KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ İLE BİR ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Elo. Hab. Yük. Müh. Özgür YAKIŞAN

Anabilim Dalı: Elektronik Haberleşme Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. H. Tarık DURU

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ İLE BİR ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Elo. Hab. Yük. Müh. Özgür YAKIŞAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 09 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih: 03 Temmuz 2008

Tez Danışmanı	Üye	Üye
Yrd.Doç.Dr.H.Tarık DURU	Prof.Dr.Hacı BODUR	Prof.Dr.Nurettin ABUT
(.....)	(.....)	(.....)

Üye	Üye
Prof.Dr.Bekir ÇAKIR	Yrd.Doç.Dr.Nur BEKİROĞLU
(.....)	(.....)

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Her geçen gün dünyada tüketilen enerji miktarı artmaktadır. Geleneksel enerji kaynaklarının sınırlı rezervlere sahip olmaları, bulunup kullanılabilir forma getirilmelerinin zor ve pahalı olması, çevre kirliliğine yadsınamaz etkilere sahip olmaları nedenleri ile her geçen gün bu kaynaklara alternatif olabilecek yeni enerji kaynaklarına yönelim artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirilen bu alternatif kaynaklar hem çevre dostu hem de genelde rezerv sınırı olmayan kaynaklardır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en popüler olanlarından biri de güneş enerjisidir.

Güneş hücresi temelli enerji sistemlerinin uygulamaları tek başına (stand alone) veya şebekeye paralel (gride tide) formlarından biri şeklinde olmaktadır. Güneş enerjisi sistemleri diğer enerji kaynakları ile birlikte (hibrit) kullanıma elverişlidir.Güneş enerjisi sistemlerinin maliyetlerinin azalmasına paralel olarak bu sistemlerin yaygınlaşması sürmektedir.

Çok güncel ve çok popüler olan bu sistemlerden geridönüşlü (flyback) DA/DA dönüştürücülü, maksimum güç noktası izleyici denetimli, şebekeye paralel çalışan, düşük güçlü bir sistemin tasarlanması ve uygulanması üzerinde yapılan bu tezin, ileride bu alanda yapılacak çalışmalara katkı sunmasını dilerim

Tez çalışmam sırasında her konuda beni destekleyen ve yönlendiren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Tarık DURU'ya, çeviri, yazım ve çizim çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen başta Öğr. Gör. A. Oya AKBULUT olmak üzere çalışma arkadaşlarıma, çalışmam sürecinde manevi desteklerini esirgemeyen değerli eşim Tijen, oğullarım Erkin ve Cem'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR…… i
İÇİNDEKİLER……. ii
ŞEKİLLER DİZİNİ…….. iv
TABLOLAR DİZİNİ……... viii
SİMGELER DİZİNİ……. ix
ÖZET…… xiii
ABSTRACT……. xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ…… 1
BÖLÜM 2. GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİMİNDE TEMEL KAVRAMLAR..….. 8
2. 1. Güneş Hücresinin Yapısı…….. 8
2. 2. p-n Eklemi Olarak Güneş Hücresi……... 9
2. 3. Güneş Hücresinin Akım Gerilim Karakteristiğini Etkileyen Temel Parametreler…….. 13
2. 3. 1. İç parametreler…….. 13
2. 3. 2. Dış parametreler……... 14
2. 4. Güneş Hücresini Karakterize Eden Temel Parametreler…….. 16
2. 4. 1. Kısa devre akımı (Isc)…….. 17
2. 4. 2. Açık devre gerilimi (Voc)…… 17
2. 4. 3. Maksimum güç noktası (Pm)……... 17
BÖLÜM 3. GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLERİ…….. 22
3. 1. Üç Parametre (Voc, Isc ve Pm) Temelli Model……... 23
3. 2. Dört Parametre (Isc, Voc, Im ve Vm) Temelli Model……. 25
3. 2. 1. Sıcaklık (Tc) değişiminin dört parametreye etkisi……... 26
3. 2. 2. Sıcaklık (Tc) ve ışıma (Q) değişiminin dört parametreye etkisi..…… 27
3. 3. Beş veya Daha Fazla parametre Temelli Modeller…….. 28
3. 3. 1. Stantard test koşullarında beş referans parametrenin hesaplanması…… 29
3. 3. 2. Beş parametre modeli……... 32
3. 3. 3. A. Hadj Arab ve diğerlerinin denklemi…… 33
BÖLÜM 4. ENERJİ KAYNAĞI OLARAK GÜNEŞ ENERJİSİNİN KULLANIMI ve KONTROLÜ……... 36
4. 1. G. H. Temelli Bir Sistemin Bir Yükü Doğrudan Beslemesi…… 41
4. 2. DA/DA Dönüştürücüler……... 44
4. 2. 1. Düşürücü DA/DA dönüştürücüler…… 45
4. 2. 1. 1. Sürekli modda çalışma……. 47
4. 2. 1. 2. Süreksiz modda çalışma……... 48
4. 2. 1. 3. Sürekli ve süreksiz mod arasındaki limit……. 49
4. 2. 2. Yükseltici DA/DA dönüştürücüler……... 51
4. 2. 2. 1.Sürekli modda çalışma…….. 53
4. 2. 2. 2. Süreksiz modda çalışma……... 54
4. 2. 2. 3. Sürekli ve süreksiz mod arasındaki limit……. 55
4. 2. 3. Düşürücü Yükseltici Dönüştürücü……... 57
4. 2. 3. 1. Sürekli modda çalışma…… 59

4. 2. 3. 2. Süreksiz modda çalışma……... 60
4. 2. 3. 3. Sürekli ve süreksiz mod arasındaki limit……. 61
4. 2. 4. Geridönüşlü Dönüştürücü……. 63
4. 2. 4. 1. Devre yapısı ve prensibi……... 63
4. 2. 4. 2. Çalışması…….. 65
4. 2. 4. 3. Sınırlandırmalar…… 66
4. 2. 4. 4. Uygulama alanları…… 67
4. 3. Eviriciler……... 67
4. 3. 1. Tek fazlı köprü evirici…….. 70
4. 3. 1. 1. Köprü kare dalga ve üç seviyeli kare dalga çalışma…… 70
4. 3. 1. 2. Darbe genişlik modülasyonlu (DGM) çalışma durumu……... 73
4. 3. 1. 3. Çok seviyeli eviriciler…….. 75
4. 4. Şebekeye Paralel Çalışan Sistemler……. 77
4. 4. 1. Şebekeye paralel çalışan tek faz PV eviricili sistemler…… 79
4. 4. 1. 1. Merkezi eviricili sistem…… 80
4. 4. 1. 2. Dizi eviricili sistem…….. 80
4. 4. 1. 3. Modül ile tümleşik eviricili sistem…….. 81
4. 4. 2. PV eviricileri…… 81
4. 4. 2. 1. DA/DA dönüştürücülü ve yalıtımlı PV eviricileri……... 82
4. 4. 2. 2. Yalıtımsız DA/DA dönüştürücülü PV eviricileri……. 85
4. 4. 2. 3. Yalıtımlı DA/DA dönüştürücüsüz PV eviricileri……. 86
4. 4. 2. 4. Yalıtımsız DA/DA dönüştürücüsüz PV eviricileri……... 87
BÖLÜM 5. GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMLERİ…….. 89
5. 1. Değiştir-Gözle Yöntemi……... 90
5. 2. Sabit Gerilim/Sabit Akım Yöntemi…….. 94
5. 3. Pilot (örnek) Hücre Yöntemi…… 96
5. 4. Artan İletkenlik Yöntemi…….. 97
5. 5. Parazitik Kondansatör Yöntemi …….. 99
5. 6. Model Tabanlı MGNİ Yöntemleri……... 101
5. 7. Önerilen Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemi……. 101
BÖLÜM 6. SİMÜLASYONLAR ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 104
6. 1. GH Etiket Değerlerinden Faydalanılarak Modelleme ve Simülasyon……. 104
6. 2. Geridönüşlü Dönüştürücünün DA/DA Dönüştürücü Olarak Çalışması…... 111
6. 3. Geridönüşlü Dönüştürücünün DA/AA Dönüştürücü Olarak Çalışması…... 119
6. 4. Deneysel Çalışmalar……. 127
6. 4. 1. Uygulama devresi……. 127
6. 4. 2. DA/DA dönüştürücü olarak çalışma deneyi……. 130
6. 4. 3. Doğrultulmuş sinüs dalga referansı ile DA/AA dönüştürücü (evirici) olarak çalışma deneyi……... 133
6. 4. 4. Şebekeye paralel çalışma deneyi…….. 140
6. 4. 5. Sistemin güneş paneli üzerinden beslenmesi deneyi……... 142
BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER…….. 144
KAYNAKLAR……. 149
EKLER……. 153
ÖZGEÇMİŞ…….. 155

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Güneş hücresi yapısının kesiti……... 9
Şekil 2. 2. p-n eklemi ve iç akım…… 10
Şekil 2. 3. p-n eklemi ve enerji seviyeleri……... 11
Şekil 2. 4. Bir güneş hücresinin çift diyotlu elektriksel eşdeğer devesi……. 13
Şekil 2. 5. Işımanın güneş panelindeki etkisi…….. 15
Şekil 2. 6. Sıcaklığın güneş panelindeki etkisi……... 16
Şekil 2. 7. Bir güneş hücresinin akım-gerilim karakteristiği…….. 18
Şekil 2. 8. Tam karanlıkta çıkışa V_{oc} uygulandığında eşdeğer devre……. 19
Şekil 2. 9. Bir güneş hücresinin güç-gerilim karakteristiği…… 20
Şekil 3. 1. 5 parametre modeli eşdeğer devresi…….. 28
Şekil 3. 2. Referans parametrelerin hesaplanmasında kullanılan noktalar……. 30
Şekil 4. 1. Çok amaçlı tek başına kullanılan tipik bir sistem…….. 37
Şekil 4. 2. Şebeke bağlantılı tipik bir sistemin blok şeması……... 38
Şekil 4. 3. Tipik bir karma sistem……... 38
Şekil 4. 4. Bir güneş hücresi temelli sistemin tipik akım-gerilim ve güç-akım karakteristik eğrileri…… 41
Şekil 4. 5. Üç muhtemel yük doğrusu ve onlara karşılık gelen çalışma noktaları…….. 42
Şekil 4. 6. Işımadaki değişimin çalışma noktalarına etkisi……. 43
Şekil 4. 7. Yük olarak R direnci kullanan bir düşürücü DA/DA dönüştürücü... 45
Şekil 4. 8. Anahtar iletim (on) modu durumunda eşdeğer devre…… 46
Şekil 4. 9. Anahtar kesim (off) modu durumunda eşdeğer devre……... 46
Şekil 4. 10. Sürekli moda çalışan bir düşürücü DA/DA dönüştürücü devresinin grafikleri…… 47
Şekil 4. 11. Süreksiz mod çalışma grafikleri…….. 49
Şekil 4. 12. Düşürücü dönüştürücünün normalize akım-gerilim grafikleri…… 51
Şekil 4. 13 Temel yükseltici DA/DA dönüştürücü devresi…… 51
Şekil 4. 14. S anahtarının konumuna bağlı olarak dönüştürücünün iki çalışma modu……... 52
Şekil 4. 15. Sürekli moda çalışan yükseltici dönüştürücünün dalga şekilleri…. 53
Şekil 4. 16. Süreksiz mod çalışmada yükseltici dönüştürücü grafikleri……. 55
Şekil 4. 17. Yükseltici dönüştürücünün normalize akım-gerilim grafikleri…... 57
Şekil 4. 18. Yük olarak R direnci kullanan düşürücü yükseltici dönüştürücü devresi……. 57
Şekil 4. 19. Düşürücü yükseltici devresinin iletim ve kesim eşdeğer devreleri. 58
Şekil 4. 20. İdeal düşürücü yükseltici dönüştürücünün sürekli mod akım-gerilim grafikleri……. 59
Şekil 4. 21. Bir yükseltici düşürücü dönüştürücünün süreksiz mod akım-gerilim grafikleri……. 61
Şekil 4. 22. Düşürücü yükseltici dönüştürücünün normalize I-V grafikleri…... 63
Şekil 4. 23. Bir geridönüşlü dönüştürücünün devre şeması…… 64
Şekil 4. 24. Bir geridönüşlü dönüştürücünün iletim ve kesimdeki eşdeger devreleri…….. 64

Şekil 4. 25. Bir geridönüşlü dönüştürücünün sürekli mod akım-gerilim dalga formları……... 65
Şekil 4. 26. Bir geri dönüşlü dönüştürücünün süreksiz mod akım-gerilim dalga formları…….. 66
Şekil 4. 27. En temel evirici yapısı……. 69
Şekil 4. 28. Köprü evirici devresi (güneş paneli ve tampon kondansatör)……. 70
Şekil 4. 29. Köprü evirici devresi çıkışları: a) iki seviyeli çıkış, b) üç seviyeli çıkış……. 71
Şekil 4. 30. Çıkış gerilimi ve harmoniklerin α ile değişimi…… 73
Şekil 4. 31. İki seviyeli DGM çalışma modu dalga formları…….. 74
Şekil 4. 32. Üç seviyeli DGM çalışma modu dalga formları…….. 75
Şekil 4. 33. 11 seviyeli bir eviricinin prensip bağlantı şeması……... 76
Şekil 4. 34. 11 seviyeli eviricinin tipik dalga şekilleri…… 77
Şekil 4. 35. Şebekeye bağlı tek faz PV sistemlerin genel blok şeması……... 79
Şekil 4. 36.Sırası ile; a) merkezi eviricili sistem, b) dizi eviricili sistem, c) modül ile tümleşik eviricili sistem……. 80
Şekil 4. 37. PV eviricileri için güç düzenlemeleri…….. 82
Şekil 4. 38. DA/DA dönüştürücülü ve yalıtımlı PV evirici sistemi blok şeması; a) düşük frekansta, b) yüksek frekansta……. 83
Şekil 4. 39. DA/DA dönüştürücüde yüksek frekans transformatörü kullanan PV evirici…… 83
Şekil 4. 40. Yalıtımlı DA/DA dönüştürücü topolojileri; a) tam köprü, b) tekli bobin it-çek, c) çiftli bobin it-çek……... 84
Şekil 4. 41. Yalıtımsız DA/DA dönüştürücülü PV evirici sistemi; a) genel blok şeması, b) yükseltici dönüştürücü ve tam köprü uygulama örneği……. 85
Şekil 4. 42. Zaman paylaşımlı ikili mod sinüs modüleli, yükseltici dönüştürücülü tek faz evirici; a) devre yapısı, b) çalışma prensibi…… 86
Şekil 4. 43. Yalıtımlı DA/DA dönüştürücüsüz PV evirici sistemi; a) genel blok diyagramı, b) tam köprü ve şebeke yanlı transformatörlü uygulama……. 87
Şekil 4. 44. Transformatörsüz DA/DA dönüştürücüsüz PV evirici sistemi; a) genel blok diyagramı, b) tam köprü evirici uygulaması, c) çok seviyeli yapı 88
Şekil 5. 1. Fotavoltaik dizi güç-gerilim grafikleri…….. 91
Şekil 5. 2. Hızlı değişen ışıma durumunda DG yönteminin davranışı……... 92
Şekil 5. 3. DG yöntemi akış şeması…… 93
Şekil 5. 4. Bir PV dizisinin tipik akım-gerilim karakteristiği……. 94
Şekil 5. 5. Sabit gerilim yöntemi akış şeması……. 95
Şekil 5. 6. Sıcaklık ve ışımanın fonksiyonu olan açık devre geriliminin yüzdesi olarak MGN gerilimi……. 96
Şekil 5. 7. Artan eğilimli iletkenlik yöntemi akış şeması……... 99
Şekil 5. 8. Parazitik kapasite yöntemini uygulama devresi…… 101
Şekil 5. 9. Önerilen MGNİ algoritmasının prensip şeması……. 102
Şekil 5. 10. Önerilen MGNİ algoritmasının MG noktasına yakınsaması…….. 103
Şekil 6. 1. KC-120 güneş paneli akım-gerilim karakteristik eğrileri…….. 105
Şekil 6. 2. Dört parametre modeli ve tablo 6. 1. bilgilerinin kullanımı sonucunda KC-120 için elde edilen akım-gerilim grafikleri…….. 106
Şekil 6. 3.Dört parametre modeli ve tablo 6. 1. bilgilerinin kullanımı sonucunda KC-120 için elde edilen güç-gerilim grafikleri…… 106
Şekil 6. 4. Güneş paneli sistemi için pratik bir kaynak model…… 107

