlanmıştır.

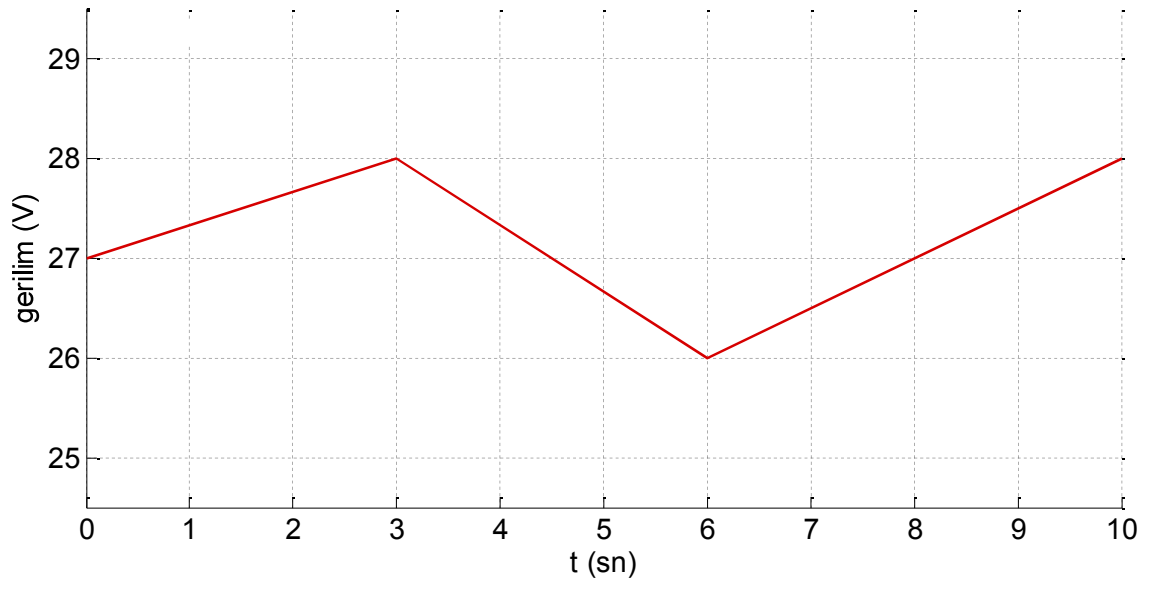
6.7. Tüm Sistem Modelinin Gerçekleştirilmesi

PV panel çıkışı dönüştürücü girişine bağlanarak, PV panel çıkış gerilimi dönüştürücüye giriş gerilimi olarak uygulanmaktadır. Dönüştürücü çıkışında ise yük beslenmektedir. Dönüştürücü çıkış gerilimi ve akımı MGNT devresi tarafından takip edilmektedir.

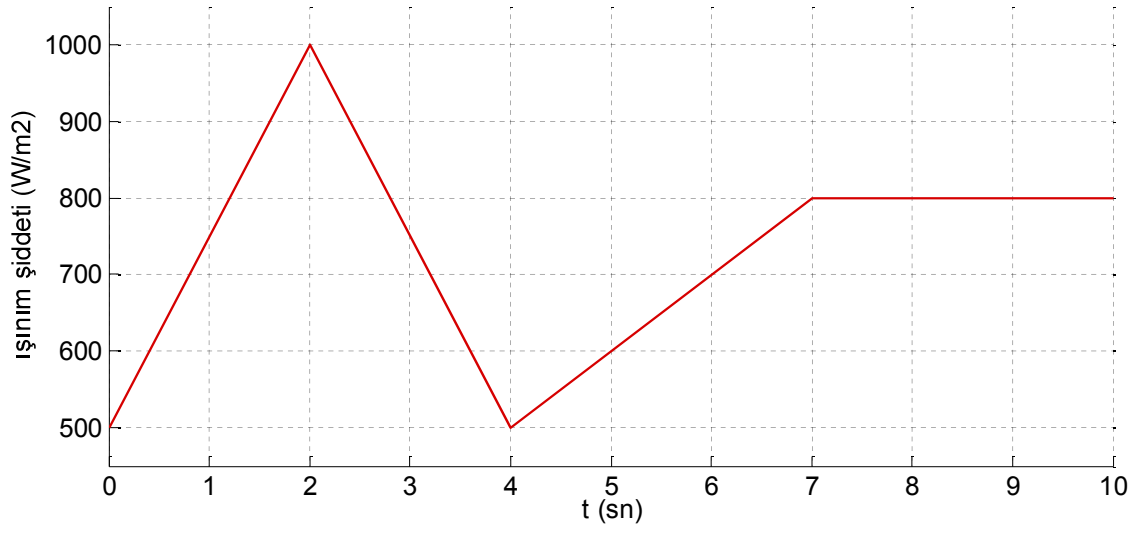
Dönüştürücü çıkışından alınan gerilim ve akım MGNT algoritmaları yardımıyla değerlendirilerek dönüştürücü anahtarına uygulanacak olan PWM sinyalinin görev periyodunu belirleyen D değeri elde edilmektedir. Bu PV sisteme ilişkin simulink modeli Şekil 6.10' da gösterilmektedir.

Şekil 6.10. Gerçekleştirilen uygulamanın simülasyon modeli

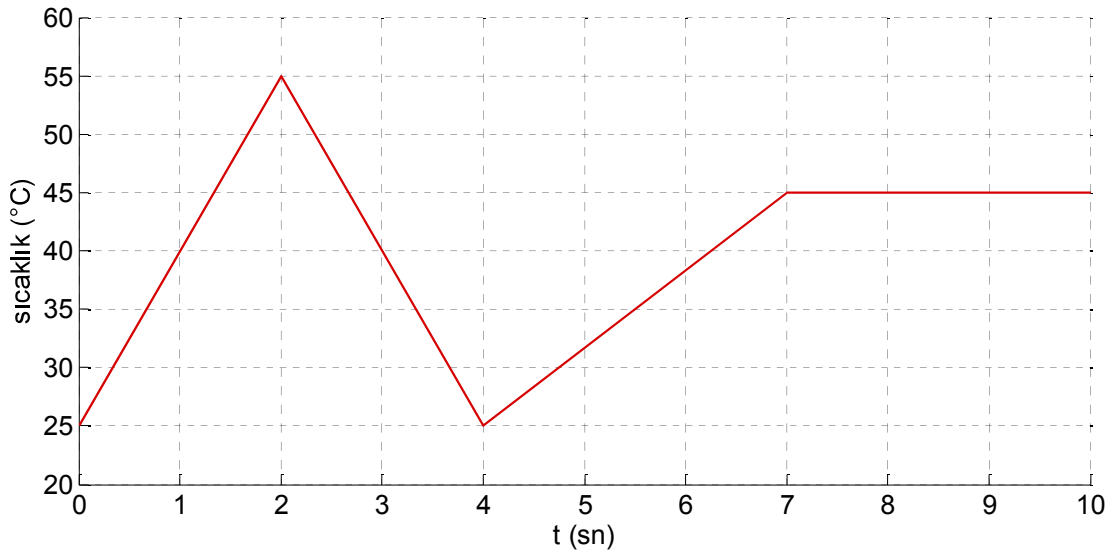
Bölüm 5 ve Bölüm 6’ da verilen MGNT algoritmaları kullanılarak Matlab/Simulink modelleri gerçekleştirilmiştir. Her algoritma için giriş verisi olarak aynı sıcaklık, ışıınım şiddeti ve gerilim değeri kullanılmıştır. Bu değerler Matlab/Simulink’ de Signal Builder blokları yardımıyla sisteme girilmiştir. Her metodun 10^{-6} ve 10^{-5} olmak üzere iki farklı temel örnekleme zamanında simülasyonu gerçekleştirilmiştir. 10^{-6} temel örnekleme zamanında gerçekleştirilen simülasyonlarda kullanılan sıcaklık, ışıınım ve gerilim değerlerine ait giriş sinyalleri sırayla Şekil 6.11 (a), (b) ve (c)’ de verilmektedir.



(a)



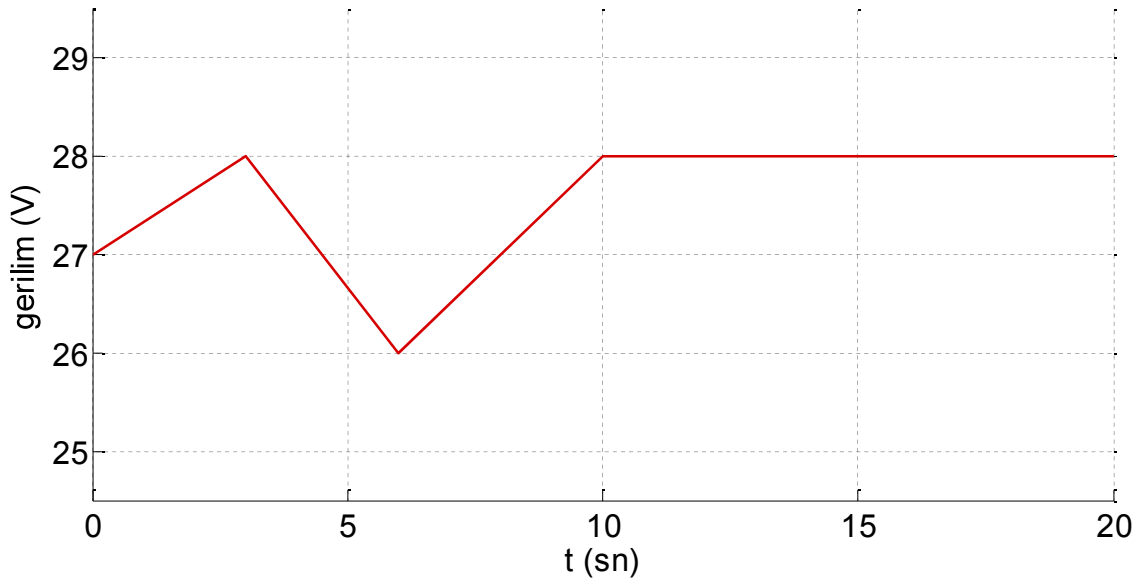
(b)