Şekil 6. 5. Düşürücü DA/DA dönüştürücülü MGN dışında yüklenmiş basit bir sistem…….. 108
Şekil 6. 6. Düşürücü DA/DA dönüştürücü ve GH içeren sistemin MATLAB Simulink Modeli……. 109
Şekil 6. 7. Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin akım, gerilim ve güç değişimleri…….. 109
Şekil 6. 8. Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin MG noktasındaki güç salınımı……... 110
Şekil 6.9. Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin MG noktasındaki akım salınımı……. 110
Şekil 6.10. Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin MG noktasındaki gerilim salınımı…….. 111
Şekil 6. 11. Temel geridönüşlü dönüştürücü a)devre şeması, b) örnek(sürekli mod) çalışma şekilleri, c) süreksiz mod(L<25µH) çalışma şekilleri…….. 114
Şekil6. 12. Simülasyonda kullanılan devre modeli……. 115
Şekil 6. 13. Primer akımı, sekonder akımı ve filtre kondansatör akımının değişimi……... 116
Şekil 6. 14. Akımların detayı…….. 116
Şekil 6. 15. İki panel seri bağlı durumda akım, gerilim ve güç…….. 117
Şekil 6. 16. Güç değişimi…… 117
Şekil 6. 17. Akım değişimi……. 118
Şekil 6. 18. Gerilim değişimi…….. 118
Şekil 6. 19. Yük gerilimi değişimi…….. 119
Şekil 6. 20. Simetrik sekonder sargılı geridönüşlü DA/AA dönüştürücü (evirici) devre şeması…….. 119
Şekil 6. 21. Tez çalışmasında kullanılan geridönüşlü dönüştürücünün, pasif bir yükle evirici olarak çalışması durumunda dalga şekilleri……. 120
Şekil 6.22 Simülasyonda kullanılan devre şeması…….. 121
Şekil.6 23. Panel akım gerilim ve güç değişimleri……. 121
Şekil 6. 24. Akım,gerilim değişimleri detay……... 122
Şekil 6. 25. Güç değişiminin detayı…… 122
Şekil 6. 26. Primer akımı, sekonder akımı, kondansatör akımı ve kaynak gerilimi değişimleri……. 123
Şekil 6. 27. Akım değişiminin detayı……. 123
Şekil 6. 28. Akımların daha detaylı görünüşü…… 124
Şekil 6. 29. Kaynağa aktarılan akımın değişimi……. 124
Şekil 6. 30. Kaynağa aktarılan gücün değişimi…….. 125
Şekil 6. 31. Önerilen sabit gecikmeli çalışma için denetim devresi prensip şeması…….. 127
Şekil 6.32. Önerilen sabit gecikmeli çalışma için referans dalga şekli……... 127
Şekil 6.33. Tez çalışması için geliştirilen uygulama devresinin prensip devre şeması…….. 128
Şekil 6.34. Uygulama devresinin fotoğrafı……. 129
Şekil 6.35. DA/DA çalışma deneyi prensip şeması…… 131
Şekil 6.36. Primer akımı değişimi…….. 131
Şekil 6. 37. Giriş akımına bağlı olarak çıkış gerilimi ve çıkış gücünün değişimi……... 132
Şekil 6. 38. Giriş akımına bağlı olarak giriş gücü ve çıkış gücünün değişimi… 133

Şekil 6. 39. Giriş akımına bağlı olarak güçteki verimin (çıkış gücü/giriş gücü) değişimi……... 133
Şekil 6. 40. Doğrultulmuş sinüs modüleli DA/AA çalışma deneyi prensip şeması…….. 134
Şekil 6. 41. Primer akımının değişimi…… 134
Şekil 6. 42. Primer akımının bir alternans boyunca değişimi……. 135
Şekil 6. 43.Yük uçlarındaki gerilimin değişimi…….. 135
Şekil 6. 44. Primer anahtarı üzerinde düşen gerilim……... 136
Şekil 6. 45. Primer anahtarı üzerinde düşen gerilimin detayı……. 137
Şekil 6. 46. Kaynak akımı……... 137
Şekil 6. 47. Kaynak gerilimi……... 138
Şekil 6. 48. Giriş akımına bağlı olarak çıkış gerilimi ve çıkış gücünün değişimi……... 138
Şekil 6. 49. Giriş akımına bağlı olarak giriş gücü ve çıkış gücünün değişimi… 139
Şekil 6. 50. Giriş akımına bağlı olarak güçteki verimin (çıkış gücü/giriş gücü) değişimi……... 139
Şekil 6. 51. Şebekeye paralel çalışma deneyi prensip şeması…… 140
Şekil 6. 52. Giriş akımına bağlı olarak giriş gücü ve şebekeye aktarılan güç değişimi……... 141
Şekil 6. 53. Giriş akımına bağlı olarak verimin (Şebekeye aktarılan güç/giriş gücü) değişimi……. 142

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 3. 1. On ayrı PV modeline ait 4 parametre değerlerini etkileyen sıcaklık katsayıları…… 27
Tablo 3. 2. Beş ayrı üretici firmanın ürettiği güneş panellerine ait, 5 parametrenin hesaplanmasında gereken bilgiler…….. 31
Tablo 6. 1. KC-120 güneş panelinin etiket ve katalog bilgilerinden elde edilen değerler……... 105
Tablo 6. 2. Giriş gerilimi sabit (30V) iken giriş akımının değişimine bağlı olarak giriş gücü, çıkış gerilimi, çıkış gücü ve verimin değişim değerleri……. 132
Tablo 6. 3. Giriş gerilimi sabit (RMS 30V) iken giriş akımı değişimine bağlı olarak giriş gücü, çıkış gerilimi, çıkış gücü ve verimin aldığı değerler…….. 136
Tablo 6. 4. Giriş gerilimi sabit (30V) iken giriş akımı değişimine bağlı olarak giriş gücü, çıkış gücü ve verimin aldığı değerler…… 141

SİMGELER DİZİNİ

a : Diyot kalite faktörü, (eV)
A : Aktif güneş hücresi alanı, (m^2)
AM : Hava kütlesi (Air mass)
a_r : Referans kalite faktörü, (eV)
c : Işık hızı, (m/s)
C_p : Parazitik kondansatör, (F)
D : Görev oranı
D_n : Elektronların yayınma katsayısı
D_p : Deliklerin yayınma katsayısı
E : Bobinde biriken enerji, (J)
F_n : Elektronların birleşme hızı katsayısı
F_p : Deliklerin birleşme hızı katsayısı
FF : Dolgu faktörü
g_L : Ani iletkenlik, (1/Ω)
g_p : Artan iletkenlik, (1/Ω)
h : Plank sabiti
I_{av} : Ortalama akım, (A)
I_C : Kondansatörden geçen akım, (A)
I_D : Diyottan geçen akım, (A)
I_{dizi} : Dizi akımı, (A)
I_{iav} : Giriş akımı ortalama değeri, (A)
I_L : Bobinden geçen akım, (A)
I_m : Maksimum akım, (A)
I_{max} : Maksimum akım, (A)
I_{min} : Minimum akım, (A)
$I_{m,mdl}$: Modülün maksimum akımı, (A)
I_{mpp} : Maksimum güç noktası akımı, (A)
I_{mr} : Referans maksimum akım, (A)
I_o : Çıkış akımı, (A)
I_{oav} : Çıkış akımı ortalama değeri, (A)
I_{olim} : Sürekli ve süreksiz mod arasındaki limit akım, (A)
I_p : Işımadan sağlanan fotovoltaik akım, (A)
I_{pr} : Referans fotovoltaik akım, (A)
I_{rec} : Birleşme akımı, (A)
I_s : p-n eklemi ters doyma akımı, (A)
I_S : Anahtarlama elemanından geçen akım, (A)
I_{sc} : Kısa devre akımı, (A)
$I_{sc,mdl}$: Modülün kısa devre akımı, (A)
I_{scr} : Referans kısa devre akımı, (A)
I_{sh} : Hücre paralel direnci (R_{sh}) üzerinden geçen akım, (A)
I_{sr} : Referans ters doyma akımı, (A)
I_{srec} : Hücre birleşme akımı ters doyma bileşeni, (A)
k : Boltzmann sabiti, (A)

L_n : Elektronların yayınma genişliği
L_p : Deliklerin yayınma genişliği
M : Paralel bağlı modül sayısı
M_{am} : Hava kütle modifiyecisi
M_{amr} : Referans hava kütle modifiyecisi
N : Seri bağlı modül sayısı
N_A : P bölgesindeki alıcı yoğunluğu
N_C : İletim bandı taşıyıcı yoğunluğu
N_D : n bölgesindeki verici yoğunluğu
N_s : seri bağlı hücre sayısı
N_V : Valans bandı taşıyıcı yoğunluğu
$P_{çık,elk}$: Hücre cıkışında elde edilen elektriksel güç, (W)
P_D : Diyotta harcanan güç, (W)
Pgün(Θ) : Θ açısına bağlı olarak hücreye gelen ışıma gücü, (W)
P_{GP} : Ortalama dalgalanma gücü, (W)
P_{in} : Güneş hücresine gelen toplam güç, (W)
P_m, P_{max} : Maksimum güç, (W)
P_{tip} : Tipik güç, (W)
P_S : Anahtarlama elemanında harcanan güç, (W)
R_{DSON} : Mosfet iletimde iken D-S arası direnci, (Ω)
R_o : Elektron ve deliklerin birleşme hızı
R_{opt} : Optimum yük direnci, (Ω)
R_s : Hücre seri direnci, (Ω)
R_{sh} : Hücre paralel direnci, (Ω)
R_{shr} : Referans paralel direnç, (Ω)
R_{sr} : Referans seri direnç, (Ω)
$R_{yük}$: Yük direnci, (Ω)
S : Anahtarlama elemanı
T : Periyot, (1/s)
T_c : Hücre sıcaklığı, (^oC)
t_d : Gecikme zamanı, (s)
T_{on},t_{on} : İletimde geçen süre, (s)
T_{off}, t_{off} : Kesimde geçen süre, (s)
T_r : Referans sıcaklık, (^oC)
v : Elektron ve deliklerin oluşma hızı
V_D : Diyot üzerinde düşen gerilim, (V)
V_{dizi} : Dizi gerilimi, (V)
V_{ds} : d (drain) ile s (source) arasındaki gerilim, (V)
V_i : Giriş gerilimi, (V)
V_L : Bobin üzerinde düşen gerilim, (V)
V_m : Maksimum gerilim, (V)
V_m^{STK} : Standard test koşullarındaki maksimum gerilim, (V)
$V_{m,mdl}$: Modül maksimum gerilimi, (V)
V_{mpp} : Maksimum güç noktası gerilimi, (V)
V_{mr} : Referans maksimum gerilim, (V)
V_o : Çıkış gerilimi, (V)
V_{oc} : Hücre açık devre gerilimi, (V)
V_{oc}^{STK} : Standard test koşulları açık devre gerilimi, (V)

$V_{oc,mdl}$: Modül açık devre gerilimi, (V)
V_{ocr} : Referans açık devre gerilimi
V_S : Anahtarlama elemanı üzerinde düşen gerilim, (V)
q : Bir elektronun yükü
Q : Işıma (insolation, irradiance), (W/m^2)
Q_r : Referans ışıma, (W/m^2)
W_1 : p bölgesi bant aralığı ortasının fermi seviyesine enerji uzaklığı, (eV)
W_2 : n bölgesi bant aralığı ortasının fermi seviyesine enerji uzaklığı, (eV)
W_F : Fermi enerji seviyesi, (eV)
W_{CN} : n bölgesi iletim bandı enerji seviyesi, (eV)
W_{CP} : p bölgesi iletim bandı enerji seviyesi, (eV)
W_o : Valans bandı ile iletim bandı arasındaki enerji aralığı (E_g) , (eV)
W_{VN} : n bölgesi valans bandı enerji seviyesi, (eV)
W_{VP} : p bölgesi valans bandı enerji seviyesi, (eV)
x : yarı iletken eklemde herhangi bir konum
X : Yüksek ışıma seviyelerinde yoğunluk faktörü
λ : Işık dalga boyu, (^oA)
η : Güneş hücresi sistem verimi, (%)
η_m : Güneş hücresi maksimum verimi, (%)
Θ : Güneş ışınlarının hücre yüzeyine geliş açısı, (Derece)
β_{Vmp} : Maksimum güç noktası gerilimi sıcaklık çarpanı, ($V/^oC$ veya $1/^oC$)
β_{Voc} : Açık devre gerilimi sıcaklık çarpanı, ($V/^oC$ veya $1/^oC$)
α_{Imp} : Maksimum güç noktası akımı sıcaklık çarpanı, ($A/^oC$ veya $1/^oC$)
α_{Isc} : Kısa devre akımı sıcaklık çarpanı, ($A/^oC$ veya $1/^oC$)
ε : Elektron volt olarak enerji bant aralığı, (eV)

Kısaltmalar

AA : Alternatif akım
AM : Hava kütlesi (Air mass)
BJT : Bipolar eklemli transistor
ÇN : Çalışma noktası
$ÇN_{opt}$: Optimum çalışma noktası
DG : Değiştir gözle
DGM : Darbe genişlik modülasyonu
DSP : Sayısal işaret işleyici
GH : Güneş hücresi
GSM : Küresel mobil haberleşme sistemi
I-V : Akım gerilim
IGBT : Kapısı yalıtımlı bipolar transistor
MG : Maksimum güç
MGN : Maksimum güç noktası
MGNİ : Maksimum güç noktası izleyicisi
MOSFET : Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör
PC : Personel bilgisayar
p-n : p ve n katkılı bölgelerden oluşan yarı iletken eklem
PV : Güneş paneli
RMS : Etkin değer

RTU : Alıcı verici ünite
SMPS : Anahtarlamalı mod güç kaynağı
YD : Yük doğrusu
YD_{opt} : Optimum yük doğrusu

GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMLERİNDE BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ İLE BİR ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Özgür YAKIŞAN

Anahtar Kelimeler: Güneş pili, fotovoltaik şebekeye bağlı sistem, maksimum güç izleme, geridönüşlü dönüştürücü

Özet: Bu tezde şebekeye paralel çalışan düşük güçlü güneş hücresi temelli bir sistem için maksimum güç izleme yöntemleri incelenmiş ve sistemde kullanılabilecek evirici yapısının tasarımı verilmiştir. Bir geridönüşlü DA/DA dönüştürücü modeli önerilmiş, tasarımı yapılmıştır. Önerilen bu geridönüşlü dönüştürücünün DA/DA dönüştürücü olarak, sinüs modüleli DA/DA dönüştürücü olarak ve DA/AA dönüştürücü olarak kullanılmasının ayrı ayrı prensipleri, MATLAB Simulink devre şemaları ve simulasyon sonuçları verilmiştir

Akım referansına bağlı olarak çalışma frekansı 15-25 kHz arasında değişen şebekeye paralel çalışan geridönüşlü dönüştürücünün bir uygulama devresi tasarlanmıştır. Sistemin sabit giriş gerilimli bir DA kaynak üzerinden beslenmesi durumunda DA/DA dönüştürücü olarak, sinüs modüleli DA/DA dönüştürücü olarak ve şebekeye paralel çalıştırılması uygulamaları ve sonuçları verilmiştir. Son olarak Kyocera KC120 PV panelinden iki adet seri bağlanarak sistemin güneş paneli üzerinden beslenmesi uygulaması ve sonuçları verilmiştir.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A GRID CONNECTED FLY-BACK INVERTER AND A MAXIMUM POWER POINT TRACKER IN PHOTOVOLTAIC ENERGY GENERATION SYSTEMS

Özgür YAKIŞAN

Key Words: solar cell, photovoltaic grid-tide, power point tracking, flyback convertor

Abstract: At this thesis, power point tracking methods for a low power solar cell based system that works in parallel with network are researched and the design of the inverter structure that can be used in the system is given. A DC/DC flyback converter model is suggested and designed. The principles of the usage of flyback converter suggested in the model are given separately for DC/DC convertor, sinus modulated DC/DC converter and DC/AC converter. In addition, MATLAB Simulink circuit schemes and simulation results are given.

A Flyback converter's implementation circuit that works in parallel with a network varying between a working reference of 15kHz and 25 kHz (depending on the current reference) is designed. Under the circumstance of supplying the system with a constant input voltage over a DC source, the implementations and results of system that is worked as a DC/DC convertor, as a sinus modulated DC/DC converter and that is worked in parallel with network are given. Finally, the implementation and the results of the system that is supplied over a solar panel that is connected two times serially with Kyocera KC 120 PV panel are given.

1. GİRİŞ

Hızla gelişen teknoloji, sanayileşme ve kentleşmeyi beraberinde taşımaktadır. Bütün bunlara paralel olarak her gün daha fazla enerji kullanımı zorunluluğu doğmaktadır. Bugüne kadar kullanılan enerji kaynaklarının (fosil yakıtlar, nükleer kaynaklar, su gücü v. b.) çoğunlukla bulunması, çıkarılması, işlenmesi ve taşınmasının yüksek maliyet gerektirmesi, savaşlara neden olabilecek kadar stratejik olması, bakım ve işletme maliyetlerinin yüksek olması, çevre kirliliğinde belirgin bir paya sahip olmaları ve bütün bunlardan öte sınırlı bir rezerve sahip olmaları, daha temiz ve rezerv sınırı olmayan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi doğurmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en gözde olanı ise güneş enerjisidir.

Literatürde dünya çapının kapladığı alana gelen güneş enerjisi gücünün yaklaşık $178x10^{15}$ W olduğu, bir yılda dünyaya düşen güneş enerjisinin 1. $22x10^{14}$ ton petrole eşdeğer olduğu, bu değerin bilinen kömür rezervlerinin 50 katı ve bilinen petrol rezervlerinin 800 katı olduğu, yıllık ortalama radyasyon yoğunluğunun ülkemizde 316.07 cal/cm^2/gün olduğu, ülkemizin bütün yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisinin $1.2x10^{11}$ milyar ton taş kömürüne eşdeğer olduğu, bu enerjinin binde birinin %30 verimle toplanması durumunda ülkemizin kullanımına sunulacak yıllık güneş enerjisinin 23 milyon ton petrole eşdeğer olduğu verilmiştir [1].

Ayrıca 2002 yılı itibarı ile dünya toplam enerji gücü ihtiyacının yalnızca %0.004'ü kadar güneş hücresi (GH) temelli sistemlerin kurulu gücü olduğu, Bu gücün 2010 yılına kadar %0.13, 2020 yılına kadar %1 ve 2030-2050 yılları arasında da %5 ile %10 arasında bir değere ulaşacağı literatürde verilmiştir [2].

Güneş enerjisinden elektrik enerjisinin elde edilmesi GH olarak adlandırılan yarı iletken p-n eklemlerini kullanımı ile 1954 yıllarında başlasa da esas ilgi 1973 yılında yaşanan 1. petrol bunalımından sonra belirginleşmiştir. Uzun bir süre sadece üniversitelerin araştırmalarına konu olan güneş hücrelerinden elektrik enerjisi

sağlama konusu, hem çevre açısından temiz olması, hem ulaşılması kolay olması ve hem de tükenme riskinin bulunmaması gibi çok cazip özelliklerinden dolayı dünyadaki bir çok ülkenin ve büyük şirketlerin ilgi alanı olmuştur. Dünyadaki gelişmelere paralel olarak ülkemizde de GH temelli enerji araştırmaları üniversitelerde ve resmi araştırma ve enerji kurumlarınca yapılmaktadır. Gerek dünyada gerekse ülkemizde var olan GH temelli sistemlere ait bazı örnekler bölüm 4'de verilmiştir.

Bir yarı iletken p-n eklemi olan GH temelli güneş panelleri güneş enerjisini doğrudan doğru akım (DA) modunda elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu enerji doğrudan kullanılabileceği gibi, çoğu zaman DA/DA dönüştürücüler, eviriciler, doğrultucular, transformatörler, anahtarlama elamanları, filtreleme elemanları ve maksimum güç izleme sistemleri gibi elektrik-elektronik elamanları ile beraber kullanılarak sistemde istenilen tür enerji ve yüksek verim elde edilir.

Yarı iletken teknolojisinde ve GH temelli enerji sistemleri teknolojilerindeki hızlı gelişmeler sistem verimini arttırmış (%4'ten %15'e) ve sistem maliyetini düşürmüştür (Watt başına 750$'dan 5$'a). Ancak bu maliyet yeterince makul görülmeyip hedef Watt başına bir dolardır. 1.5 kWh/gün kapasitesine sahip GH temelli bir sistemde, Güneş hücresi maliyetinin toplam maliyetin %57'sini kapsadığı ve geriye kalan maliyetin %30 aküler, %5 DA/AA dönüştürücü, %2 maksimum güç noktası izleyicisi, %6 diğerleri şeklinde dağılım gösterdiği literatürde verilmiştir [3].

GH temelli enerji sistemleri ya tek başlarına (stand alone) ya da mevcut şebeke ile birlikte (grid tide) çalışırlar. Şebeke ile paralel çalışmanın en önemli avantajı, enerji fazlalığı durumunda fazla enerjinin şebekeye aktarılması ve enerji yetersizliği durumunda şebekeden enerji çekerek, hem enerji israfının önlenmesi hem de enerji sürekliliğinin teminidir. Ayrıca depolama problemi ve maliyetinden kurtulma da önemli bir avantaj olarak sayabilir. GH temelli sistemlerde girişe gelen gerilim birçok iç ve dış parametrelere bağlı olarak sürekli değiştiğinden, hem bu değişimi dikkate alan hem de her yük koşulunda yüke maksimum gücü aktaran maksimum güç izleme işlemi hayati önemdedir. Bunun için de bu sistemlerin vazgeçilmez elemanları başında maksimum güç noktası izleyicisi (MGNİ) gelir.

GH temelli sistemlerle ilgili literatür incelendiğinde çalışmaların; tasarım, üretim ve var olanların verimini arttırma, modelleme, akü şarjı, şebekeden bağımsız çalışan su arıtma ve su pompalama çalışmaları, maksimum güç izleme algoritmaları geliştirme çalışmaları ve şebekeye paralel bağlı çalışan sistemler olarak gruplandığı görülmektedir. Ülkemizde ve dünyada yapılan bu çalışma örneklerinden bazıları sırayla aşağıda verilmiştir.

2002 yılında BOZTEPE tarafında yapılan çalışmada (Doktora tez); hem şebekeye bağlı ve hem de şebekeden bağımsız çalışabilen bir evirici geliştirilerek, şebekeye bağlı çalışan sistemlere şebekeden bağımsız çalışma yeteneği eklenerek yüke aktarılan enerjinin kesintisizliğini hedefleyen ve enerji verimliliği oranı %48.7 olan bir sistem tasarımı, simülasyonu, pratik uygulaması ve diğer sistemlerle karşılaştırılması verilmiştir.

2004 yılında ATLAM tarafından yapılan çalışmada (Doktora tez); GH temelli sistemlerin performans tanımlamalarında kullanılabilecek alternatif bir model geliştirilerek gerçek bir DA motorlu santrifüj su pompa sistemi üzerinde test edilmiştir.

2006 yılında KARATEPE tarafında yapılan çalışmada (Doktora tez); GH temelli jeneratörlerde kısmi gölgelenmelerde kaynaklanan güç kayıplarını azaltmak için gölgelenen hücreleri devre dışı bırakan, farklı çalışma koşullarında doğruluğu yüksek bir fotovoltaik (PV) modül modeli önerilmiş, simülasyonları, uygulamaları ve karşılaştırmaları verilmiştir.

2004 yılında YILMAZ, ERTAN ve LEBLEBİCİOĞLU ‘nun birlikte yaptıkları çalışmada (ACCEMP 2004, sayfa 402-407) bulanık mantık temelli bir maksimum güç noktası izleyici ile denetlenen, şebeke bağlantılı bir fazlı DGM eviricili bir sistemin tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan evirici şebeke frekanslı bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Giriş gerilimi 120V (açık devre)‘luk bir güneş hücresi dizisi kullanılmış, yaklaşık giriş gücü 656W civarındadır. %91 dolayında bir verim sağlanmıştır. Sunulan çalışma şebeke bağlantılı sistemler arasında verim açısından oldukça başarılıdır.

2005 yılında DURU tarafından yapılan çalışmada [(SOLAR ENERGY 80(2006) 812-822] maksimum güç noktasını maksimum gücün bir fonksiyonu olarak temellendiren bir maksimum güç noktası izleyicisi algoritması değişken yük ve ışıma altındaki GH temelli jeneratörler için önerilmiş, modellemesi, simülasyon değerleri ve uygulama sonuçları sunulmuştur. Sunulan yöntemin özellikle ışımadaki hızlı değişimler (parçalı bulutlu havalar) için çok uygun olduğu, pasif yükler, motor uygulamaları ve akü şarjı için kullanılabilecek iyi bir yöntem olduğu açıktır.

2004 yılında DE SOTO tarafından yapılan çalışmada (Yüksek lisans tez, Wisconsin Üniversitesi-Madison) güneş enerjisinin temel bilgileri sunulmuş, parametreleri değerlendirilmiştir. GH temelli dizilerin performans analizinde kullanılabilecek bir fiziksel model (5 parametre modeli) sunulmuş, bu modelin uygulanabilirliği ve diğer fiziksel modellerden farklılığı karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

2000 yılında FITZPATRICK tarafından yapılan çalışmada (North Carolina Solar Center) herhangi bir çalışma koşulunda Güneş hücresine ait dört parametre biliniyorsa, bu parametreleri kullanarak her bir çalışma noktası için akım gerilim karakteristiğini belirlemede kullanılan, gerek tek bir modüle gerekse M adet paralel ve N adet seri modülden oluşan diziye uyarlanabilen bir model geliştirilmiş, modelin simülasyon sonuçları ve uygulama sonuçlarının % 5 lik bir hata payı ile aynı olduğu gösterilmiştir.

2004 yılında BLAABJERG, TEODORESCU, CHEN (Aalborg University, Denmark) ve LISERRE (Politecnico di Bari, CEMD research group, Italy)'nın birlikte yaptıkları çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan güç dönüştürücüleri ve kontrol teknikleri hakkında yapılan çalışmalar topluca değerlendirilip bir sınıflandırılması ve her bir sistemin çalışması prensipleri itibarı ile verilmiştir. Şebekeye paralel çalışan Tek faz PV eviricilerin topolojileri ve kontrol teknikleri üzerine yapılan çalışmalar sınıflandırılmış ve her bir sistemin çalışması prensipleri itibarı ile verilmiştir.

2002 yılında HOHM ve ROOP (South Dakota State Universty, Brookings, USA) birlikte yaptıkları çalışmada maksimum güç noktasını izleme algoritmaları üzerine yapılan çalışmalar topluca ele alınmış, her birinin çalışma ilkeleri prensipleri itibarı ile verilmiştir. Her bir algoritmanın uygulanabilirlik ilkeleri, avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

2005 yılında KYRITSIS ve DİĞERLERİ tarafından yapılan çalışmada (Power Electronics and Aplcations, 2005 European Conference on) Şebekeye paralel bağlı merkezileştirilmemiş PV sistemleri için bir geridönüşlü dönüştürücü yapısının dizaynı ve kontrol stratejisi önerilmiştir. Sabit frekanslı çalışma ile değişken frekanslı çalışma formlarının güç transferleri açısından karşılaştırılması yapılmış ve değişken frekanslı çalışmanın daha verimli olduğu simulasyonlar ve deneysel sonuçları ile verilmiştir.

2005 yılında KASA ve DİĞERLERİ tarafından yapılan çalışmada (Transactions On Industrial Electronics, Vol 52, 1145-1152) maksimum 300W' a kadar olan düşük güçteki PV sistemleri için akım sensörü kullanmadan maksimum güç (MG) kontrolü yapabilen bir geridönüşlü dönüştürücü önerilmiştir. Akım sensörü kullanmadan yapılan sistemin akım sensörü kullanılanlar kadar başarılı olduğu gösterilmiştir. Bu da küçük güçlü sistemlerin paralel bağlanarak daha büyük güçlü sistemlerin elde edilmesinde maliyet açısından oldukça azalma sağlamıştır. Hem teorik hemde uygulamada, önerilen akım sensörsüz geridönüşlü dönüştürücünün düşük güçlü PV sistemlerine (9kHz çalışma frekansı) başarıyla uygulanabileceği verilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, şebeke bağlantılı PV paneli veya dizisi beslemeli küçük güçlü bir sistemin geridönüşlü bir dönüştürücü kullanılarak gerçeklenmesi ve maksimum güç noktasının izlenmesidir. Literatürde sunulan benzer çalışmalardan farklı olarak, geridönüşlü dönüştürücünün sabit bir zaman gecikmesi ile çalışması sağlanmış, basit ve etkili bir maksimum güç izleme algoritması önerilmiştir. Önerilen maksimum güç izleme algoritması düşük maliyetli ve 8 bitlik basit bir PIC 16F877 mikro denetleyici ile gerçeklenmiştir. Mikrodenetleyicinin gerçekleştirdiği denetim üç telli seri haberleşme yolu ile DS 1267 sayısal potansiyometresi ile ayarlanabilir genlikte tam dalga doğrultulmuş bir akım referansı elde edilmiştir. Gerçekleştirilen sistem,

ülkemizde güneş enerjisi kullanılarak şebekeye güç aktarımını hedefleyen diğer çalışmalardan farklı olarak geri dönüşlü dönüştürücü kullanılması ve uygulanan maksimum güç izleme algoritması açısından bir yenilik getirmektedir.

Tezin 2. bölümünde GH temelli sistemlerin temel elemanı olan güneş hücresinin bir p-n eklemi olarak fiziksel yapısı, çalışması, elektriksel eşdeğer devreleri, matematiksel model ifadeleri, akım gerilim karakteristiği, modellemede kullanılan parametreleri, bu parametrelerin bağlı olduğu iç ve dış parametreler incelenmiştir.

Tezin 3. bölümünde güneş hücresi, paneli ve dizileri için geliştirilen matematiksel modellemeler (3 parametre modeli, 4 parametre modeli, 5 parametre modeli, A. Hadj Arab ve diğerlerinin denklemi modeli), sırayla, basitten karmaşığa ve az parametreliden çok parametreliye doğru incelenmiştir. Her bir modelin güneş hücresinin iç ve dış parametrelerine bağlı değişimi, farklı çalışma noktaları için model parametrelerinin hesaplanması yöntemleri analiz edilmiştir.

Tezin 4. bölümünde bir enerji kaynağı olarak Güneş hücresinin (paneli veya dizisinin) enerji sistemlerinde kullanımı ve ürettiği enerjinin nasıl denetlenebildiği incelenmiştir. GH temelli sistemin bir yükü doğrudan beslemesi durumunda oluşan sakıncalar, sistemlerde DA/DA dönüştürücü kullanma zorunluluğu, bu sistemlerde kullanılan dönüştürücülerin çeşitleri, çalışma prensipleri incelenmiştir. Sistem alternatif akım (AA) bir yükü besleyecek ise, doğru akımı alternatif akıma dönüştüren evirici yapıları, çeşitleri ve çalışma prensipleri incelenmiştir. Sistemin tek başına, karma veya şebekeye paralel çalışma durumları ayrı ayrı irdelenmiştir. Şebekeye paralel çalışan sistemlerin topolojik sınıflandırılması ve her bir topolojinin çalışmasının prensipleri itibarı ile incelenmesi analiz edilmiştir.