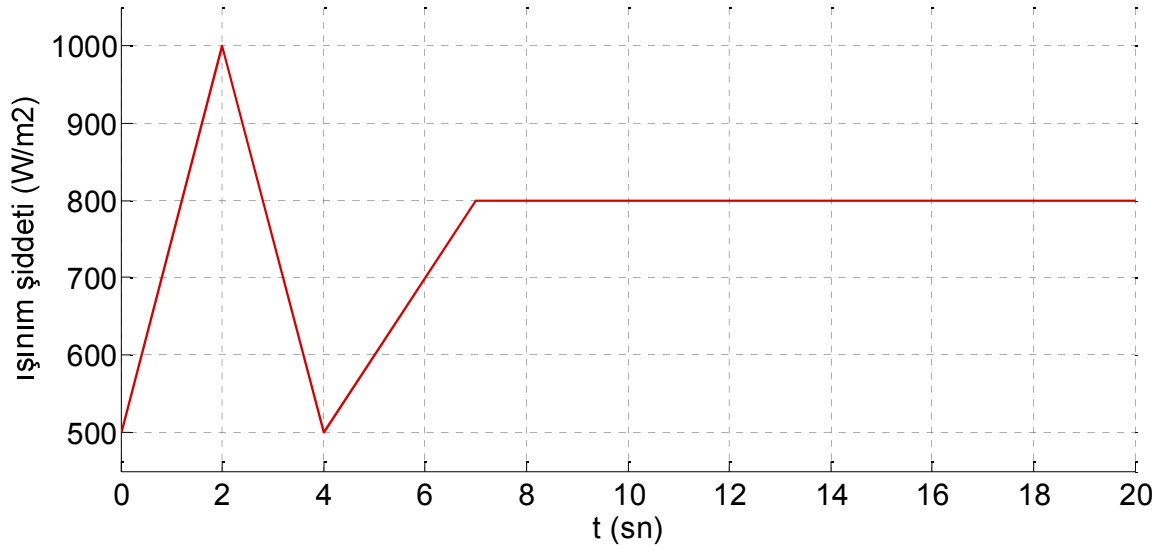
(c)

Şekil 6.11. 10^{-6} temel örnekleme zamanı için sistem giriş sinyalleri: (a) gerilim sinyali, (b) ısıtım sinyali, (c) sıcaklık sinyali

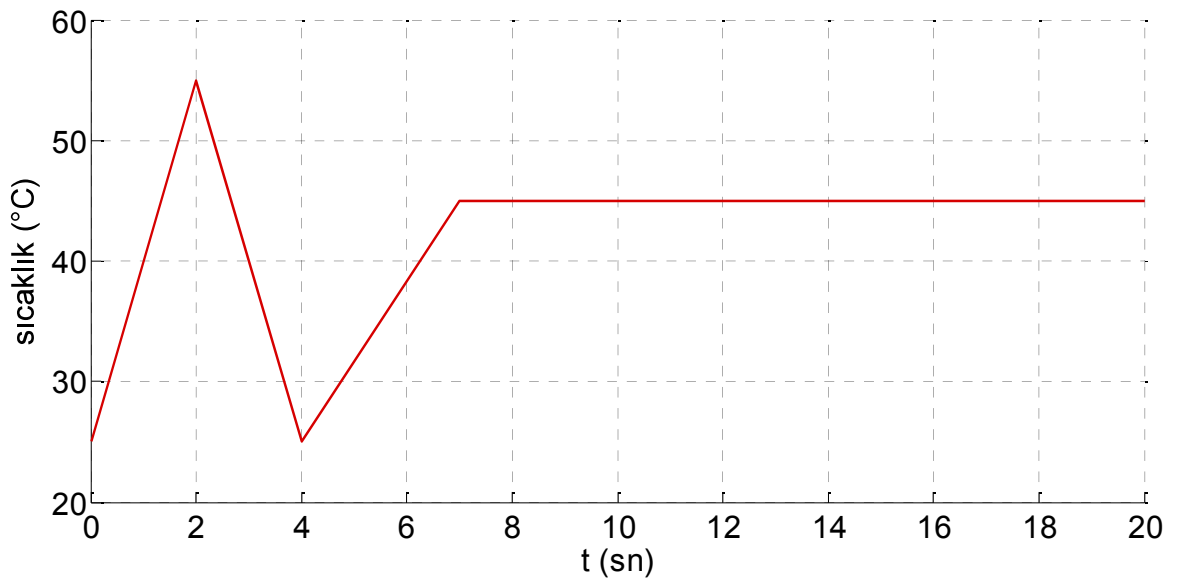
10^{-5} temel örnekleme zamanında gerçekleştirilen simülasyonlarda kullanılan sıcaklık, ısıtım ve gerilim değerlerine ait giriş sinyalleri sırayla Şekil 6.12 (a), (b) ve (c)' de verilmektedir.



(a)



(b)



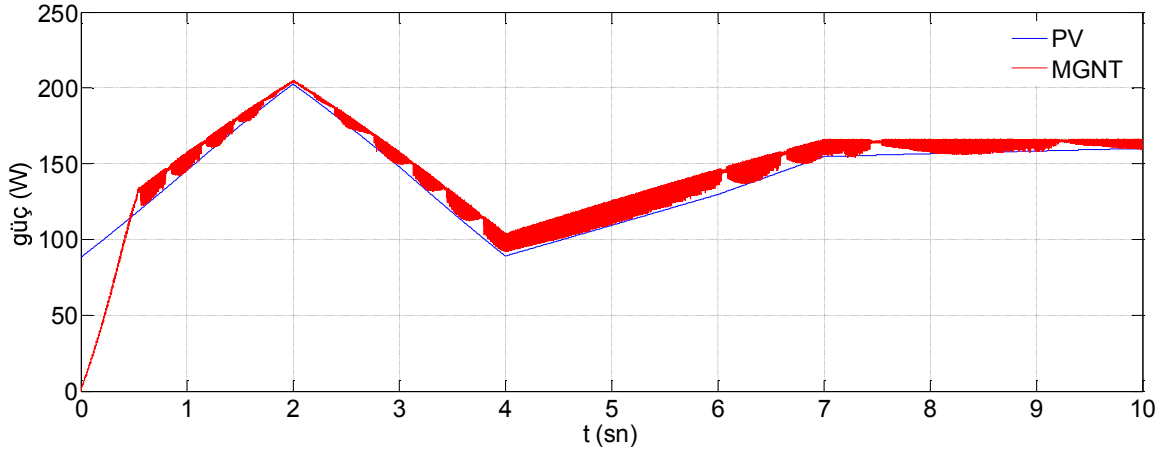
(c)

Şekil 6.12. 10^{-5} temel örnekleme zamanı sistem giriş sinyalleri: (a) gerilim sinyali, (b) ışıma sinyali, (c) sıcaklık sinyali

6.8.1. Artan İletkenlik Algoritmasının Uygulanması

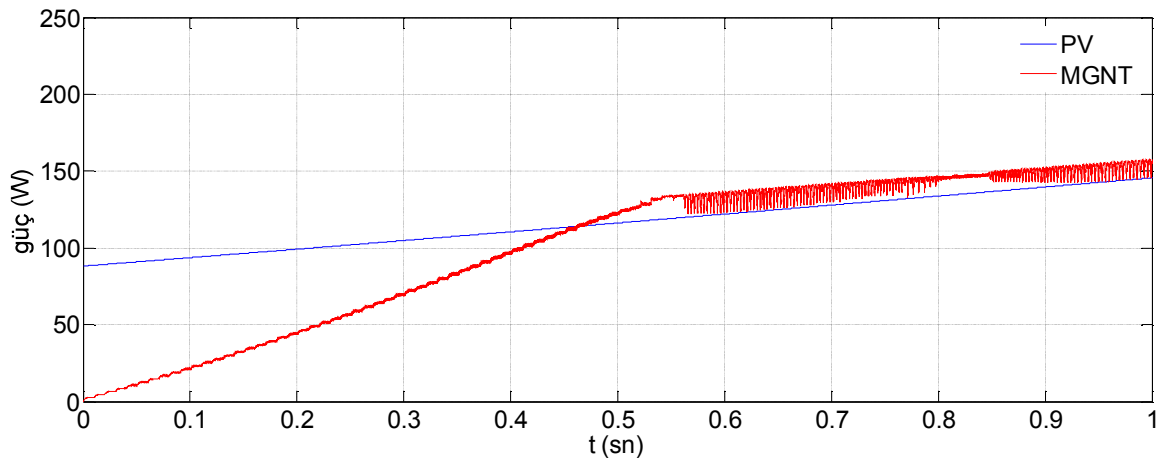
Artan iletkenlik metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-6} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiştir. Matlab modeline 10 sn' lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 10 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.11' deki değişimler kullanılmıştır.

Artan iletkenlik algoritmasının uygulanmasıyla dönüştürücü çıkışından elde edilen güç sinyali ilişkin grafik Şekil 6.13’ de verilmektedir. Şekil 6.13’ de dönüştürücü çıkışından MGNT ile elde edilen sinyal kırmızı ile gösterilmektedir. Mavi ile gösterilen sinyal ise PV panel çıkışında MGNT’ nin gerçekleştirilmediği durum için PV çıkış güç sinyalini göstermektedir.



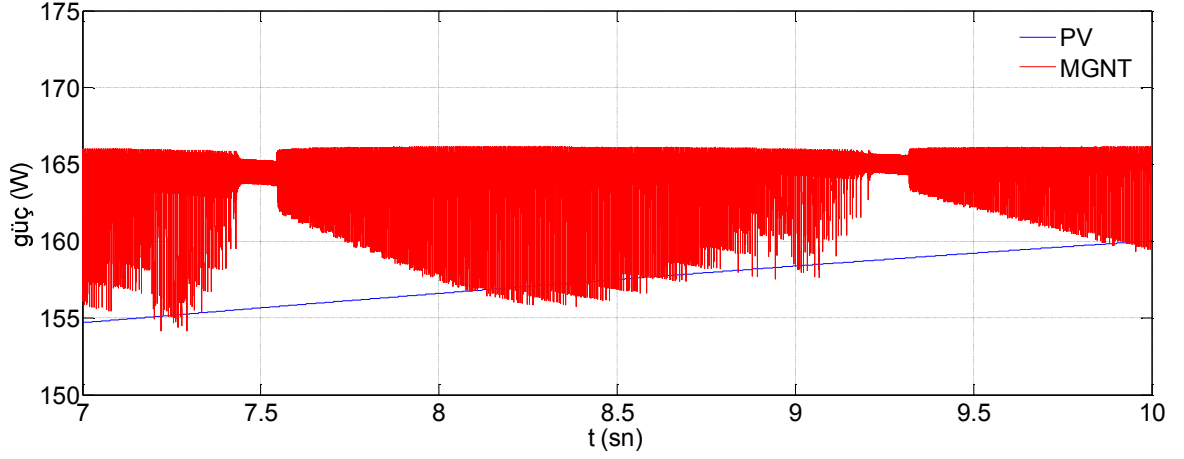
Şekil 6.13. Artan iletkenlik algoritması ile gerçekleştirilen MGNT

Artan iletkenlik algoritmasının geçici durum yanıtı Şekil 6.14’ de gösterilmektedir. Bu metodun geçici durum yanıtı incelendiğinde yaklaşık 0.48 sn’ den sonra PV çıkış gücünü geçerek MGN’ yi takip etmeye başladığı görülmektedir. Şekil 6.14’ da MGN’ ye ulaşma süresi görülmektedir.