Tezin 5. bölümünde maksimum güç noktası izleyicisinin gerekliliği, maksimum güç noktası izleme algoritmaları, bu algoritmaların avantaj ve dezavantajları irdelenmiştir. Ayrıt 5.7.'de maksimum güç noktasını izlemek için önerilen maksimum güç noktasını izleme algoritmasının tanıtımı ve nasıl çalıştığı sunulmuştur.

Tezin 6. bölümünde uygulamada kullanılan GH paneli etiket değerleri ve Bölüm 3'te incelenen 4 parametre modelinden elde edilen akım-gerilim verileri kullanılarak basit bir sistemin modellenmesi ve analizi yapılmıştır. GH içeren bir sistemin dinamik olarak MATLAB Simulink ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Uygulaması yapılan şebeke bağlantılı geridöüşlü dönüştürücünün çalışma prensipleri, tasarımı, sistemin DA/DA dönüştürücü olarak ve tam dalga doğrultulmuş sinüs dalga modülasyonlu DA/DA dönüştürücü olarak çalışması simülasyonlarla incelenmiştir. Bu bölümde son olarak tasarlanan uygulama devreleri (DA/DA dönüştürücü olarak, DA/AA dönüştürücü olarak ve şebekeye paralel çalışma olarak) ile ilgili devrelerin şemaları ve deneysel sonuçları verilmiştir.

Tezin 7. bölümünde yapılan bu çalışmanın genel bir değerlendirilmesi, sonuç ve önerileri verilmiştir.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİMİNDE TEMEL KAVRAMLAR

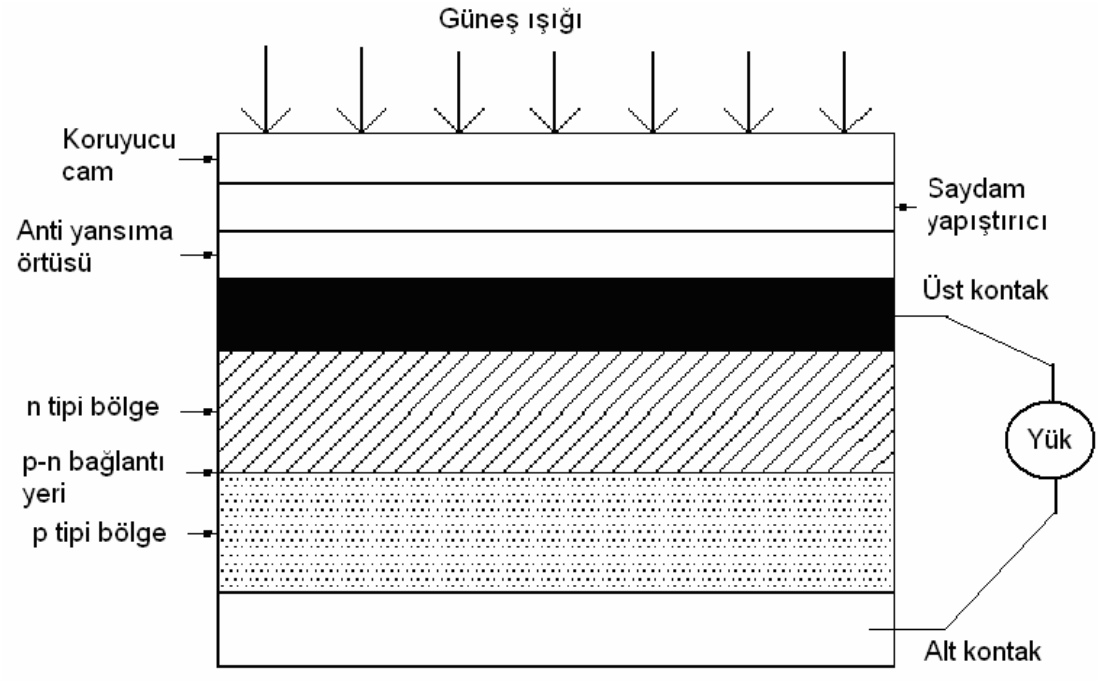
Işığa maruz kalan hemen hemen bütün cisimler, yapılarına göre farklılıklar gösterseler de, gelen ışımanın bir kısmını bünyelerinde soğururlar. Bünyelerinde soğurdukları bu enerji "hc/λ" (h; Plank sabiti, c; ışık hızı, λ; ışık dalga boyu) büyüklüğüne ve cismin enerji bant aralığı (W_o) büyüklüğüne bağlı olarak, valans bandından iletim bandına elektronların geçişi ortaya çıkar. İletim bandına geçen her bir elektron, iletim bandında bir serbest elektron (n) oluştururken valans bandında da bir delik (p) oluşturur. Soğrulan enerjiye bağlı olarak ışık enerjisinin bir kısmı cisme aktarılmış olur. Yapılarına bağlı olarak cisimler bu enerjiye farklı tepkiler verirler.

Bir p-n eklemi olan güneş hücresi ise soğurduğu bu enerjinin bir kısmını bünyesinde sıcaklığa dönüştürürken, bir kısmını da uçlarında bir elektriksel potansiyele (elektrik enerjisine) dönüştürür. Bu bölümde; p-n eklemi olarak tanımlanan güneş hücresinin ışımadan soğurduğu enerjiyi elektrik enerjisine nasıl dönüştürdüğü, burada etkin olan parametrelerin neler ve ne oranda etkin oldukları, bir güneş hücresinin hangi parametrelerle tanımlanıp modellendiği, yarı iletken fiziğinin aşırı detaylarına girmeden incelenmiştir.

2. 1. Güneş Hücresinin Yapısı

Fotovoltaik hücreler Besquerel tarafından ilk kez 1839'da tanımlanan fotovoltaik etkiyi kullanır [4]. İki benzemez malzemenin eklemi fotonlarla aydınlatıldığı zaman bir elektrik potansiyeli oluşur. Pek çok modern güneş hücresi yarı iletken p-n eklemini kullanır.

Emilen ışık enerjisinin sonucu;
1-Bant aralığına bağlı potansiyeli olan yük taşıyıcılarının sayısında artış görülür.
2-Hücre ısınması (performansı azaltır) oluşur.
Bir güneş hücresi yapısının kesiti şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1: Güneş hücresi yapısının kesiti

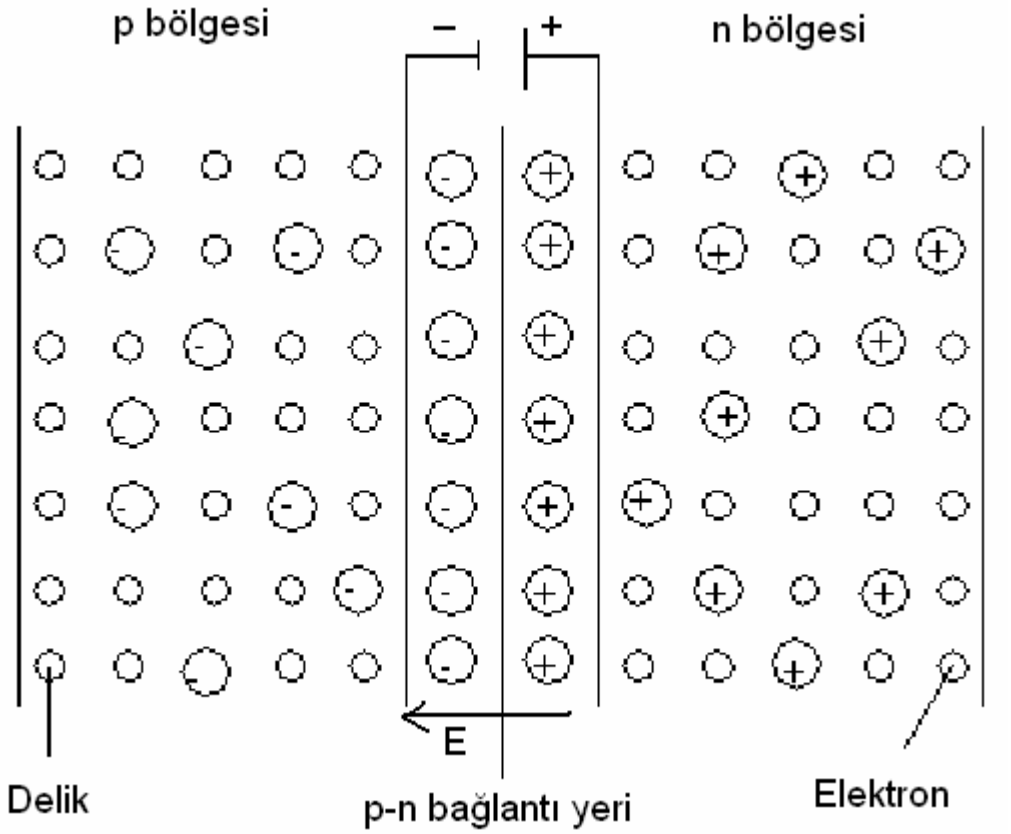
Işık n-tipi malzeme üzerine düşer. n-tipi malzeme üzerindeki madeni kısım, yüzeyi maksimum yüzey alanları iletkenliği ve minimum yüzey kaplaması sağlayan bir ince iletken örgüsüdür. Metalik arka levha p-tipi malzeme üzerinde temas yüzeyi olarak çalışır. Tüm düzenek şeffaf bir yapıştırıcı ile yüzeye tutturulan cam tabaka tarafından korunur.

Çok sayıda hücreden bir modül oluşturmak için hücreler seri/paralel kombinasyonunda bağlanır. Çok sayıda modülün bağlantısı ile dizi oluşur. Genellikle hücreler tek modül halinde bağlanarak paketlenir ve kullanıcı tarafından kurulup bağlantıları sağlanarak dizi oluşturulur.

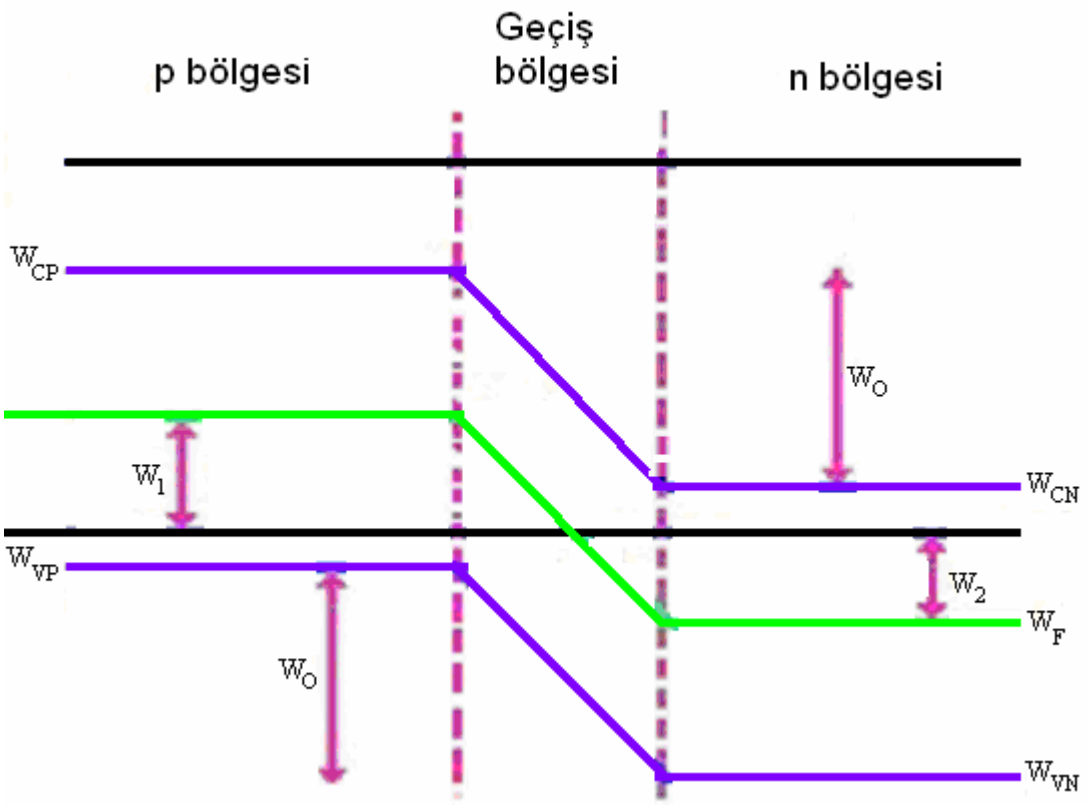
2. 2. p-n Eklemi Olarak Güneş Hücresi

Fotovoltaik enerji dönüşümü için kullanılan en yaygın yapı p-n eklemidir. Bir yarı iletken malzemenin bir bölgesi p tipi ve diğer bölgesinin n tipi katkı malzemesi ile katkılanması sonucunda oluşan yapıya p-n eklemi adı verilir. Foton enerjisi (hc/λ), çıkış enerjisinden (W_o) büyük olan bir elektromanyetik ışıma altında valans bandındaki elektronlar iletim bandına geçerek elektron-delik çiftleri oluştururlar.

Bunun sonucunda p tipi bölgedeki delikler n tipi bölgeye ve n tipi bölgedeki elektronlar p tipi bölgeye yayınırlar (difüzyon). Ancak elektron ve delikler karşı bölgelere geçer geçmez karşıtları ile birbirlerini yok ettiklerinden yayınma olayı süreklilik kazanamaz. Karşıtları ile birleşip yok etmeler sonucunda p-n ekleminin p-n bağlantı yerinin iki yakasında taşıyıcı açısından fakirleşmiş bir bölge oluşur. Hücrenin p tipi bölümünde negatif bir yük birikimi ve n tipi bölümünde pozitif yük birikimi oluşur Bütün bunların sonucunda şekil 2.2'de görüldüğü gibi bir elektrik alan ve p-n ekleminin uçlarında bir potansiyel farkı oluşur. Bunun sonucu olarak elektronlar ve delikler bölge değiştirirken yavaşlayıp dururlar. Bu potansiyel farkı şekil 2.3'de görüldüğü gibi aynı seviyeye gelip denge durumu oluşuncaya kadar devam eder. Işık kristal içerisine nüfuz ettiğinde yarı iletkenin herhangi bir konumunda (x) oluşan elektron ve deliklerin sayısı G (x,v) oluşma hızı tarafından belirlenir [1].



Şekil.2.2**:** p-n Eklemi ve iç akım



Şekil 2.3**:** p-n eklemi ve enerji seviyeleri

Bir güneş hücresinden sağlanabilecek maksimum akım, I_p'dir. Bir elektik devresine bağlı bulunan güneş hücresinin vereceği akım ise, akım gerilim karakteristiği ve dış yük direncine bağlı olarak daha küçük olacaktır. İdeal bir güneş hücresinin akım-gerilim karakteristiği denklem (2.1) ile belirlenir.

$$I = I_p - I_s\left[e^{qV/kT_c} - 1\right] \tag{2.1}$$

Burada; "V" eklem üzerindeki gerilim düşümünü, "I_s" doyma akımını, "q" bir elektronun yükünü, "k" Boltzmann sabitini ve "T_c" hücre sıcaklığını ifade eder. "F_n" ve "F_p" elektron ve deliklerin birleşme hızlarına bağlı katsayılar olmak üzere doyma akımı (I_s) denklem (2.2) ile verilir.

$$I_s = qAN_cN_v\left[\frac{D_nF_p}{L_nN_A} + \frac{D_pF_n}{L_pN_D}\right]e^{-E_g/kT_c} \tag{2.2}$$

Burada;

A: Aktif güneş hücresi alanını

N_c: İletim bandı yoğunluğunu

N_v: Valans bandı yoğunluğunu

D_n: Elektronların yayınma katsayısını

D_p: Deliklerin yayınma katsayısını

N_D: n bölgesindeki verici yoğunluğunu

N_A: p bölgesindeki alıcı yoğunluğunu

L_n: Elektronlar için yayınma genişliğini

L_p: Delikler için yayınma genişliğini

ifade eder.