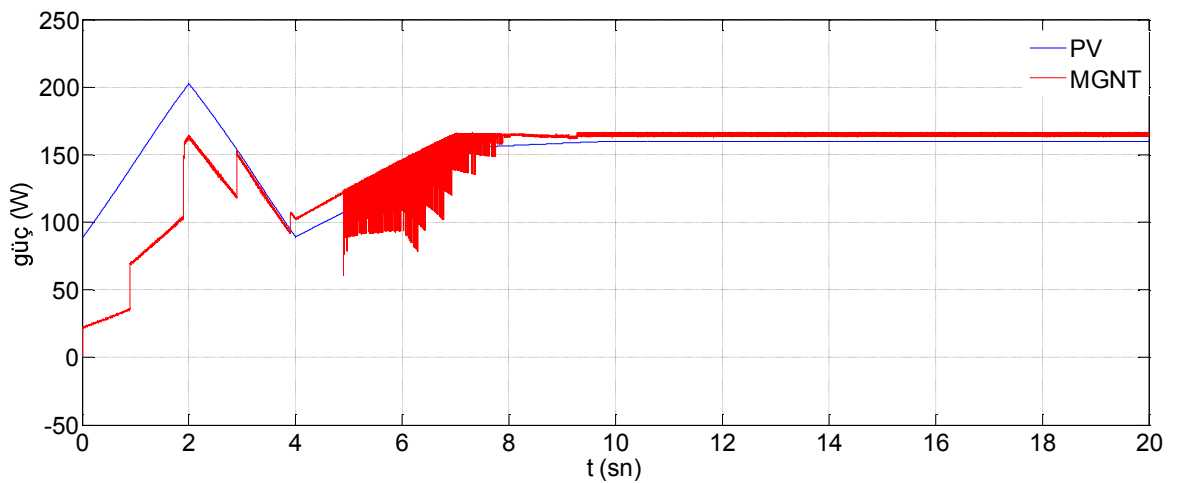
Şekil 6.14. Artan iletkenlik algoritmasının geçici durum yanıtı

Bu metoda ilişkin sürekli durumda güçte meydana gelecek dalgalanma 7-10 sn aralığı için Şekil 6.15’ de verilmektedir.



Şekil 6.15. Artan iletkenlik metodunun sürekli durum yanıtı

Artan iletkenlik metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-5} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.16’ da verilen güç değişimi elde edilmiştir. Matlab modeline 20 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 20 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.12’ deki değişimler kullanılmıştır.

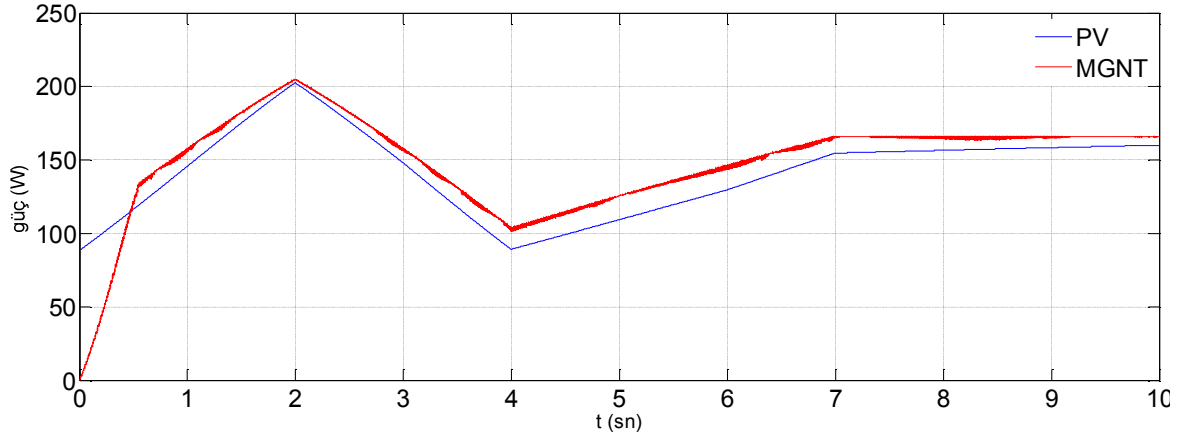


Şekil 6.16. Artan iletkenlik algoritması ile gerçekleştirilen MGNT

6.8.2. Değiştir ve Gözlemle Algoritmasının Uygulanması

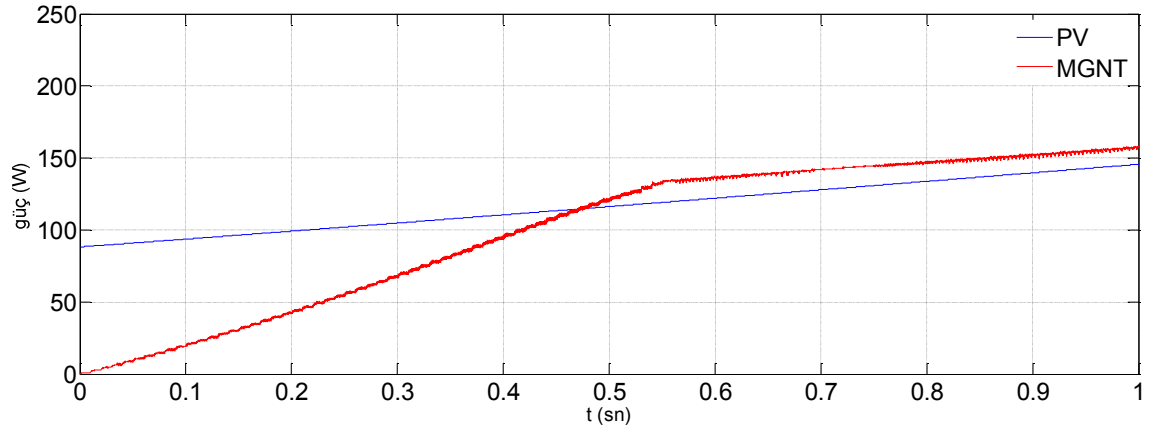
Değiştir ve gözlemle metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-6} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilerek Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’ da verilen değişimler elde edilmiştir. Matlab modeline 10 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 10 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.11’ deki değişimler kullanılmıştır.

Değiştir ve gözlemle algoritmasının PV çıkış gücünü yakalama süre ve MGN’ de meydana getirdiği dalgalanma Şekil 6.17’ de incelenmiştir. Şekil 6.17’ de değiştir ve gözlemle metoduna ait dönüştürücü çıkışından gözlemlediğimiz MGNT sinyali kırmızı ile belirtilerek çizdirilmiştir. Mavi sinyal ise referans güç sinyalini göstermektedir.



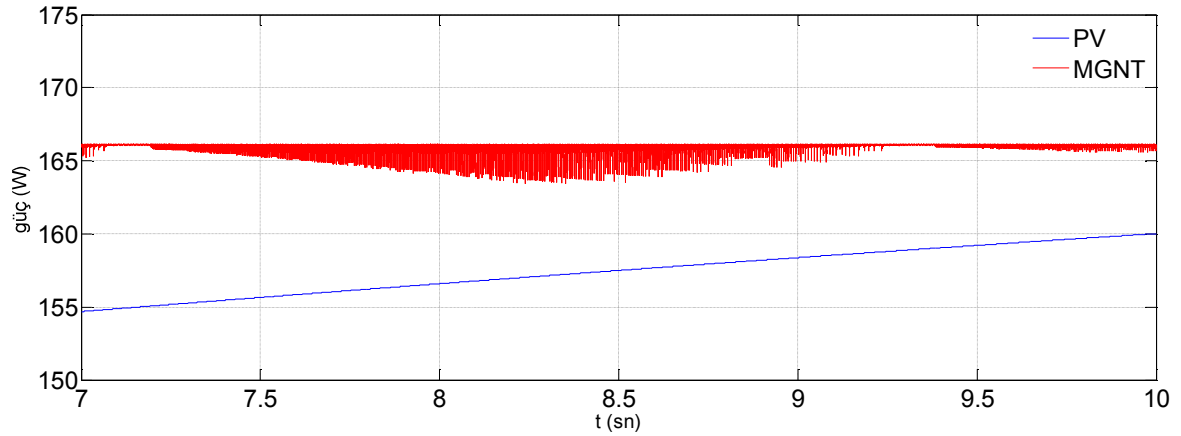
Şekil 6.17. Değiştir ve gözlemle algoritması ile gerçekleştirilen MGNT

Değiştir ve gözlemle algoritmasının geçici durum yanıtı incelendiğinde PV çıkış gücüne yaklaşık 0.48 sn’ de ulaştığı ve sonrasında MGNT’ ye başladığı görülmektedir. Bu algoritmanın geçici durum yanıtları Şekil 6.18’ de görülmektedir.



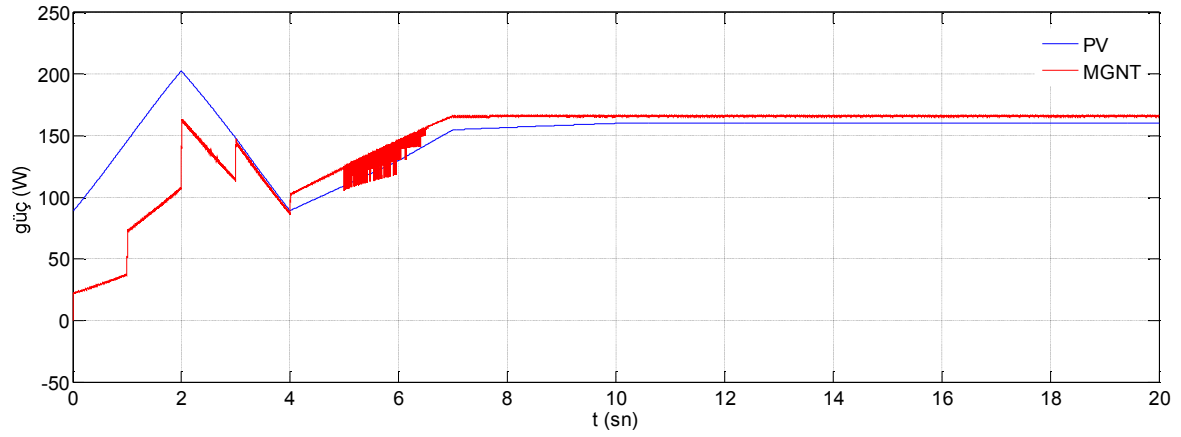
Şekil 6.18. Değiştir ve gözlemle metoduna MGN' a ulaşma süreleri

Değiştir ve gözlemle metodunun MGN' de meydana getirdiği güçteki dalgalanma Şekil 6.19' da verilmiştir.