Geçiş bölgesindeki birleşmeler göz önüne alınırsa, denklem (2.1)'deki yayınma akımına ilaveten birleşme akımı bileşenini de akım denklemine ilave etmek gerekir. Geçiş bölgesindeki elektron ve deliklerin birleşme hızlarının (R_o) sabit varsayımı ile birleşme akımı (I_{rec}); denklem (2.3) ile ifade edilir.

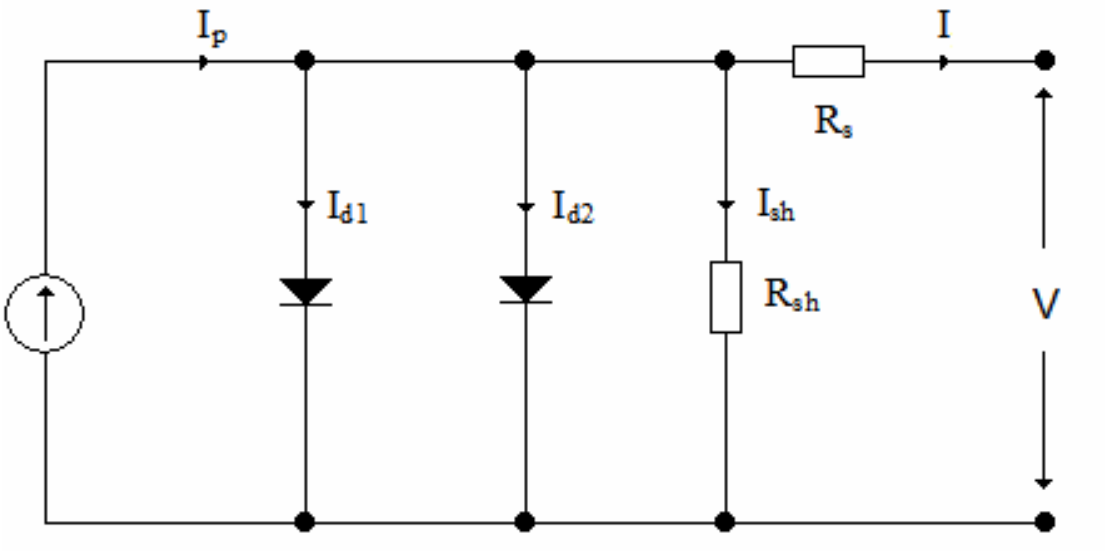
$$I_{rec} = I_{srec}\left(e^{qV/2kT_c} - 1\right) \tag{2.3}$$

Bu durumda güneş hücresinin akım gerilim karakteristiği (2.1) ve (2.3) denklemleri birleştirilerek elde edilir.

$$I = I_p - I_s\left(e^{qV/kT_c} - 1\right) - I_{srec}\left(e^{qV/2kT_c} - 1\right) \tag{2.4}$$

Yarı iletkenin kütle direnci ile kontakların direncini ifade eden "R_s" seri direnci ve hücrenin uçları çevresindeki kaçak akımları ifade eden "R_{sh}" paralel direnci de hesaba katılırsa güneş hücresinin akım gerilim karakteristiğinin genel ifadesi olarak denklem (2.5) elde edilir. Bu ifadenin elektriksel eşdeğeri şekil 2.4'de verilmiştir.

$$I = I_p - I_s\left(e^{q(V+IR_s)/kT_c} - 1\right) - I_{srec}\left(e^{q(V+IR_s)/2kT_c} - 1\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{2.5}$$



Şekil.2.4: Bir güneş hücresinin çift diyotlu elektriksel eşdeğer devresi

2. 3. Güneş Hücresinin Akım Gerilim Karakteristiğini Etkileyen Temel Parametreler

Güneş hücresinin akım gerilim karakteristiğini etkileyen temel parametreler, iç parametreler ve dış parametreler olmak üzere iki gruba ayrılırlar [5].

2. 3. 1. İç parametreler:

Seri direnç (R_s): Güneş hücresinin gerilim üreteci gibi davrandığı bölgede I-V karakteristik eğrisinin eğiminin düşmesine neden olur.
Paralel direnç (R_{sh}): Güneş hücresinin akım üreteci gibi davrandığı bölgede I-V karakteristik eğrisinin eğiminin artmasına neden olur.
Doyma akımı (I_s): Açık devre gerilimini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Sıcaklığa bağımlıdır. Silisyumda her 10^oC'lik artışta ikiye katlanır. Güneş hücresi için geliştirilen tüm modellerde ihmal edilmesi söz konusu olmayan ve mutlaka hesaba katılan önemli bir parametredir. En basit modellemede (üç parametre modeli) bile temel parametrelerden biridir.

2. 3. 2. Dış parametreler:

Işıma (insolation, irradiance) (Q): Işımanın düşük seviyelerinde kısa devre akımı ışıma ile orantılı olarak değişir. Açık devre gerilimi artan ışıma ile birlikte küçük oranlarda artar. Modülün maksimum gücü ışıma ile orantılıdır. "K" sabit bir değer ve "Q" ışıma ($kW/_{m}^{2}$) olmak üzere:

Normal ışıma seviyelerinde;

$$I_{sc} = I = KQ \tag{2.6}$$

$$V_{oc} = \frac{akT_c}{q \ln\left(KQ \big/ I_s\right)} \tag{2.7}$$

denklemleri kullanılır. Burada "a"; diyotun kalite faktörüdür.

Yüksek ışıma seviyelerinde (X yoğunluk faktörünü tanımlamaktadır);

$$I_{sc} = KQ - I_s\left(e^{qR_s I_{sc} \big/ akT_c} - 1\right) \tag{2.8}$$

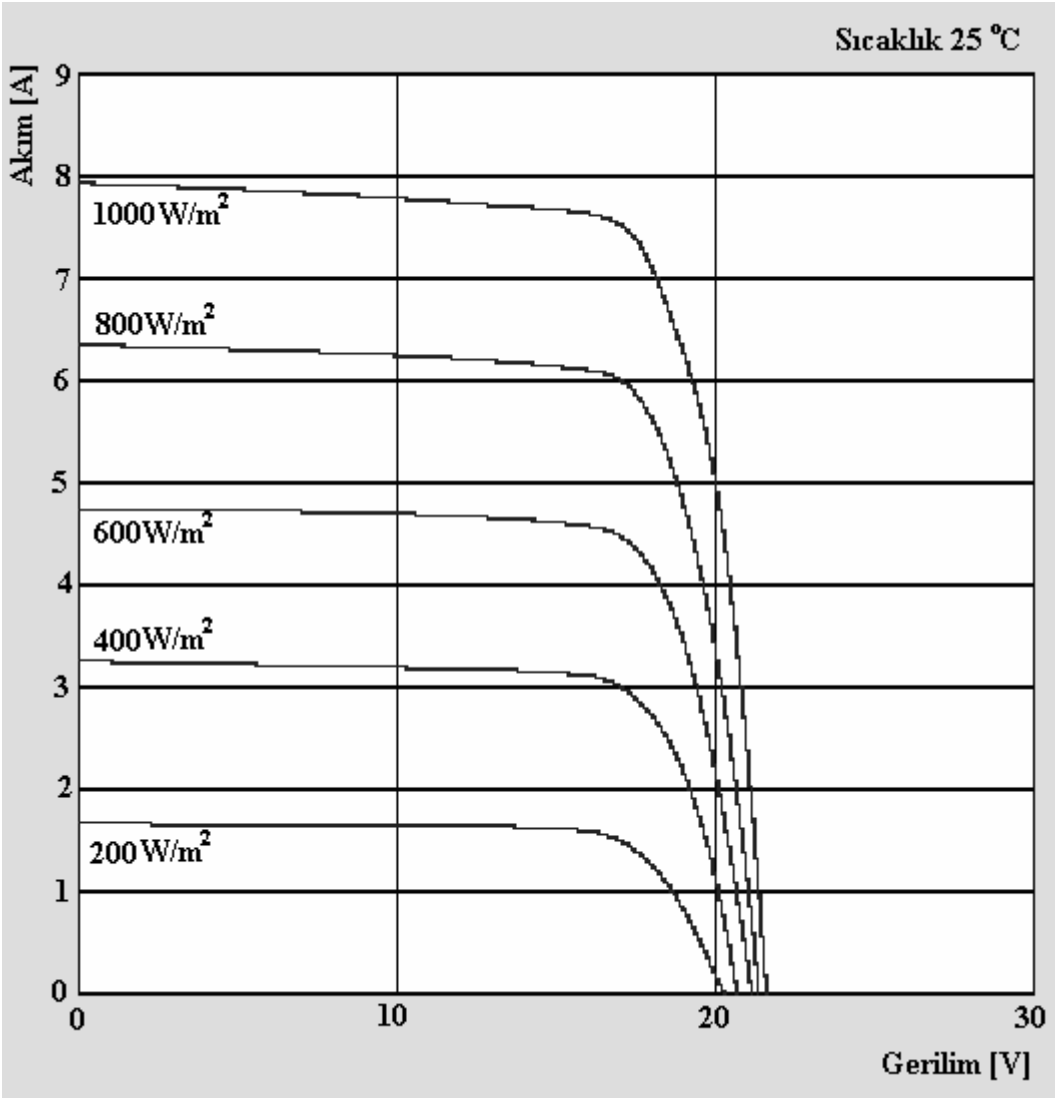
$$V_{oc} = \frac{akT_c}{q}\left(\ln\frac{KQ}{I_s} + \ln X\right) \tag{2.9}$$

denklemleri kullanılır.

Düşük ışıma seviyelerinde;

$$KQ - I_s\left(e^{qV_{oc} \big/ akT_c} - 1\right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = 0 \tag{2.10}$$

denklemi kullanılır. Şekil 2.5'deki akım gerilim eğrilerinde ışımanın bir güneş paneli üzerindeki etkisi farklı ışınımlar için görülmektedir.

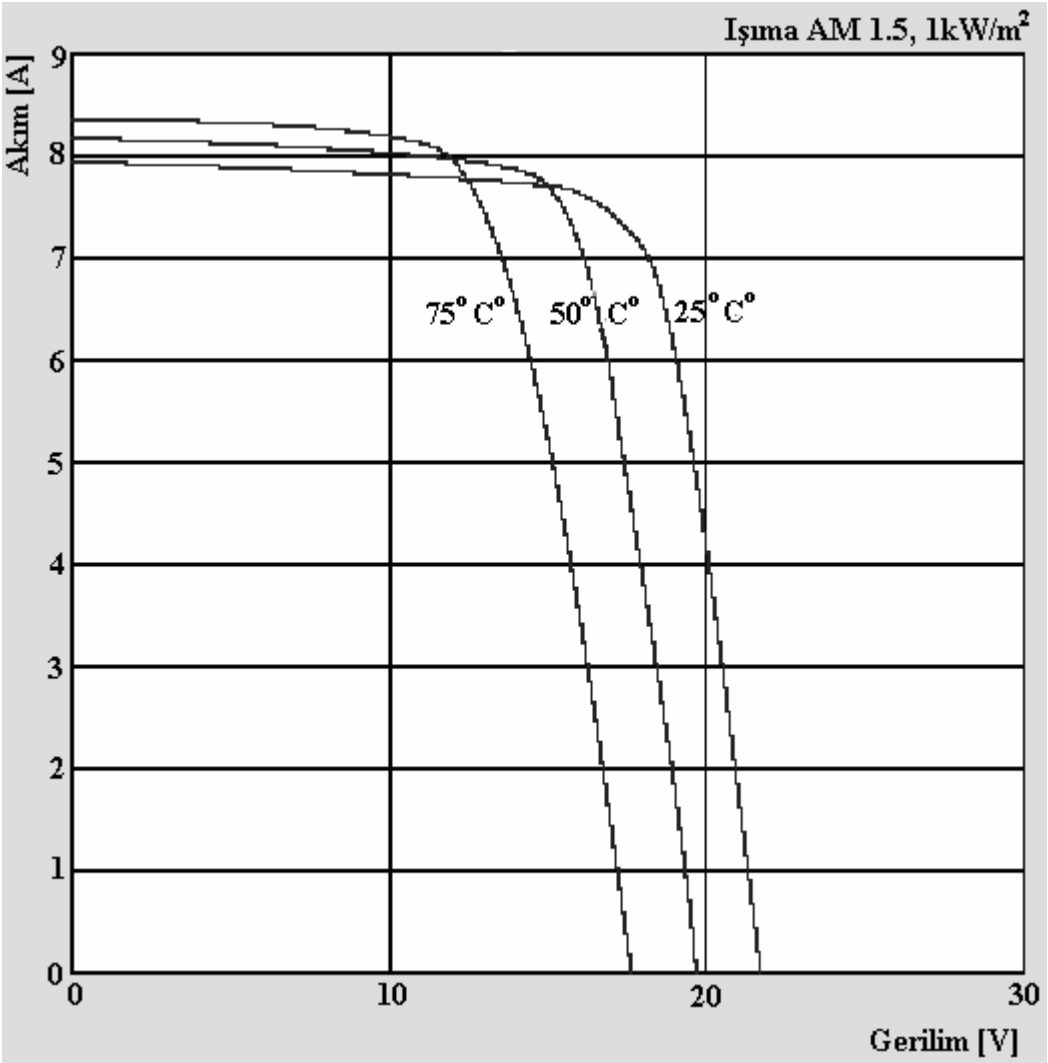


Şekil 2.5: Işımanın güneş panelindeki etkisi [KC125GHT-2 kataloğundan]

"Kyocera" paneli için verilen bu şekil incelendiğinde sıcaklık sabit durumdayken ışımanın ikiye katlanması sonucunda akımında yaklaşık ikiye katlandığı ve gerilim artışının ise %5 ın altında kaldığı görülmektedir.

Sıcaklık (T_c): Kısa devre akımı "I_{sc}" sıcaklıkla artar. Açık devre gerilimi "V_{oc}" ise güneş hücresi sıcaklığı ile doğrusal olarak azalır. Şekil 2.6 deki akım gerilim eğrilerinde sıcaklığın bir güneş paneli üzerindeki etkisi farklı sıcaklıklar için görülmektedir. Kyocera paneli için verilen bu şekil incelendiğinde; sıcaklık iki katına çıktığında akımdaki artışın %10 un altında kaldığı görülmektedir. Aynı şekilde sıcaklıktaki artışın gerilimde negatif etki yaptığı ve sıcaklıktaki iki kat artışın

gerilimde yaklaşık %10 azalmaya neden olduğu görülmektedir [“KC125GHT-2” için Kyocera kataloğundan].



Şekil 2.6: Sıcaklığın güneş panelindeki etkisi

Diğer güneş hücresi temelli panel yapıları da, bazı küçük farklılıklarla beraber, hemen hemen aynı özellikleri gösterirler.

2. 4. Güneş Hücresini Karakterize Eden Temel Parametreler

Özellikle pratik amaçlar için çoğu zaman bir güneş hücresinin akım gerilim karakteristiği birkaç parametre ile belirlenir. Bu parametreler genellikle kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}) ve maksimum güç noktası ($P_m = V_m I_m$)’dır [1].

2. 4. 1. Kısa devre akımı (I_{sc})

Tam güneşte güneş hücresinin çıkış terminali kısa devre edilerek ve buradan geçen akım ölçülerek kısa devre akımı elde edilir. Ayrıca (2.5) denkleminde "V" yerine sıfır konularak kısa devre akımı analitik olarak hesaplanabilir. Söz konusu ifade de "R_s" sıfır kabul edilirse kısa devre akımının ışıma tarafından üretilen "I_p" akımına eşit olacağı aşikardır. "R_s" sıfırdan farklı olduğu durumda kısa devre akımı ışıma tarafından üretilen I_p akımından küçük olacaktır.