Şekil 6.19. Değiştir ve gözlemle metodunun sürekli durum yanıtı

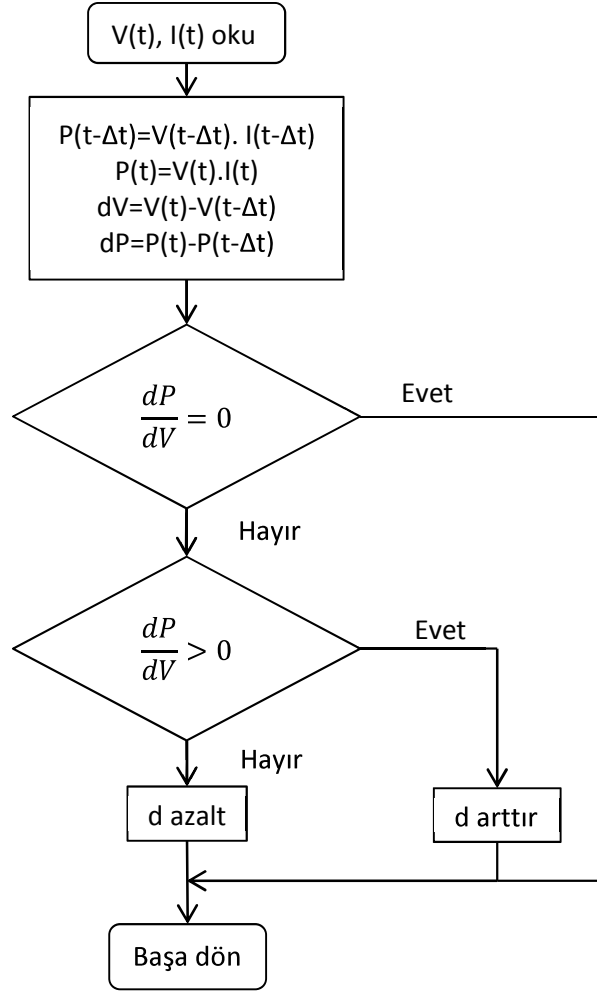
Değiştir ve gözlemle metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-5} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.20' de verilen çıkış güç değişimi elde edilmiştir. Matlab modeline 20 sn' lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 20 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.12' deki değişimler kullanılmıştır.



Şekil 6.20. Değiştir ve gözlemler algoritması ile gerçekleştirilen MGNT

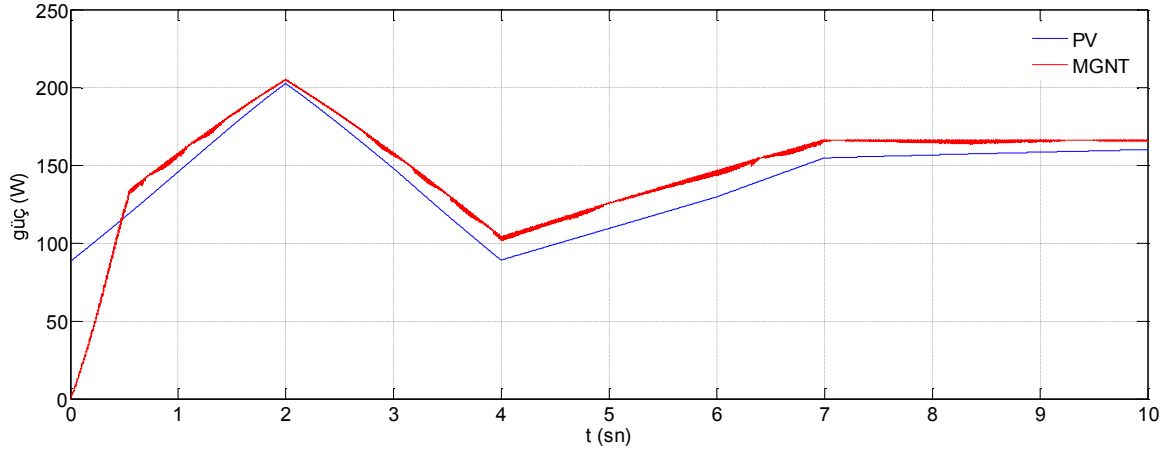
6.8.3. dP/dV Geri Besleme Kontrol Metodu Algoritmasının Uygulanması

Bu metod gücün gerilime göre türevini alarak MGNT' yi gerçekleştirmektedir. MGN' nin solunda dP/dV değeri sıfırdan büyüktür. MGN' nin sağında dP/dV değeri sıfırdan küçüktür. MGN' de ise sıfıra eşittir. Bu metod P-V eğrisinin bu özelliğinden yararlanarak MGNT' yi gerçekleştirmektedir. dP/dV sıfırdan büyükse D görev periyodu arttırılır, sıfırdan küçükse azaltılır, eğer sıfıra eşitse görev periyodu değiştirilmez. Bu metoda ait algoritma Şekil 6.21' de verilmiştir.



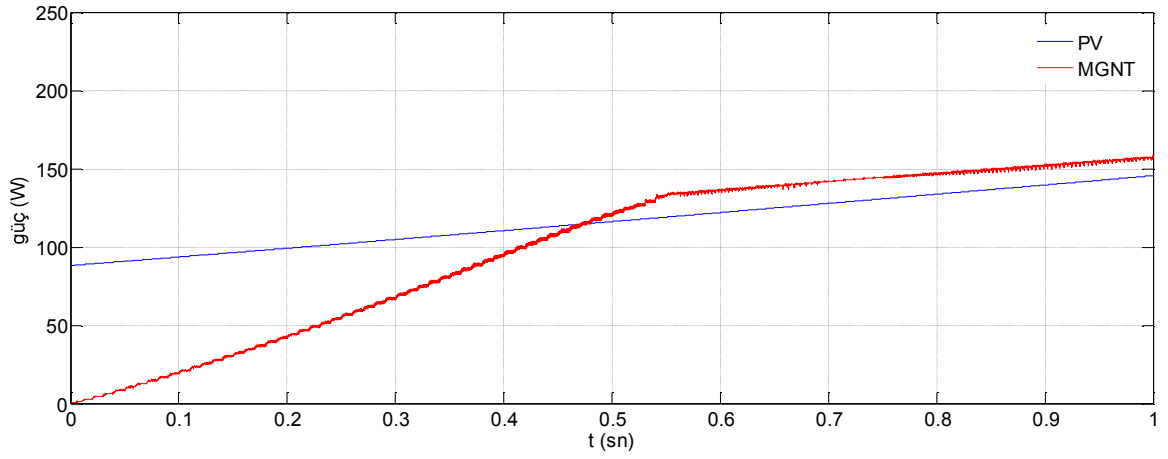
Şekil 6.21. dP/dV geri besleme kontrol algoritması

Bu metoda ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-6} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.22, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’ de verilen çıkış güç değişimleri elde edilmiştir. Matlab modeline 10 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 10 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.11’ deki değişimler kullanılmıştır.



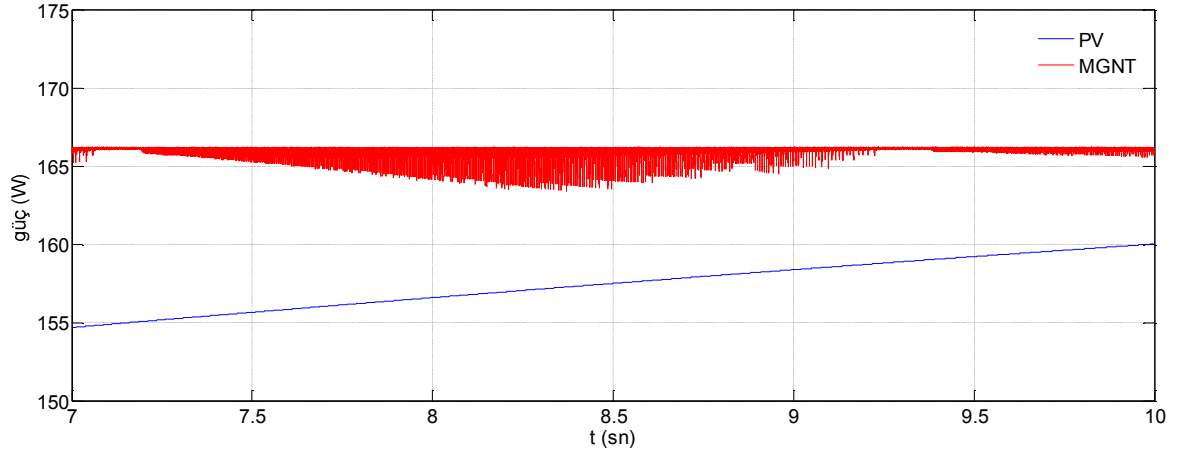
Şekil 6.22. dP/dV geri besleme kontrol metodu ile gerçekleştirilen MGNT

Bu metoda ait geçici durum yanıtı Şekil 6.23' de gösterilmektedir. Bu metod yaklaşık 0.48 sn' de MGN' ye ulaşmıştır.



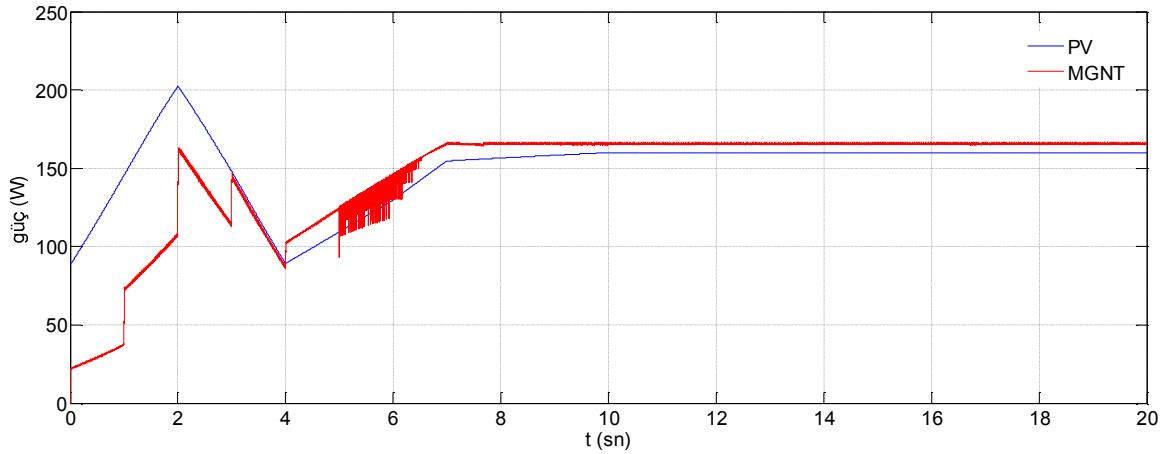
Şekil 6.23. dP/dV metoduna ait geçici durum yanıtı

Bu metoda ait sürekli durum yanıtı ve MGN' de meydana gelen dalgalanma Şekil 6.24' de görülmektedir.



Şekil 6.24. dP/dV metodunun sürekli durum yanıtı

Bu metoda ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-5} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.25’ de verilen çıkış güç değişimi elde edilmiştir. Matlab modeline 20 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 20 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.12’ deki değişimler kullanılmıştır.