2. 4. 2. Açık devre gerilimi (V_{oc})

Tam güneşte güneş hücresinin çıkış terminali açık devre edilip terminal uçlarındaki gerilim ölçülerek açık devre gerilimi (V_{oc}) elde edilir. Ayrıca (2.5) denkleminde "I" yerine sıfır konularak açık devre gerilimi hesaplanabilir. Bu hesaplama; "I_{srec}" ile "R_s"'nin sıfır ve "R_{sh}"'ın sonsuz varsayımı ile nümerik olarak yapılabilir. Bu koşullarda açık devre gerilimi "V_{oc}";

$$V_{oc} = \frac{kT_c}{q} l_n \left(\frac{I_p}{I_s} + 1 \right) \tag{2.11}$$

İfadesi ile belirlenir. Burada açık devre geriliminin I_p/I_s oranı tarafından belirlendiği görülmektedir.

2. 4. 3. Maksimum güç noktası (P_m)

Bir güneş hücresinin I-V karakteristiğinin tipik bir örneği şekil 2.7'de verilmiştir Basit olması açısından (2.1) ifadesinde verilen ideal güneş hücresi ele alınırsa,

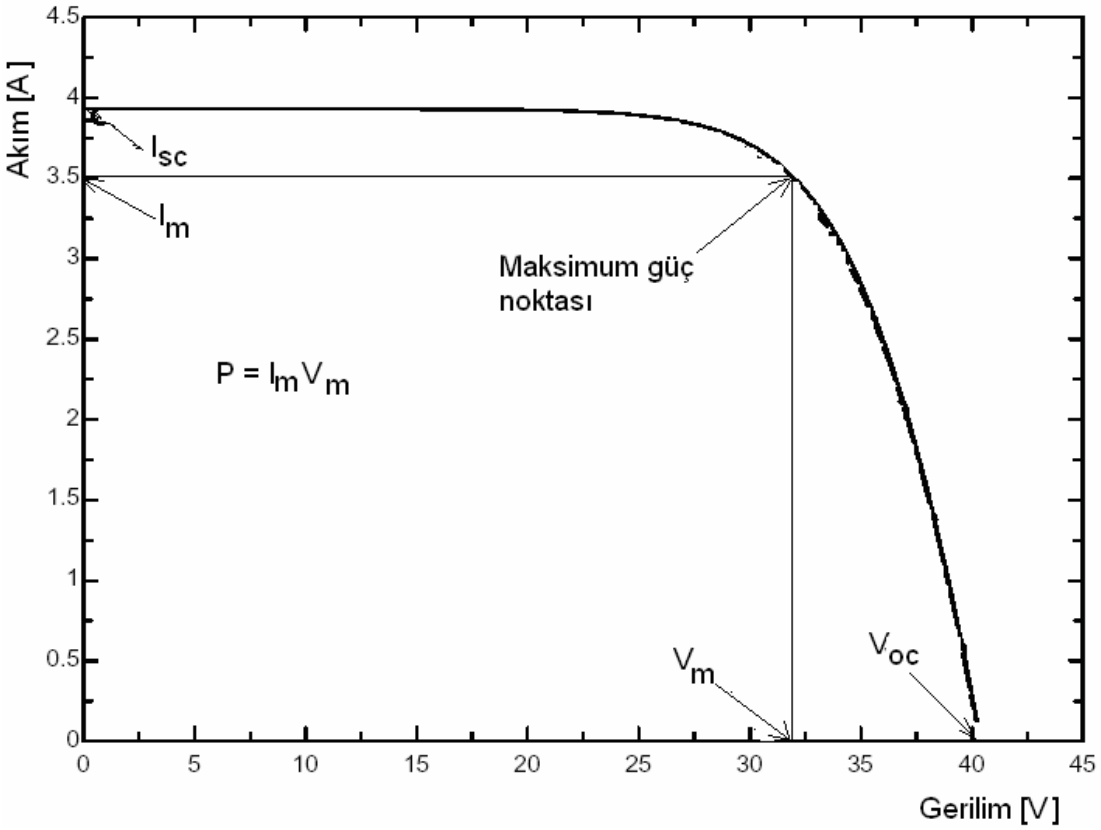
$$P = IV = \left[I_p - I_s \left(e^{qV/kT_c} - 1 \right) \right] V \tag{2.12}$$

güç ifadesi bulunur. Bu ifadenin "V" ye göre türevi alınır ve sıfıra eşitlenirse, maksimum güç noktasındaki maksimum gerilim (V_m) ifadesi bulunur. Buradan

$$I_p - I_s\left(e^{qV_m/kT_c} - 1\right) + V_m\left[-I_s\left(\frac{q}{kT_c}e^{qV_m/kT_c}\right)\right] = 0 \tag{2.13}$$

$$e^{qV_m/kT_c}\left(1 + \frac{qV_m}{kT_c}\right) = 1 + \frac{I_p}{I_s} \tag{2.14}$$

denklemleri elde edilir.



Şekil.2.7: Bir güneş hücresinin akım gerilim karakteristik eğrisi

Eğer kısa devre akımı (I_{sc}), ters yöndeki doyma akımı (I_s) ve mutlak sıcaklık (T_c) biliniyorsa, maksimum güç noktası gerilimi (V_m) (2.14) denkleminden hesaplanabilir.

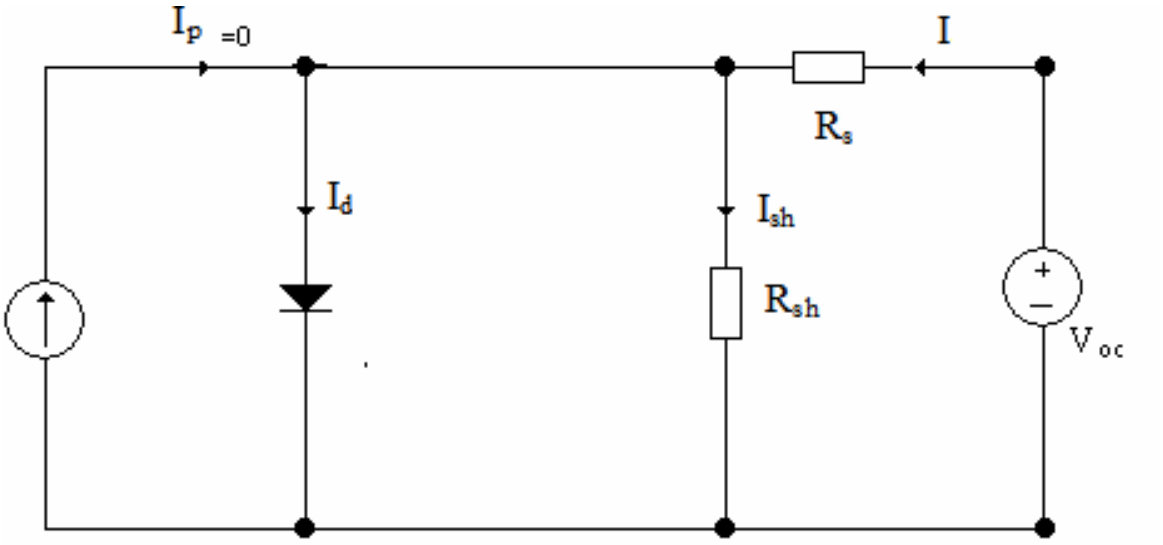
Maksimum güç noktası akımı (I_m) ise, yukarıda hesaplanan "V_m" değeri, (2.1) denkleminde yerine konularak;

$$I_m = I_{sc} - I_s\left(e^{qV_m/kT_c} - 1\right) \tag{2.15}$$

$$= \frac{\frac{qV_m}{kT_c}}{1+\frac{qV_m}{kT_c}}\left(I_{sc} + I_s\right) \tag{2.16}$$

denklemleri ile elde edilir.

Ayrıca tam karanlıkta açık devre gerilimi (V_{oc}) güneş hücresi terminaline uygulanırsa, foto akımı sıfır ve birçok koşulda $I_d >> I_{sh}$ olduğundan hücre içine akan akım diyot akımı kabul edilebilir. Bu durumun eşdeğer devresi şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Tam karanlıkta çıkışa V_{oc} uygulandığında eşdeğer devre

"R_s" direnci üzerinde düşen küçük gerilimin ihmali ile;

$$I = I_s\left(e^{qV_{oc}/akT_c} - 1\right) \tag{2.17}$$

denklemi elde edilir. Bu denklemden ters doyma akımı (I_s);

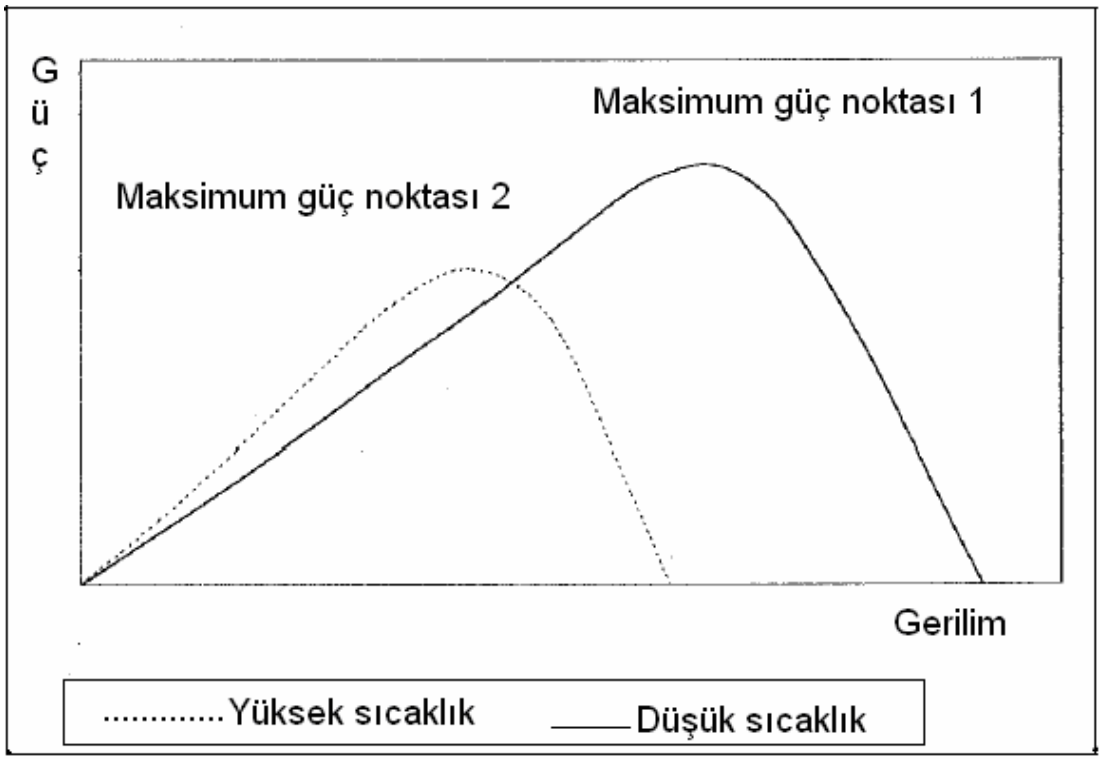
$$I_s = \frac{I}{e^{qV_{oc}/akT_c} - 1} \tag{2.18}$$

İfadesi ile hesaplanabilir. Ayrıca yukarıdaki açık devre gerilimi (V_{oc}) kullanılarak tam güneşteki foto akımı (I_p);

$$I_p = I_s\left(e^{qV_{oc}/akT_c} - 1\right) \tag{2.19}$$

denklemi ile hesaplanabilir.

Bir güneş hücresinin güç gerilim karakteristik eğrisi şekil 2.9'deki gibidir.



Şekil.2.9: Bir güneş hücresinin güç gerilim karakteristik eğrisi

Maksimum güç noktası gerilimi (V_m), bu eğrinin tepe noktasına isabet eder. Güneş panelleri genellikle bir DA/DA veya DA/AA dönüştürücü ile birlikte çalışırlar. Bu devrenin en önemli ve vazgeçilmez elemanlarından biri de "maksimum güç noktası izleme denetleyicisi"dir Bu denetleyicinin en önemli işlevi; tüm ışık şartlarında

maksimum güç noktasına yakın bir çalışma noktasındaki akım ve gerilimde güç çekmektir.

Güneş hücresi kalitesinin yaklaşık bir hesabı; verilen bir ışımada maksimum gücün $V_{oc}I_{sc}$ çarpımına oranı ile yapılır ve bu oran dolgu faktörü (FF) olarak adlandırılır.

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \tag{2.20}$$

Kaliteli hücreler için bu faktör %70 ile % 80 arasındadır. Işımayla değişmeyecektir.

Güneş hücresinin sistem verimi (η) ise;

$$\eta = \frac{P_{çıt,elk}}{P_{gün(\theta)}} 100 \tag{2.21}$$

denklemi ile hesaplanır. Kaliteli hücrelerde verim %10 ile % 25 arasındadır. Bir hücrede elde edilebilecek maksimum verim (η_m) ise;

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \tag{2.22}$$

İfadesi ile tanımlanır. Burada P_{in}; güneş hücresine gelen toplam gücü ifade eder.

Bu bölümdeki çalışmanın sonunda p-n eklemi olarak bir güneş hücresinin karakteristiği ve modellenmesinin; fiziksel yapıya, bazı dış parametrelere ve çalışma koşullarına bağlı olduğu görülmüştür.

3. GÜNEŞ ENERJİSİ ÜRETİM SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLERİ

İkinci bölümde yapılan inceleme sonucunda; bir güneş hücresinin akım gerilim karakteristiğinin en basitleştirilmiş ifadesinin [denklem (2.1)], ideal bir p-n eklemi ifadesi (birleşme akımı bileşeni ihmal) ile ve gerçek ifadesinin [denklem (2.4)] ise iki ideal p-n eklemi ifadesi ile tanımlanabileceği görülmüştür. Denklem (2.1) temel alınarak geliştirilen modele "tek diyot modeli" ve denklem (2.4) temel alınarak geliştirilen eşdeğer modele "çift diyot modeli" denir. Birçok çalışma koşulunda gerçek karakteristiğe yakın olması ve model analizlerinde kolaylık sağlaması açısından bugüne kadar yapılan modellemeler çoğunlukla "tek diyot modeli" temel alınarak yapılmıştır [1-12].

Ayrıca akım gerilim karakteristiğini belirleyen hem iç parametrelerin (R_s, R_{sh}, I_s, a ve I_p) hem de dış parametrelerin (ışıma, Q ve sıcaklık, T_c) etkin olduğu ikinci bölümde yapılan çalışmada görülmüştür. İç parametrelerin genelde dış parametrelere bağlı oldukları bilinmesine rağmen yapılan modellemelerde çoğunlukla ışık akımının (I_p) ışımaya bağlı değişimi ile p-n ekleminin sıcaklığa bağlı değişimi dikkate alınmıştır.

Yapılan modellemeleri; bazı ihmaller ve basitleştirmeler yapılarak elde edilen ve analitik çözüm kullanan modeller, nümerik çözüme dayalı (çoğunlukla) modeller ve elektriksel eşdeğer devrelerle tanımlanıp simülasyon programları ile analiz edilen modeller olarak sınıflandırabilir [3].

Modelleri kullandıkları parametre sayılarına bakarak değerlendirirsek; sadece üç parametre (V_{oc}, I_{sc} ve P_m) kullanan basitleştirilmiş modeller, dört parametre ($R_{sh} = \infty$) kullanan modeller, beş parametre kullanan modeller (hemen hemen tüm çalışma koşullarında kullanılabilir) ve daha fazla parametre kullanan karmaşık modeller olarak sınıflandırabilir [1-12].

Bu bölümde basitten karmaşığa doğru bugüne kadar yapılan modelleme çalışmalarından örnekler seçilip inceleyecektir. Kuşkusuz yapılan tüm modelleri incelemek gibi bir hedef yoktur.

3. 1. Üç Parametre (V_{oc}, I_{sc} ve P_m) Temelli Model

Bu modelde; sadece ölçülebilir üç parametre kullanılarak, güneş hücresinin akım gerilim karakteristik eğrisini karşılayan basitleştirilmiş bir model sunulmuştur. Bu model belirli bir sıcaklık ve ışıma için önerilmiş ve elde edilen karakteristik eğrilerin gerçek eğrilere oldukça yakın (fark %3) olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ilave üç parametre $(\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c}, \frac{\partial V_{oc}}{\partial Q}, ve \frac{\partial I_{sc}}{\partial T_c})$ ile birlikte kullanılarak ışıma ve sıcaklık değişimlerini de hesaba katan bir modele genişletilebilir bir modeldir. Bu durumda eğriler arasındaki fark %6'dır [5].

Bir güneş hücresinin akım-gerilim karakteristiğini tanımlayan klasik ifadelerden biri denklem (3.1) ile verilir.

$$I = I_p - I_s(e^{q(V+IR_s)/akT_c} - 1) \tag{3.1}$$

Denklem (3.1)'de aşağıdaki basitleştirmeler yapılır;

$e^{q/akTc} >> 1$; $I_p \cong I_{sc}$

ve "q/akT_c" ifadesi "γ" olarak tanımlanırsa, denklem (3.2) elde edilir.

$$I = I_{sc}\left[1 - \frac{I_s}{I_{sc}} e^{\gamma(V+IR_s)}\right] \tag{3.2}$$

Seri direnç (R_s) ve "γ" bilinmeyenini bulmak için iki koşuldan faydalanılır.

1. I = 0 iken $V = V_{oc}$'dir.
2. $P_m = I_m V_m$

Birinci koşul denklem (3.2)'de kullanılarak, denklem (3.3) elde edilir.

$$\gamma = \frac{1}{V_{oc}} \ln \frac{I_{sc}}{I_s} \tag{3.3}$$

I_s/I_{sc} oranı; silikon hücrelerde 25 ^oC' de 10^{-9} kabul edilebilir. Bu durumda akım ve gerilim ifadeleri denklem (3.4) ve denklem (3.5) ile verilebilir.

$$I = I_{sc}\left[1 - 10^{-9} e^{20.7(V+IR_s)/V_{oc}}\right] \tag{3.4}$$

$$V = V_{oc}\left[1 + \frac{1}{20.7}\ln\left(\frac{I_{sc} - I}{I_{sc}}\right)\right] - R_s I \tag{3.5}$$

Ayrıca ikinci koşulu kullanarak denklem (3.6) ve denklem (3.7) yazılabilir.

$$V_m = \frac{P_m}{I_m} \tag{3.6}$$

$$\left.\frac{\partial V}{\partial I}\right|_{I=I_m} = \left.\frac{\partial}{\partial I}\left(\frac{P_m}{I}\right)\right|_{I=I_m} \cong -\frac{P_m}{I_m^2} \tag{3.7}$$

Maksimum güç noktasındaki akım bilinmemektedir. (3.5) ve (3.6) denklemlerinden denklem (3.8) ve denklem (3.9) elde edilir.

$$\frac{P_m}{I_m} = V_{oc}\left[1 + \frac{1}{20.7}\ln\left(\frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}}\right)\right] - R_s I_m \tag{3.8}$$

$$\frac{P_m}{I_m^2} = \frac{V_{oc}}{20.7}\left(\frac{1}{I_{sc} - I_m}\right) + R_s \tag{3.9}$$

Denklem (3.8) ile denklem (3.9) birleştirilerek denklem (3.10) elde edilir.

$$I_m\left[1 + \frac{1}{20.7}\left(\frac{I_m}{I_{sc} - I_m} + \ln\frac{I_{sc} - I_m}{I_{sc}}\right)\right] - \frac{2P_m}{V_{oc}} = 0 \tag{3.10}$$

Denklem (3.10) kullanılarak maksimum güç noktasındaki akım nümerik analizle hesaplanır. Burada hesaplanan değer denklem (3.9)'da kullanılarak R_s değeri hesaplanır. R_s'in bu değeri (3.4) ve (3.5) denklemlerinde kullanılarak güneş hücresinin akım-gerilim (I-V) karakteristik eğrisi elde edilir.

3. 2. Dört Parametre (I_{sc}, V_{oc}, I_m ve V_m) Temelli Model

Güneş hücresi modülü üreticileri; kataloglarında (data sheets) standart test koşullarındaki (STK: Q = 1000 W/m^2, T_c = 25 ^{o}C ve AM = 1.5) ya akım gerilim karakteristik eğrilerini ya da birkaç çalışma koşulunda birkaç parametreyi gösteren bir tabloyu sağlarlar. Karakteristik eğrinin oluşturulmasında kullanılan bu parametreler için bir standart olmasa da genelde dört parametre (I_{sc}, V_{oc}, I_m ve V_m) tercih edilir. Bu dört parametre kullanılarak bir güneş modülünün (seri ve/veya paralel bağlı birden fazla güneş hücresi yapısı) standart test koşullarındaki akım gerilim karakteristiğini belirleyen eğri çizilebilir [6]. Akım gerilim karakteristiğini bu dört parametre ile modelleyen bir denklem seti literatürde verilmiştir [7,8]. Bu denklemler aşağıda verilmiştir.

$$I = I_{sc}\left[1 - C_1\left(e^{V/C_2 V_{oc}}\right) - 1\right] \tag{3.11}$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)e^{-V_m/C_2 V_{oc}} \tag{3.12}$$

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1\right)\left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)\right]^{-1} \tag{3.13}$$

Burada C_1 ve C_2 sabit katsayıları ifade ederler.

Bu denklemler tek bir modül için veya "M" adet paralel ve "N" adet seri modülden oluşan bir dizi için kullanılabilecek bir forma genişletilirse, aşağıdaki denklemler yazılabilir.

$$I_{dizi} = I_{sc,mdl} M\left[1 - C_1\left(e^{V_{dizi}/NC_2 V_{oc,mdl}} - 1\right)\right] \tag{3.14}$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{m,mdl}}{V_{oc,mdl}}\right)e^{-V_{m,mdl}/C_2 V_{oc,mdl}} \tag{3.15}$$

$$C_2 = \left(\frac{V_{m,mdl}}{V_{oc,mdl}}\right)\left[\ln\left(1-\frac{I_{m,mdl}}{I_{sc,mdl}}\right)\right]^{-1} \tag{3.16}$$

Standart test koşullarındaki bu dört parametre biliniyorsa, modül veya modüllerden oluşan dizi için akım-gerilim (I-V) karakteristik eğrileri (3.11) – (3.13) denklemlerinin çözümünden elde edilir (tekli kristal, çoklu kristal ve amorf tipi için). Modelin daha verimli çalışması için, kullanılan dört parametrenin sıcaklığa (T_c) ve ışımaya (Q) bağlı değişimleri de hesaba katılmalıdır.

3. 2. 1. Sıcaklık (T_c) değişiminin dört parametreye etkisi

Standart test koşullarındaki sıcaklıkta (T_r) dört parametre biliniyor ise, (3.17) – (3.20) denklemleri kullanılarak herhangi bir sıcaklık (T_c) için yeniden hesaplanabilir [9].

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}(T_r) - \beta_{V_{oc}} V_{oc}^{STK}(T_r - T_c) \tag{3.17}$$

$$I_{sc}(T_c) = I_{sc}(T_r)\left[1 - \alpha_{I_{sc}}(T_r - T_c)\right] \tag{3.18}$$

$$I_m(T_c) = I_m(T_r)\left[1 - \alpha_{I_m}(T_r - T_c)\right] \tag{3.19}$$

$$V_m(T_c) = V_m(T_r) - \beta_{V_m} V_m^{STK}(T_r - T_c) \tag{3.20}$$

Burada:

$\beta_{V_{oc}}$;açık devre gerilimi sıcaklık çarpanıdır (1/^{o}C).

$\alpha_{I_{sc}}$;kısa devre akımı sıcaklık çarpanıdır (1^{o}C).

$\alpha_{I_{mp}}$;maksimum güç noktası akımı sıcaklık çarpanıdır (1/^{o}C).

$\beta_{V_{mp}}$;maksimum güç noktası gerilimi sıcaklık çarpanıdır (1/^{o}C).

Tablo 3. 1'de değişik üreticilerin PV modellerine ait tipik değerler verilmiştir [9].

Tablo 3.1: On ayrı PV modeline ait 4 parametre değerlerini etkileyen sıcaklık katsayıları.

PV Modeli	α_{Isc} (1/^{o}C)	α_{Im} (1/^{o}C)	β_{Voc} (1/^{o}C)	β_{Voc} (1/^{o}C)
ASE300, mc-Si	0.00091	0.00037	-0.0036	-0.0047
AP8225, Si-Film	0.00084	0.00026	-0.0046	-0.0057
M55, c-Si	0.00032	-0.00031	-0.0041	-0.0053
SP75, c-Si	0.00022	-0.00057	-0.0039	-0.0049
MSX64, mc-Si	0.00063	0.00013	-0.0042	-0.0052
SQ-90, c-Si	0.00016	-0.00052	-0.0038	-0.0048
MST56, a-Si	0.00099	0.0023	-0.0041	-0.0039
UPM88, a-Si	0.00082	0.0018	-0.0038	-0.0037
US32, a-Si	0.00076	0.0010	-0.0043	-0.0040
SC150 CdTe	0.00019	-0.0012	-0.0037	-0.0044

3. 2. 2. Sıcaklık (T_c) ve ışıma (Q) değişiminin dört parametreye etkisi

Modellemenin çok daha iyi sonuçlar vermesi için sıcaklık ve ışımadaki değişimlerin birlikte hesaba katılması gerekir. Herhangi bir referans sıcaklıktaki (T_r; genelde 25^{o}C) ve referans ışımadaki (Q; genelde 1000 W/m^2) dört parametre biliniyor ise; (3.21) – (3.24) denklemleri kullanılarak herhangi bir sıcaklık (T_c) ve ışımadaki (Q) değerleri yeniden hesaplanabilir [6].

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}(T_r) - \beta_{V_{oc}} V_{oc}^{STK}(T_r - T_c) \tag{3.21}$$

$$V_m(T_c) = V_m(T_r) - \beta_{V_m} V_m^{STK}(T_r - T_c) \tag{3.22}$$

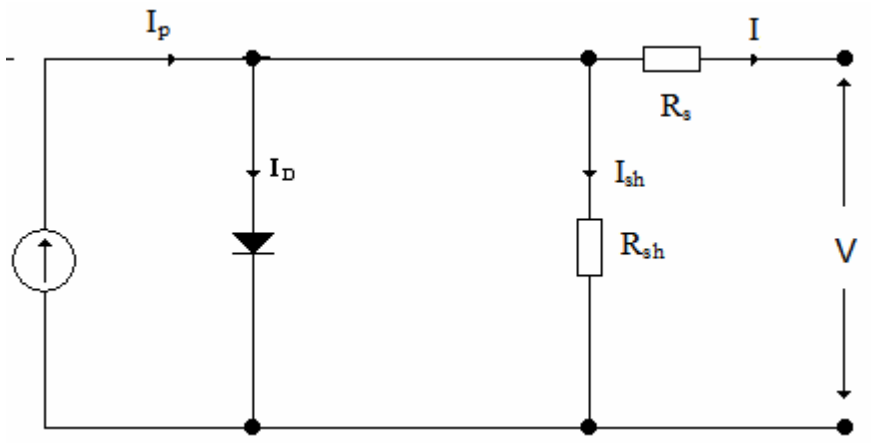
$$I_{sc}(T_c, Q) = I_{sc}(T_r, Q_r)\left(\frac{Q}{Q_r}\right)\left[1 - \alpha_{I_{sc}}(T_r - T_c)\right] \tag{3.23}$$

$$I_m(T_c, Q) = I_m(T_r, Q_r)\left(\frac{Q}{Q_r}\right)\left[1 - \alpha_{I_m}(T_r - T_c)\right] \tag{3.24}$$

Denklem (3.21) ve denklem (3.22)'in sırayla denklem (3.17) ve (3.20) ile aynı olduklarına dikkat edilmelidir. Bunun nedeni; açık devre geriliminin (V_{oc}) ve maksimum güç noktası geriliminin (V_m) ışımayla çok değişmediği varsayımıdır.

3. 3. Beş veya Daha Fazla Parametre Temelli Modeller

Güneş hücresinin davranışları Şekil 3.1'de verilen bir eşdeğer devre modeli ile modellenebilir [10]. Bu devre seri bir direnç ve diyotla birlikte paralel bir direnç içermektedir. "V" yükteki gerilimi ifade etmektedir. Bu devre bağımsız bir hücre için, birçok hücreden oluşan bir modül için veya birçok modülden oluşan bir dizi için kullanılabilir [11].



Şekil 3.1**:** 5-Parametre modeli eşdeğer devresi

Eşdeğer devreye "Kirchoff Akım Yasası" uygulanarak yükte akan "I" akımı için;

$$I = I_p - I_D - I_{sh} \tag{3.25}$$

denklemi elde edilir.

Diyot akımı ve paralel direnç akımı ifadeleri yerine konulursa;

$$I = I_p - I_s\left(e^{(V+IR_s)/q} - 1\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{3.26}$$

denklemi elde edilir. Gücü hesaplamak için, (3.27) denklemi kullanılır.

$$P = IV \tag{3.27}$$

Modele adını veren beş parametre; a, I_p, I_s, R_s, ve R_{sh}'dır.

Akım-gerilim (I-V) eğrisinin şekli çalışma koşullarının (hücre sıcaklığı,T_c, etkin ışıma, Q ve ışık açısı, Θ) değişimine bağlı olarak değişir. Bu nedenle eğriyi belirleyen parametrelerin değerinin de değişeceği doğaldır. Literatürde sağlanan data ile oluşturulan I-V eğrileri ile 5- parametre modeli kullanılarak elde edilen I-V eğrileri dört hücre tipi (tek kristal, çok kristal, silikon ince film, 3-eklem amorfu) için karşılaştırılmış (yaz ve kış gibi iki farklı çalışma noktasında) ve modelin çok verimli olduğu literatürde verilmiştir [11]. Spesifik bir sıcaklık ve ışımadaki beş parametre biliniyorsa, I-V eğrisini belirlemek için 5-parametre modeli ideal bir modeldir.