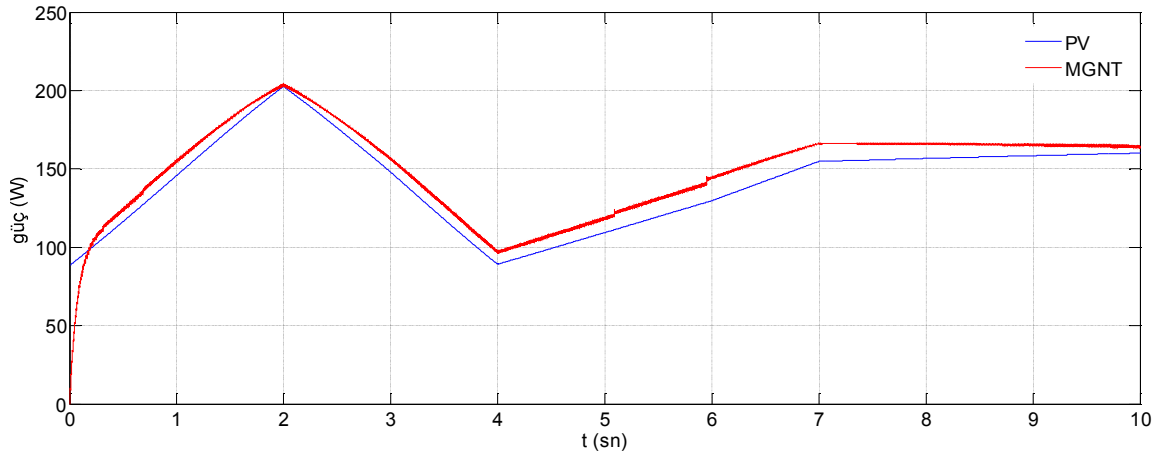
Şekil 6.25. dP/dV geri besleme kontrol metodu ile gerçekleştirilen MGNT

6.8.4. Beta MGNT Metodunun Uygulanması

Beta metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-6} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27’ de verilen çıkış güç değişimleri elde edilmiştir. Matlab modeline 10 sn’ lik bir süre için

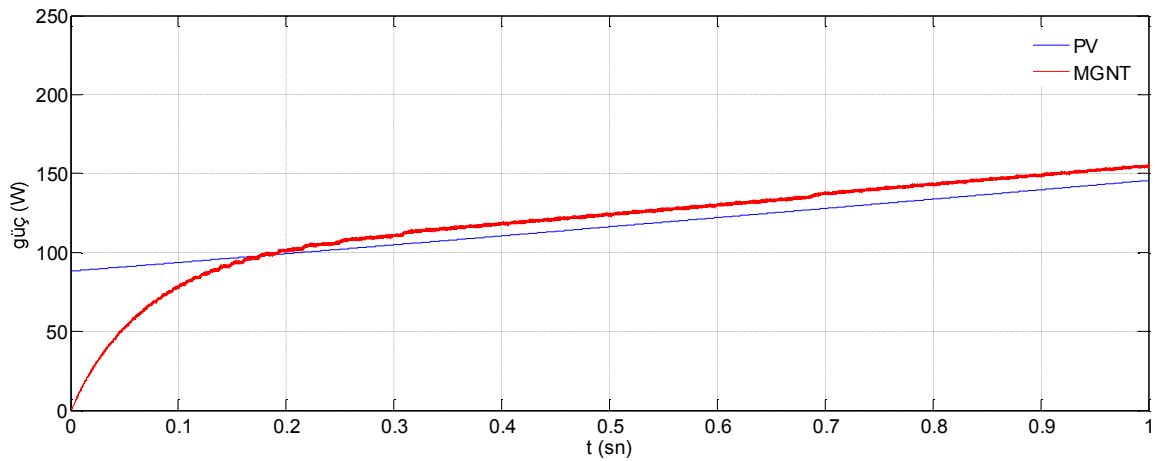
giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 10 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.11’ deki değişimler kullanılmıştır.

Beta MGNT metodu ile gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 6.25’ de gösterilmektedir. Bu simülasyon ile beta metodunun MGN ’yi doğru bir şekilde takip ettiği görülmektedir.



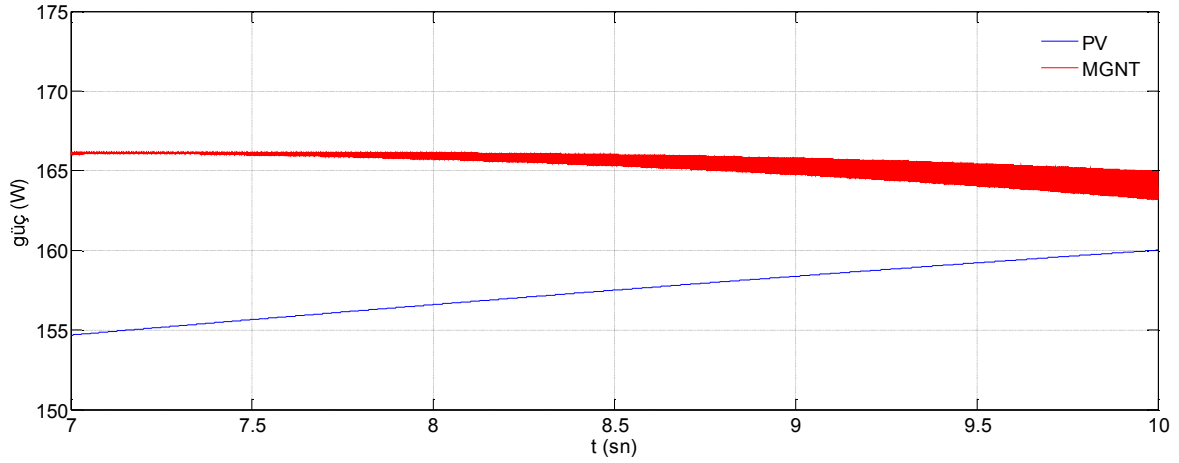
Şekil 6.25. Beta metodunu ile gerçekleştirilen MGNT

Beta metodunun Şekil 6.26’ daki geçici durum yanıtı incelendiğinde MGN ’ye yaklaşık 0.18 sn’ de ulaştığı görülmektedir.



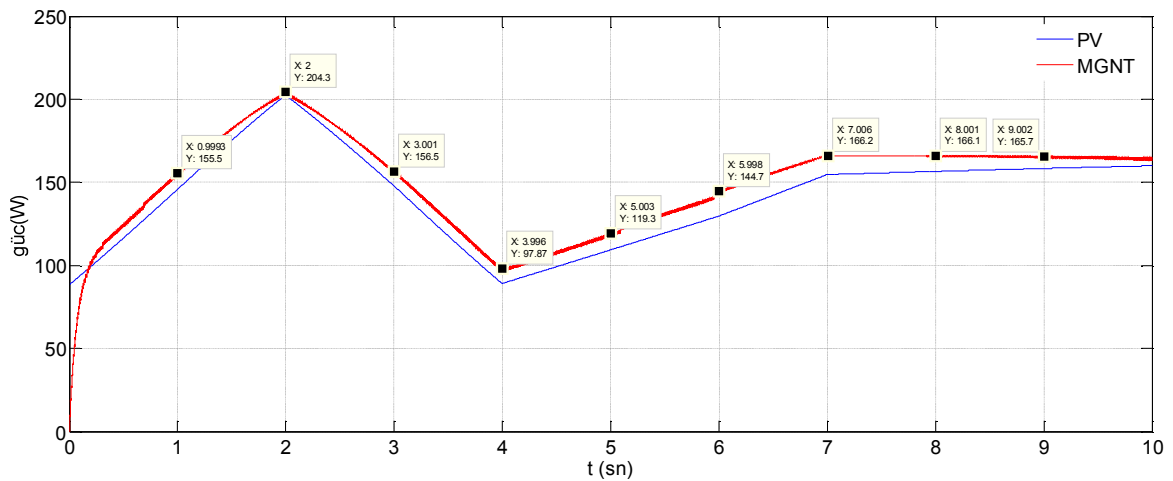
Şekil 6.26. Beta metodunun geçici durum yanıtı

Beta metodunun Şekil 6.27’ deki sürekli durum yanıtı incelendiğinde MGN’ de oluşturduğu dalgalanması görülmektedir. PV çıkış gücü artarken beta metodu ile yapılan maksimum güç noktası takibi ile elde edilen çıkış gücünde bir azalmanın başladığı görülmektedir. Bu beta metodunun MGN’ de fazla osilasyon yaparak MGN’ yi takip etmeyip sadece MGN’ ye yaklaştığını göstermektedir.



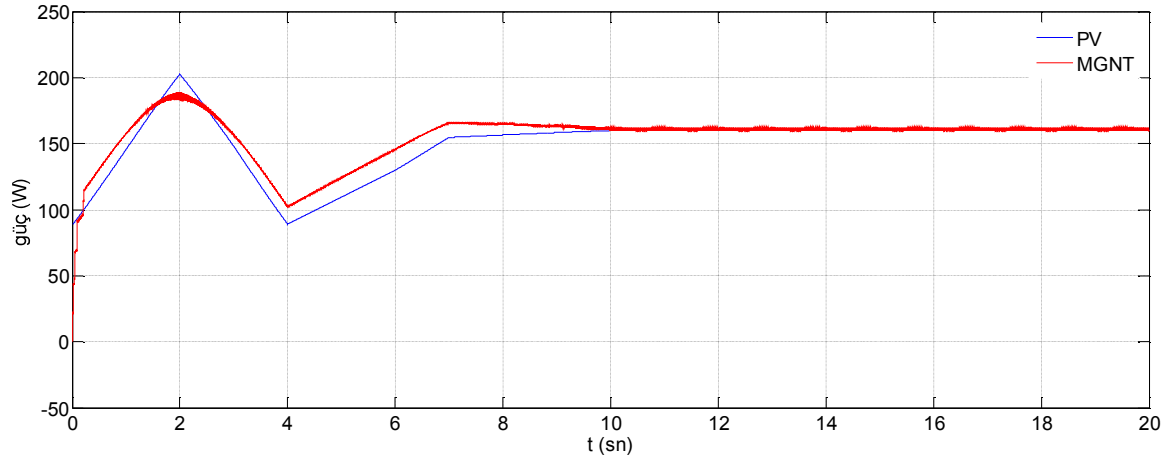
Şekil 6.27. Beta metodunun sürekli durum yanıtı

Beta metodu ile MGNT’ de her bir saniye için çıkış güç değerleri Şekil 6.28’ de verilmiştir.



Şekil 6.28. Her bir saniye için beta metodunun çıkış güç değerleri

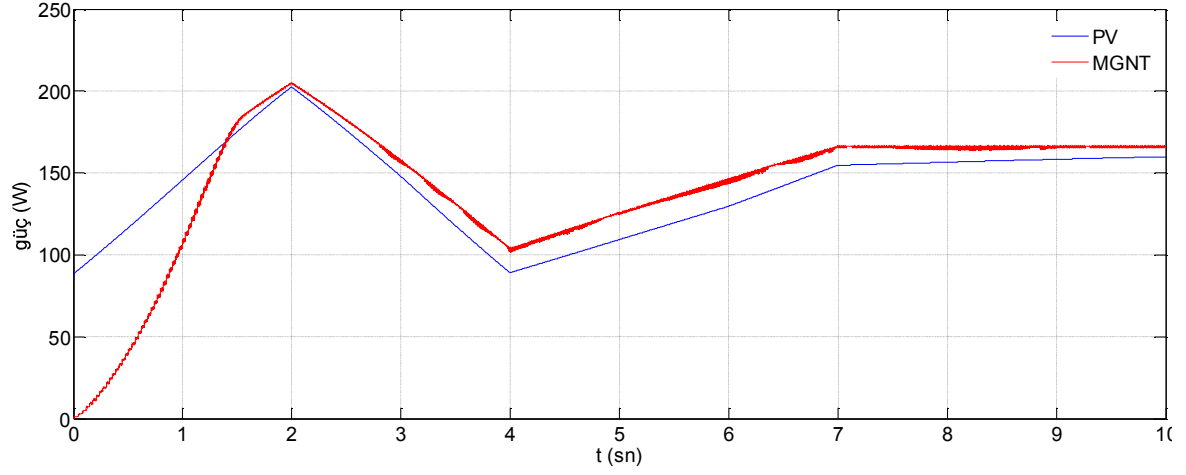
Beta metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-5} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.29’ da verilen çıkış güç değişimi elde edilmiştir. Matlab modeline 20 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 20 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.12’ deki değişimler kullanılmıştır.



Şekil 6.29. Beta metodunu ile gerçekleştirilen MGNT

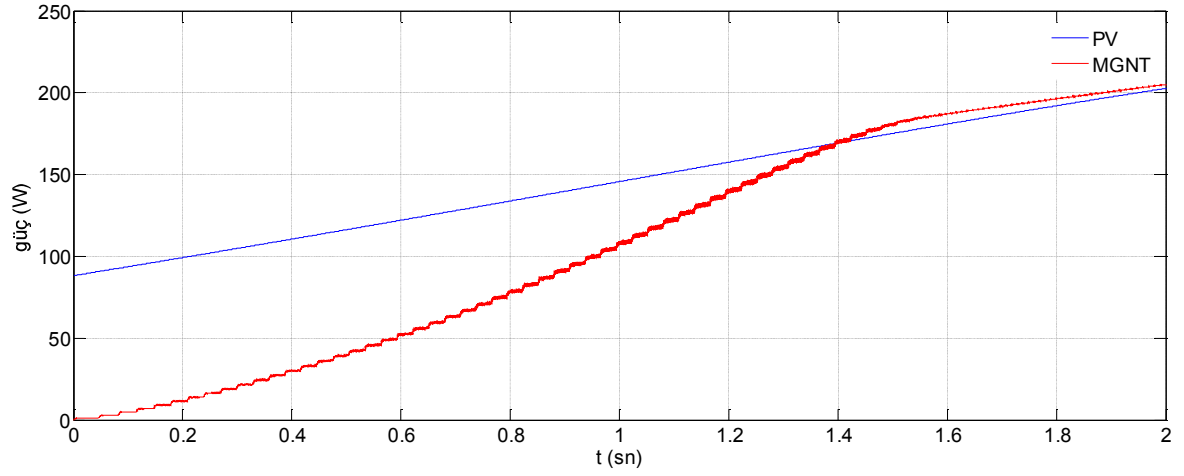
6.8.5. Üç Nokta Güçlerini Karşılaştırma Metodu Algoritmasının Uygulanması

Üç nokta güçlerini karşılaştırma metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-6} temel örnekleme periyodu için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.30, Şekil 6.31 ve Şekil 6.32’ de verilen çıkış güç değişimleri elde edilmiştir. Matlab modeline 10 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 10 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.11’ deki değişimler kullanılmıştır.



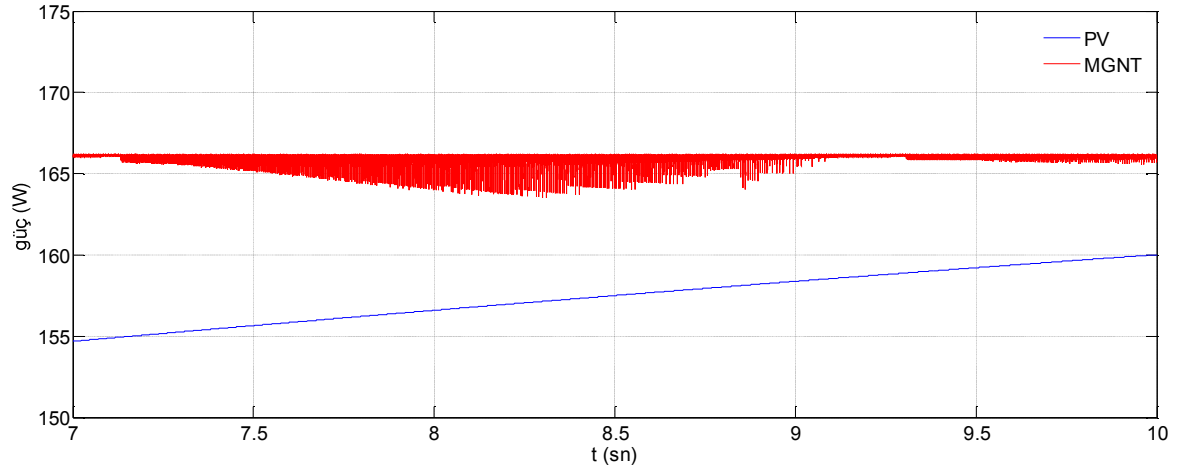
Şekil 6.30. Üç nokta güçlerini karşılaştırma metodunun gerçekleştirdiği MGNT

Üç nokta güçlerini karşılaştırma metodunun geçici durum yanıtı Şekil 6.31' de görülmektedir. Yaklaşık 1.4 sn' de PV çıkış gücünü yakalamış ve MGN takibine başlamıştır.



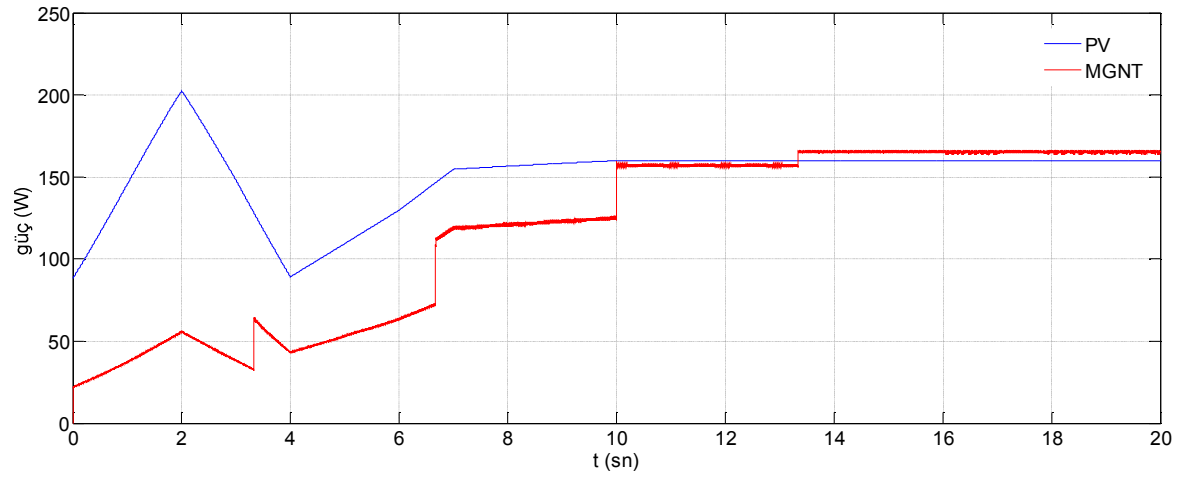
Şekil 6.31. Üç nokta metodunun geçici durum yanıtı

Üç nokta metodunun Şekil 6.32' deki sürekli durum yanıtı incelendiğinde MGN' de oluşturduğu osilasyon görülmektedir. Metot, beta metodu gibi azalan bir güç çıkışı vermenin aksine daha iyi bir MGNT gerçekleştirmiştir.



Şekil 6.32. Üç nokta metodunun sürekli durum yanıtı

Üç nokta güçlerini karşılaştırma metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-5} temel örnekleme periyodu için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.33' de verilen çıkış güç değişimi elde edilmiştir. Matlab modeline 20 sn' lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 20 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.12' deki değişimler kullanılmıştır.



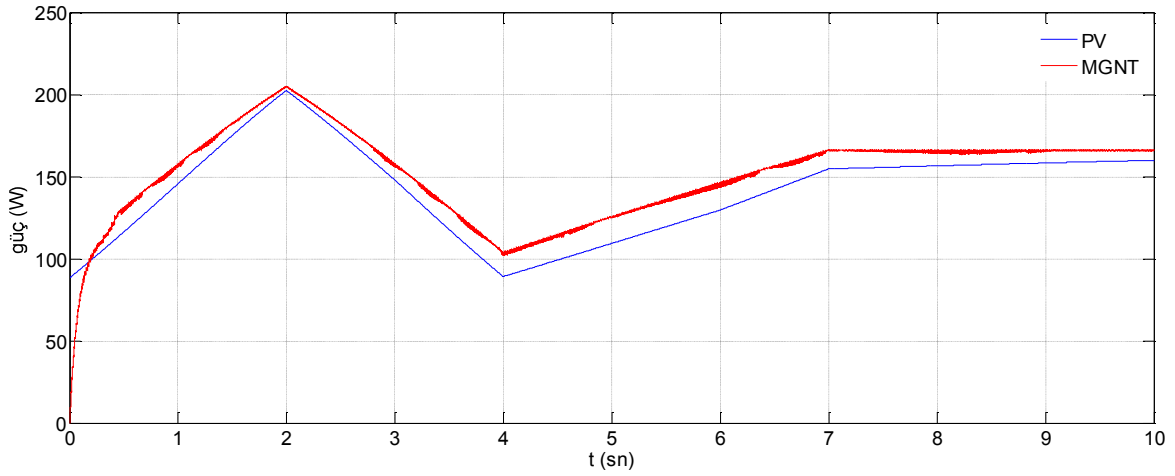
Şekil 6.33. Üç nokta güçlerini karşılaştırma metodunun gerçekleştirdiği MGNT

6.8.6. Önerilen Hibrit MGNT Metodu Algoritmasının Uygulanması

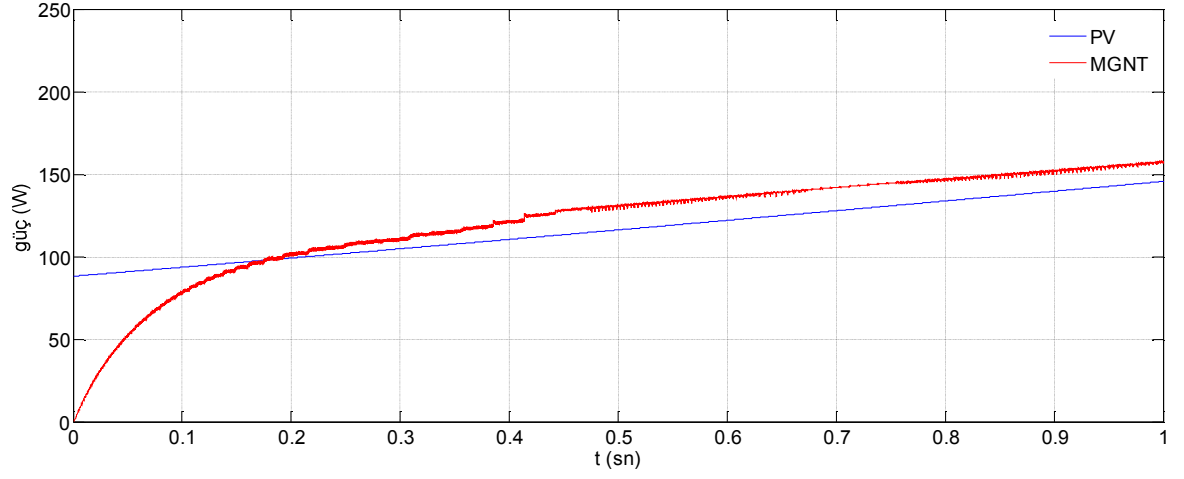
Önerilen MGNT metodu, beta metodunun hızlı geçici durum yanıtını ve üç nokta güçlerini karşılaştırma metodunun sürekli durumdaki düşük güç dalgalanması cevabını birleştirmeyi hedeflemektedir. Böylece beta ve üç nokta MGNT metotlarının avantajları birleştirilerek, MGN ulaşma süresinin ve MGN ‘deki dalgalanma miktarının düşük olduğu bir metot elde edilmiş olacaktır.

Hibrit MGNT metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-6} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36’ da verilen çıkış güç değişimleri elde edilmiştir. Matlab modeline 10 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 10 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.11’ deki değişimler kullanılmıştır.

Hibrit MGNT metodu algoritması kullanılarak gerçekleştirilen MGNT ile PV panelden elde edilen çıkış gücü Şekil 6.34’ de verilmektedir.

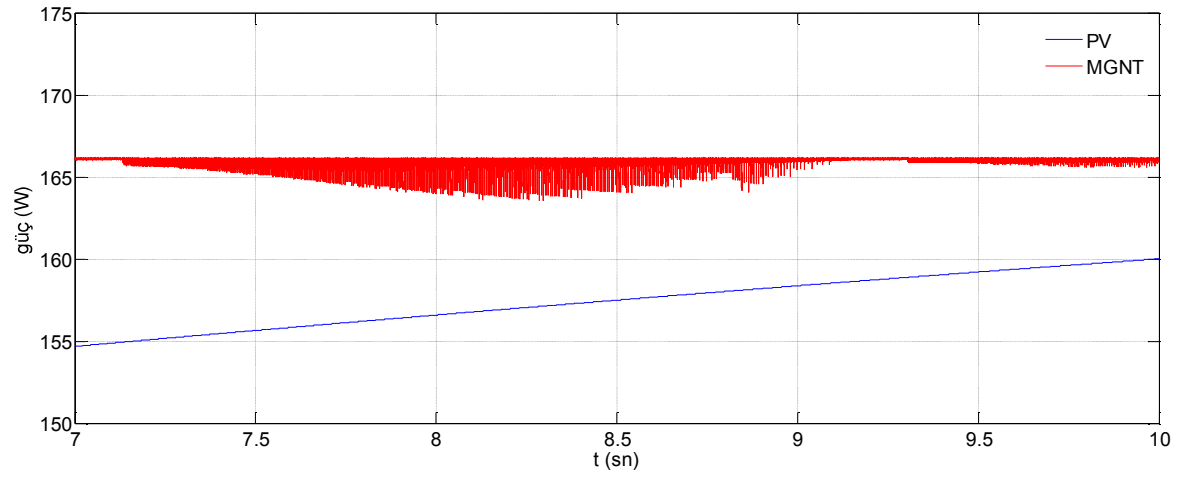


Şekil 6.34. Hibrit metot ile gerçekleştirilen MGNT

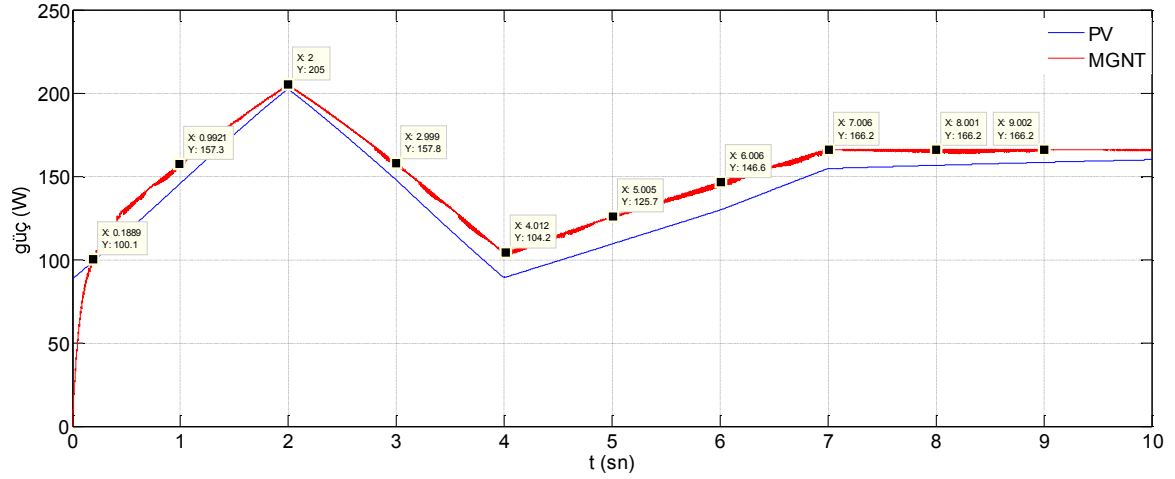


Şekil 6.35. Hibrit metodun geçici durum yanıtı

Hibrit metodun geçici durum yanıtı Şekil 6.35’ de verilmektedir. Metodun sürekli durumda meydana getirdiği osilasyon ise Şekil 6.36’ da verilmektedir.



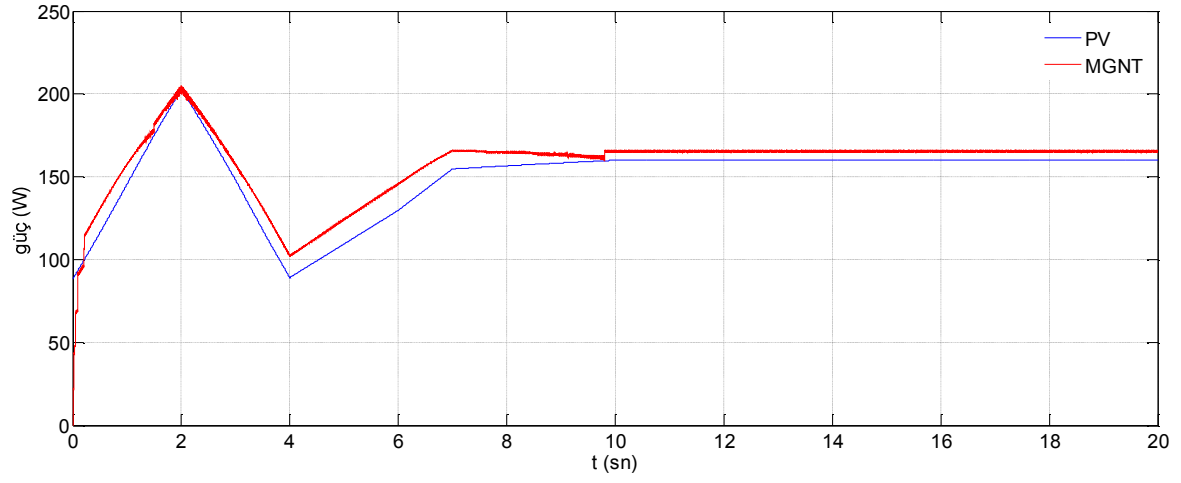
Şekil 6.36. Hibrit metodun sürekli durum yanıtı



Şekil 6.37. Hibrit metodunun çıkış güç değerleri

Şekil 6.37’ de hibrit metodun bir saniye aralıklarla güç değerleri gösterilerek metodun beta metoduna karşı sağladığı güç miktarındaki artış avantajı verilmektedir. Beta metodu ortam şartlarının ani değişim gösterdiği Şekil 6.28 incelendiğinde, özellikle 3, 4, 5 ve 6’ ncı saniyelere dikkat edilirse beta metodu için çıkış güç değerlerinin sırasıyla 156.5 W, 97.8 W, 119.3 W ve 144.7 W olduğu görülmektedir. Sırasıyla aynı sn’ ler için verilen hibrit metodun çıkış güç değerleri sırasıyla 157.8 W, 104.2 W, 125.7 W ve 146.6 W’ tır. Görüldüğü gibi geliştirilen hibrit MGNT metodu, yalnız uygulanan diğer MGNT metotlarına göre çevresel değişimlerden daha az etkilenecek, daha yüksek çıkış gücü vermekte ve sistem verimini arttırmaktadır.

Hibrit MGNT metoduna ait denklemler ve akış diyagramları kullanılarak Matlab simülasyonları 10^{-5} temel örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiş ve Şekil 6.38’ de verilen değişimler elde edilmiştir. Matlab modeline 20 sn’ lik bir süre için giriş verileri girilmiştir. Simülasyon değişimleri 20 sn için gözlemlenmiştir. Simülasyon giriş sinyali olarak Şekil 6.28’ deki değişimler kullanılmıştır. Hibrit MGNT metodu algoritması kullanılarak gerçekleştirilen MGNT ile PV panelden elde edilen çıkış gücü Şekil 6.38’ de verilmektedir.



Şekil 6.38. Hibrit metot ile gerçekleştirilen MGNT

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada literatürde çok fazla yer bulan değiştir ve gözlemle metodu, artan iletkenlik metodu, beta metodu, dP/dV geri besleme kontrol metodu ve üç nokta gücünü karşılaştırma metodunun simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyon sonuçları, hibrit MGNT metodunun simülasyonundan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen hibrit metodun doğruluğunu ortaya koyabilmek için Matlab/Simulink simülasyon modelleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda önerilen hibrit MGNT metodundan çevre şartlarında hızlı değişimlerin olduğu süre zarfında elde edilen sonuçlar, diğer MGNT metotlarında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında çıkış gücünde sağladığı artış ile sistemin verimini arttırdığı görülmektedir. Karşılaştırma sonucunda hibrit MGNT metodunun geleneksel metotlara kıyasla daha iyi MGNT gerçekleştirdiği görülmüştür. Hibrit metottan ve beta metodundan elde edilen simülasyon sonuçlarının birer saniye aralıklarla çıkış güç değerleri gösterilmiştir ve karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada ani çıkış güç değişiminin olduğu zaman dilimlerinde hibrit metodun daha iyi bir MGNT gerçekleştirdiği, sistem çıkışındaki güç değişiminden görülmüştür. Böylece beta metodunun hızlı MGN' ye ulaşma özelliğini ve üç nokta gücünü karşılaştırma metodunun MGN' de düşük güç dalgalanması ve az sayıda osilasyon yapma özelliklerini bir araya getiren hibrit bir MGNT metodu uygulanmıştır. Beta metodunun sürekli durumda oluşturduğu güç kayıpları bu metot ile önlenmiştir. Üç nokta gücünü karşılaştırma metodunun MGNT' ye başlama süresi kısaltılarak performansı daha iyi olan bir metot elde edilmiştir. Hibrit metot sayesinde hızlı ısıtım ve sıcaklık değişimlerinde PV panel çıkışı daha kısa sürede MGNT' ye başlayacak ve MGN' de daha az osilasyon ile MGNT' yi gerçekleştirecektir.

Hibrit MGNT metodu, sistemin yavaş ve hızlı çalışması durumunda yaklaşık aynı sonucu verirken diğer metotlarda sistemin yavaşlamasıyla MGN ulaşma süresinde uzama ve daha fazla osilasyon görülmektedir. Bu nedenle hibrit MGNT metodu anahtarlama hızı düşük olan DA/DA dönüştürücülerin kullanıldığı sistemlerde de yüksek verimlilikle kullanılabilir.

Bu metot ile PV sistem verimi yükseltilebilir, elde edilen enerji miktarındaki artışla daha kısa sürede sistemdeki bataryalar şarj edilebilir ya da şebekeye verilecek enerji miktarında artış sağlanabilir. Ayrıca sistemlerin çevre şartlarından daha az etkilenmesi sağlanarak, gün içinde sistemden yararlanılan süre arttırılmış olmaktadır.

Bundan sonraki çalışmalarda sistemle uyum içinde çalışacak bir buck/boost dönüştürücü tasarlanarak, pratik olarak sistemin kurulumu gerçekleştirilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] URL-1,
<http://www.enerji.gov.tr/index.php?dil=tr&sf=webpages&b=gunes&bn=233&hn=&nm=384&id=40695>, (09.06.2013)
- [2] **Masters, G.M.**, 2004. “Renewable and Efficient Electric Power Systems”, Stanford University, A John Wiley & Sons, Inc. Publication, 445-485
- [3] URL-2, http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg, 11 Haziran 2013.
- [4] **Whitaker, C., Newmiller, J., Ropp, M., Norris, B.**, 2008. “Renewable Systems Interconnection Study: Distributed Photovoltaic Systems Design and Technology”, Sandia Report, http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/distributed_pv_system_design.pdf, 17 Mayıs 2013.
- [5] **Patel, M.R.**, 1999. “Wind and Solar Power Systems”, U.S. Merchant Marine Academy Kings Point, New York, CRC Press, 139
- [6] **Chong, K.,K., Wong, C.,W.**, “General Formula for On-Axis Sun-Tracking System”, Universiti Tunku Abdul Raman, Malaysia, http://cdn.intechopen.com/pdfs/12229/InTech-General_formula_for_on_axis_sun_tracking_system.pdf, 17 Mayıs 2013.
- [7] **Rüstemli, S., Dincadam, F., Demirtaş, M.**, 2009. “Performance Comparison of The Sun Tracking System and Fixed System in The Application of Heating and Lighting”,
- [8] **Lee, C.,Y., Chou, P.,C., Chiang, C.,M., Lin, C.,F.**, 2009. “Sun Tracking Systems: A Review”
- [9] **Shihong, Q., Wang, M., Chen, T., Yao, X.**, 2011. “Comparative Analysis of Incremental Conductance and Perturb-and-Observation Methods to Implement MPPT in Photovoltaic System”
- [10] **Walker, S. S. W., Sooriyaarachchi, N.K., Liyanage, N.D.B., Abeynayake, P.A.G.S., Abeyratne, S.G.**, 2011. “Comparative Analysis of Speed of Convergence of MPPT Techniques”, 6th International Conference on Industrial and Information Systems ICIIS.
- [11] **Lei, M., Yaojie, S., Yandan, L., Zhifeng, B., Liqin, T., Jieqiong, S.**, 2011. “A High Performance MPPT Control Method”.

- [12] **Ali, A.N.A., Saied, M.H., Mostafa, M.Z., Abdel-Moneim, T.M.,** 2012. "A Survey of Maximum PPT techniques of PV Systems".
- [13] **Brito, M.,A.,G., Sampaio, L.,P., Junior, L.,G., Canesin, C.,A.,** 2011. "Evaluation of MPPT Techniques for Photovoltaic Applications", UNESP, Brazil.
- [14] **Brito, M.,A.,G., Sampaio, L., Luigi G.,Jr., e Melo, G.,A., Canesin, C.,A.,** 2011. "Comparative Analysis of MPPT Techniques for PV Applications".
- [15] **Desai, H.,P., and Patel, H.,K.,** 2007. "Maximum Power Point Algorithm in PV Generation: An Overview", Power Electronics and Drive Systems, 7th International Conference, pp. 624 – 630.
- [16] **Lee, S., Park, H., Kim, G., Seo, H., Ali, M.H., Park, M., Yu, I.,** 2007. "The Experimental Analysis of the Grid Connected PV System Applied by POS MPPT", International Conference on Electrical Machines and Systems.
- [17] **Mei, Q., Shan, M., Liu, L., Guerrero, J.,M.,** 2011. "A Novel Improved Variable Step-Size Incremental-Resistance MPPT Method for PV Systems".
- [18] **Faranda, R., Leva, S., Maugeri, V.,** 2008 "MPPT techniques for PV Systems: energetic and cost comparison".
- [19] **Kobayashi, K., Matsuo, H., Sekine, Y.,** 2006. "An Excellent Operating Point Tracker of the Solar-Cell Power Supply System".
- [20] **Zhang, L., Hurley, W.G., Wölflle, W.,** 2010. "A New Approach to Achieve Maximum Power Point Tracking for PV System with a Variable Inductor", Transactions on Power Electronics.
- [21] **Paz, F., Ordonez, M.,** 2014. "Zero Oscillation and Irradiance Slope Tracking for Photovoltaic MPPT", Transactions on Industrial Electronics.
- [22] **Berrera, M., Dolara, A., Faranda, R., Leva, S.,** 2009 "Experimental test of seven widely-adopted MPPT algorithms", Bucharest Power Tech Conference IEEE.
- [23] **Esram, T., Chapman, P.L.,** 2007 "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", Transactions on Energy Conversion IEEE.
- [24] **Jain, S., Agarwal, V.,** 2004. "A New Algorithm for Rapid Tracking of Approximate Maximum Power Point in Photovoltaic Systems", Power Electronics Letters, IEEE.

- [25] **Jain, S., Agarwal, V.,** 2006. “New current control based MPPT technique for single stage grid connected PV systems”, Energy Conversion and Management.
- [26] **Hsiao, Y.T., Chen, C.H.,** 2002. “Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power System”, 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference.
- [27] **Altas, İ.H., Sharaf, A.M.,** 1996. “A novel on line MPP search algorithm for PV arrays”, Transactions on Energy Conversion IEEE.
- [28] **Bodur, M., Ermiş, M.,** 1994 “Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels”, 7th Mediterranean Electrotechnical Conference.
- [29] **Kitano, T., Matsui, M., Xu, D.,** 2001. “Power sensor-less MPPT control scheme utilizing power balance at dc link system design to ensure stability and response”.
- [30] **Shmilovitz, D.,** 2005 “On the control of photovoltaic maximum point tracker via output parameters” in IEE Proceeding Electric Power Applications.
- [31] **Hou, C. L., Wu, J., Zhang, M., Yang, J. M., Li, J. P.,** 2004. “Application of Adaptive Algorithm of Solar Cell Battery Charger”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies.
- [32] **Takashima, T., Tanaka, T., Amano, M., Ando, Y.,** 2000. “Maximum Output Control of Photovoltaic (PV) Array”, 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, (IECEC).
- [33] **Chen, Y., Smedley, K. M.,** 2004. “A cost-effective single-stage inverter with maximum power point tracking”, IEEE Transactions on Power Electronics.
- [34] **Ahmad, S., Mittal, N. R., Bhattachayra, A. B., Singh, M.,** 2010. “Simulation, Output Power Optimization and Comparative Study of Silicon and thin Film Solar Cell Modules”, the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA).
- [35] **rtiz-Rivera, E. I., Peng, F.,** 2004. “A novel method to estimate the maximum power for a photovoltaic inverter system”, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC)

- [36] **Park, M., Yu, I. K.**, 2004. "A Study on Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell", 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON).
- [37] **Chen, L., Tsai, C., Lin, Y., Lai, Y.**, 2010. "A Biological Swarm Chasing Algorithm for Tracking the PV Maximum Power Point", IEEE transaction on energy conversion.
- [38] **Villalva, M.G., Gazoli, J.R., Filho, E.R.**, "Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays", Power Electronics Conference, 2009, 1244 – 1254.
- [39] **Başaran, K., Çetin, N.S., Çelik, H.**, "Rüzgar –Güneş Hibrit Güç Sistemi Tasarımı ve Uygulaması", 6th International Advanced Technologies Symposium, 2011, 114-119.
- [40] **Jamri, M. S., Wei, T. C.**, 2010. "Modeling and Control of a Photovoltaic Energy System Using the State-Space Averaging Technique", American Journal of Applied Sciences.
- [41] **Sera, D., Teodorescu, R., Rodriguez, P.**, 2007. "PV panel model based on datasheet values", IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE).
- [42] **Kou, Q., Klein, S. A., Beckman, W. A.**, 1998. "A Method for Estimating The Long-Term performance of Direct-Coupled PV Pumping Systems", Solar Energy, Vol: 64, pp. 33-40.
- [43] **Li, S., Zhang, B., Xu, T., Yang J.**, 2014. "A New MPPT Control Method of Photovoltaic Grid-Connected Inverter System", 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), pp: 2753-2756.
- [44] **Zanotti, J. W., dos Santos, W. M., Martins, D. C.**, 2013. "The New MPPT Method for PV Systems Employing Input Characteristic Impedance", Power Electronics Conference (COBEP), pp: 556-562.
- [45] **Nordin, A. H. M., Omar, A. M.**, 2011. "Modeling and Simulation of Photovoltaic (PV) Array and Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Grid-Connected PV System", 3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment (ISESEE), pp: 114-119.
- [46] **Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P.**, 2003. "Güç Elektroniği", sayfa: 173-213.

ÖZGEÇMİŞ

Süleyman Emre DAĞTEKE, 1988 yılında Adana’ da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ’ da tamamladıktan sonra 2006 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı ve 2010 yılında mezun oldu. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Programında yüksek lisans eğitime başladı. 2012 yılında Bingöl Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır ve halen aynı kurumda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.