3. 3. 1. Standart test koşullarında beş referans parametrenin hesaplanması

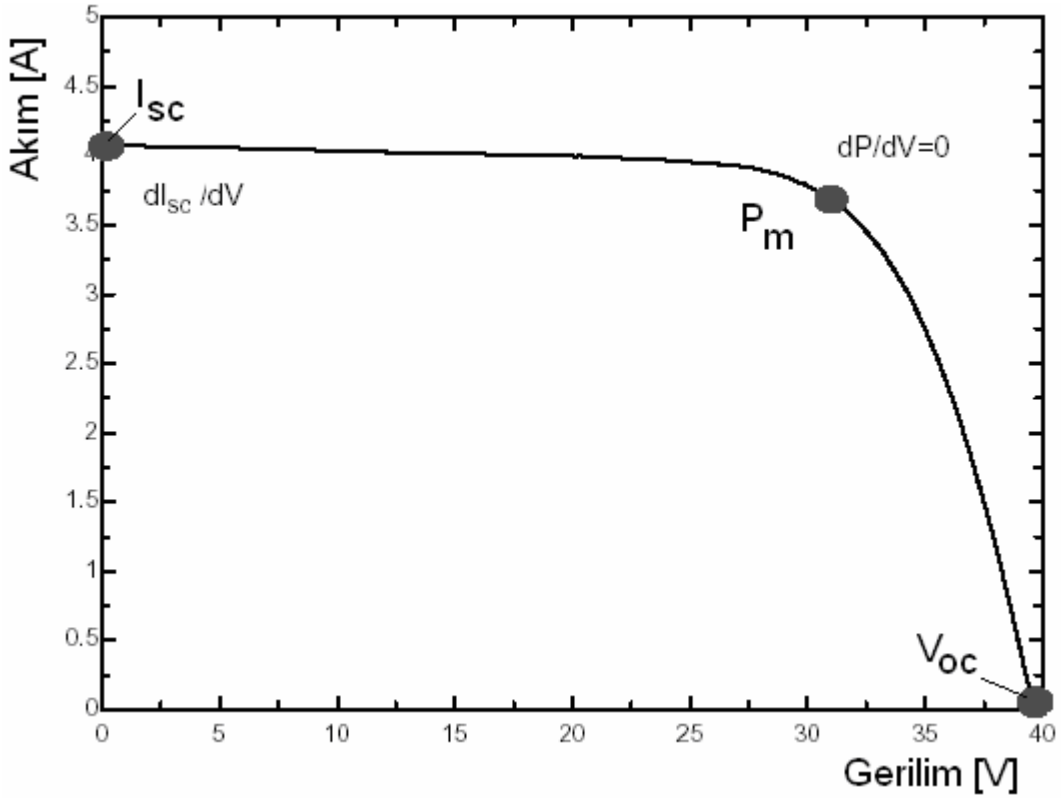
Beş referans parametrenin hesaplanabilmesi için referans çalışma koşullarında (genellikle STK, burada:T_c = 25 ^oC ve Q = 1000 W/m^2) beş parça bilgiye ihtiyaç vardır. Bu bilgiler; kısa devre akımı (I_{scr}),açık devre gerilimi (V_{ocr}), maksimum güç noktasındaki akım (I_{mr}) ve gerilim (V_{mr}), I-V eğrisinin kısa devre akımı noktasındaki eğimdir. Alt indisteki "$_r$" referans çalışma koşullarını tanımlar. Bu bilgi genelde üreticiler tarafından sağlanır. Akım gerilim eğrisinin kısa devre noktasındaki eğim değerinin doğrudan temin edilememesine karşı, eğer üreticiler referans çalışma koşullarında bir I-V eğrisi sağlamışlarsa, hesaplanabilir. Eğer bu sağlanamazsa, ya 4-parametre modeli kullanılır (amorf hücre tipi için önerilmez) veya üreticiler tarafından sağlanan noktalar (V_{oc}, V_m, I_m, I_{sc}) çizilerek eğim yaklaşık elde edilir ve kısa devre noktası ile maksimum güç noktası arasındaki eğim hesaplanır. Paralel direncin tahmin edilen I-V eğrisi şekli üzerinde çok büyük bir etkisi olmadığından yaklaşık alınabilir. Maksimum güç noktası eğimi (dp/dv_m)' nin sıfıra eşit olmasının bilinmesi 5 parametrenin hesaplanmasında beşinci bilgi parçası olur. Referans parametrelerini bulmak için her bir bilgi parçasının anlamını bilmek önemlidir:
Kısa devre akımında: I = I_{scr}, V = 0
Açık devre geriliminde: I = 0, V = V_{ocr}

Maksimum güç noktasında: $I = I_{mr}$, $V = V_{mr}$

Maksimum güç noktasında: $dp/dv_m = 0$

Kısa devre akımında: $dI_{sc}/dv = -1/R_{shr}$

Şekil 3.2 Söz konusu noktaların yerlerini gösterir.



Şekil 3.2: Referans parametrelerin hesaplanmasında kullanılan noktalar

Bu beş parça bilgi ile (3.26) denklemi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$I = I_{pr} - I_{sr}\left(e^{(V+IR_{sr})/a_r} - 1\right) - \frac{V + IR_{sr}}{R_{shr}} \tag{3.28}$$

Bilinen değerler (3.29) - (3.33) denklemlerinde yerine konursa;

$$I_{scr} = I_{pr} - I_{sr}\left(e^{I_{scr}R_{sr}/a_r} - 1\right) - \frac{I_{scr}R_{sr}}{R_{shr}} \tag{3.29}$$

$$0 = I_{pr} - I_{sr}\left(e^{V_{ocr}/a_r} - 1\right) - \frac{V_{ocr}}{R_{shr}} \tag{3.30}$$

$$I_{mr} = I_{pr} - I_{sr}\left(e^{(V_{mr}+I_{mr}R_{sr})/a_r} - 1\right) - \frac{V_{mr}+I_{mr}R_{sr}}{R_{shr}} \tag{3.31}$$

$$\left[\frac{d(IV)}{dV}\right]_m = 0 \tag{3.32}$$

$$\left(\frac{dI}{dV}\right)_{sc} = -\frac{1}{R_{shr}} \tag{3.33}$$

denklemleri elde edilir.

(3.29) - (3.33) denklemlerin çözümünden beş referans parametre (a_r, I_{sr}, I_{pr}, R_{sr}, R_{shr}) bulunabilir. Gerekli olan bilgilere ait tipik değerler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2: Beş ayrı üretici firmanın ürettiği panellere ait 5 parametrenin hesaplanmasında gereken bilgiler [11],[KYOCERA kataloğu].

PV Modeli	Astropower Apex Bin G/APX-90	Simens Bin 1/SP75	Solarex MegaCell/MSX-64 (1997)	Uni-Solar US-64 Module	KYOCERA KC120-1
REFERANS	KOŞULLARI	ALTINDA	ÖLÇÜLMÜŞ	DEĞERLER	(STK)
I_{sc} (A)	5.11	4.37	4.25	4.44	7.45
V_{oc} (V)	29.61	42.93	41.50	23.16	21.5
I_m (A)	4.49	3.96	3.82	3.61	7.10
V_m (V)	23.17	33.68	32.94	16.04	16.9
SICAKLIK	KATSAYI	DEĞERLERİ			
$\alpha_{I_{sc}}$ (A/°C)	0.00468	0.00175	0.00238	0.00561	
α_{I_m} (A/°C)	0.00160	-0.00154	0.00018	0.00735	
$\beta_{V_{oc}}$ (V/°C)	-0.12995	-0.15237	-0.15280	-0.09310	
β_{V_m} (V/°C)	-0.13039	-0.15358	-0.15912	-0.002976	

3. 3. 2. Beş parametre modeli

Önceden belirtildiği gibi beş parametre modeli denklem (3.34) ve üretilen güç hesabı ise denklem (3.35) ile tanımlanır. Denklem (3.34) deki beş parametrenin (sırasıyla; a, I_s, I_p, R_s, ve R_{sh}) hesaplanmasında ise, (3.36) - (3.42) denklemleri kullanılır [11].

$$I = I_p - I_s\left(e^{(V+IR_s)/a} - 1\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{3.34}$$

$$P = IV \tag{3.35}$$

$$\frac{a}{a_r} = \frac{T_c}{T_r} \tag{3.36}$$

$$\frac{I_s}{I_{sr}} = \left[\frac{T_c}{T_r}\right]^3 e^{\left[\frac{\varepsilon N_s}{a_r}\left(1-\frac{T_r}{T_c}\right)\right]} \tag{3.37}$$

$$I_p = \frac{QM_{am}}{Q_r M_{amr}}\left[I_{pr} + \alpha_{I_{sc}}\left(T_c - T_r\right)\right] \tag{3.38}$$

$$\frac{Q}{Q_r} = \frac{\frac{a_r}{I_{sr}} e^{-\left(\frac{V_{mr}+I_{mr}R_{sr}}{a_r}\right)} + R_{sr}}{\frac{a}{I_s} e^{-\left(\frac{V_m+I_m R_s}{a}\right)} + R_s} \tag{3.39}$$

$$I_m = I_{mr}\frac{Q}{Q_r} \tag{3.40}$$

$$V_m = V_{mr} + \beta_{V_{oc}}\left(T_c - T_r\right) \tag{3.41}$$

$$R_{sh} = R_{shr} \tag{3.42}$$

Gerilimi (V) değiştirip denklemleri çözerek tanımlanan akım (I) ve güç (P) değerleri hesaplanır. Buradan da maksimum güç (P_m) bulunur. Bu denklemlerde kullanılan $\beta_{V_{oc}}$; açık devre gerilimi sıcaklık çarpanı [V/^{o}C] ve $\alpha_{I_{sc}}$; kısa devre akımı sıcaklık çarpanıdır [A/^{o}C].

3. 3. 3. A. Hadj Arab ve diğerlerinin denklemi

5-parametre karakteristik denklemi üzerine kurulu güneş hücrelerinin performanslarını belirlemek için bir model literatürde verilmiştir [12].

$$I = I_p - I_s\left(e^{(V+IR_s)/aV_t} - 1\right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}}\right) \tag{3.43}$$

Burada I_p, I_s, a, R_s ve R_{sh}; I-V eğrisini elde edebilmek için denklem (3.43)'de yerine konması gereken beş parametredir.

Akım-gerilim (I-V) eğrisinin açık devre gerilimindeki eğimi olarak bilinen $-R_{sr}$ ise, (3.44) denklemi ile tanımlanır.

$$\left(\frac{dV}{dI}\right)_{V=V_{oc}} = -R_{sr} \tag{3.44}$$

Aynı eğrinin kısa devre akımındaki eğimi olarak bilinen $-R_{shr}$; (3.45) denklemi ile tanımlanır.

$$\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{sc}} = -R_{shr} \tag{3.45}$$

$-R_{sr}$ ve $-R_{shr}$ değerleri üreticiler tarafından sağlanan referans eğrilerden doğrudan sağlanabilir.

(3.43) denklemindeki parametreler, (3.46)-(3.51) denklemleri kullanılarak hesaplanır. (3.46) denklemi diyot kalite faktörünü (a) verir.

$$a = \frac{V_m + I_m R_{sr} - V_{oc}}{V_t\left[\ln\left(I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh}} - I_m\right) - \ln\left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) + \left(\frac{I_m}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}\right)\right]} \tag{3.46}$$

"T_c", hücre sıcaklığını, "k", Boltzmann sabitini ve "q" bir elektronun yükünü ifade etmek üzere "V_t" ifadesi aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \tag{3.47}$$

Diyodun ters doyma akımı (3.48) denklemi ile tanımlanır.

$$I_s = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) e^{-V_{oc} / aV_t} \tag{3.48}$$

Seri direnç $R_{s,}$ (3.49) denkleminden elde edilir.

$$R_s = R_{sr} - \frac{aV_t}{I_s} e^{-V_{oc} / aV_t} \tag{3.49}$$

Işık akımı (I_p), (3.50) denklemi ile hesaplanır.

$$I_p = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_s \left(e^{I_{sc} R_s / aV_t} - 1 \right) \tag{3.50}$$

Paralel direncin (R_{sh}) önceden hesaplanan "R_{shr}" değerine eşit olduğu farz edilebilir.

$$R_{sh} = R_{shr} \tag{3.51}$$

A. Hadj Arab ve diğerleri modeli; spesifik bir çalışma koşulları setinde (T_{c1}, Q_1) (genellikle STK kullanılır) beş parametreyi (I_p, I_s, a, R_s ve R_{sh}) hesaplamada kullanılır. Bir kez bu parametreler biliniyorsa, (3.52)-(3.57) denklemleri kullanılarak (3.43) denkleminde elde edilen I-V eğrisi farklı noktalara (T_{c2},Q_2) uyarlanabilir. Kısa devre akımının yeni değeri (3.52) denkleminde elde edilir.

$$I_{sc2} = I_{sc1} \frac{Q_2}{Q_1} + \alpha_{I_{sc}} \left(T_{c2} - T_{c1} \right) \tag{3.52}$$

Burada; alt indisi "1" olan her bir parametre referans koşullarını (T_{c1}, Q_1) ve alt indisi "2" olan her bir parametre de yeni çalışma koşullarını (T_{c2},Q_2) belirtir. "$\alpha_{I_{sc}}$" sabiti, kısa devre akımındaki sıcaklık çarpanıdır [A/^{o}C].

Açık devre geriliminin yeni değeri (V_{oc}), (3.53) denkleminden elde edilir.

$$V_{oc2} = V_{oc1} + aV_t \ln\frac{Q_2}{Q_1} + \beta_{V_{oc}}\left(T_{c2} - T_{c1}\right) \tag{3.53}$$

Yeni çalışma koşullarındaki yeni akım ve gerilim değerleri, (3.54) ve (3.55) denklemlerinden elde edilebilir. $\beta_{V_{oc}}$;açık devre gerilimi sıcaklık çarpanıdır [V/^{o}C].

$$I_2 = I_1 + \Delta I_{sc} \tag{3.54}$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V_{oc} \tag{3.55}$$

Burada;

$$\Delta I_{sc} = I_{sc2} - I_{sc1} \tag{3.56}$$

ve

$$\Delta V_{oc} = V_{oc2} - V_{oc1} \tag{3.57}$$

denklemleri ile ifade edilir.

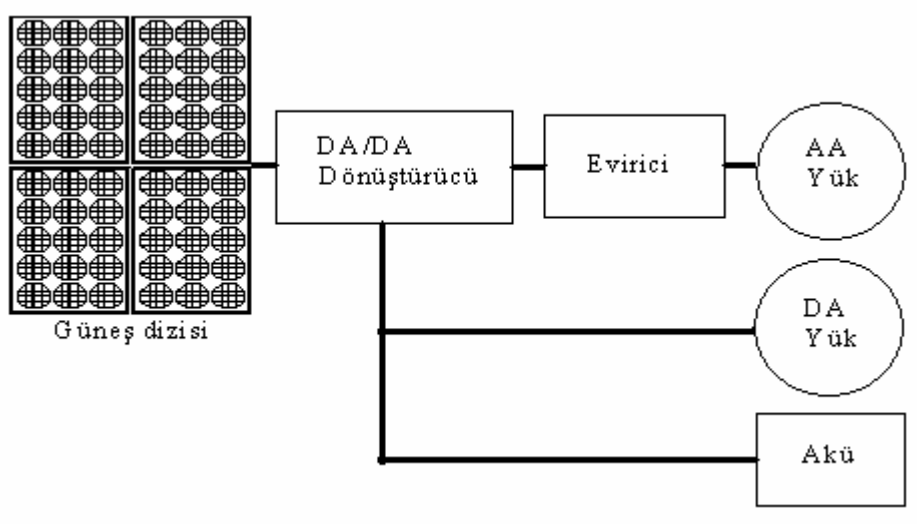
4. ENERJİ KAYNAĞI OLARAK GÜNEŞ ENERJİSİNİN KULLANIMI ve DENETİMİ

Önceki bölümlerde bir güneş hücresinin ışımaya maruz kalması durumunda, bünyesine aldığı enerjinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürdüğü ortaya çıkmıştı. Hücrenin uçlarında oluşan elektrik potansiyeli doğru gerilim olduğundan dolayı güneş hücreleri doğru akım enerji kaynakları gibi davranırlar. Esasında doğrudan enerji üretmezler, ışımadan aldıkları enerjinin bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürürler. Ürettikleri enerji miktarının maruz kaldıkları ışıma enerjisi miktarına oranı yüzdesinin (yüzde verim), yapılarında kullanılan malzemeden malzemeye (silikon, galyum-arsenit, kadmiyum-tellerüd, kadmiyum-sülfit gibi) biraz farklılık gösterse de, ortalama teorik değeri 25 ve ortalama pratik değeri 15'tir. İlk bakışta düşük bir değer olarak algılansa da, hem enerji kaynağının sürekli var ve diğer kaynaklarla kıyaslanmayacak kadar çok olması hem de güneş hücrelerinin seri ve/veya paralel bağlanabilmesi ile daha fazla güç sağlayan güneş panelleri, güneş panellerinin seri ve/veya paralel bağlanması ile de çok daha fazla güç sağlayan güneş dizileri sistemine izin vermesinden dolayı son yıllarda tüm dünyada üzerinde yoğun ilgi ile durulan bir enerji kaynağı olmuştur. Ayrıca tüketileceği yere en yakın yerde enerji üretebilme, çevre kirliliğine sıfır katkı ve gittikçe ucuzlayan bir üretim maliyeti gibi önemli özelliklerini de göz önüne alırsak, yakın gelecekte GH temelli sistemlerden elde edilen enerjinin dünyada kullanılan toplam enerjideki payının diğer enerji kaynaklarına oranla hızla artacağı, hatta birinci sıraya oturacağı gözükmektedir. Bu gelişmedeki en önemli katkıyı, GH temelli sistemlerin üretim maliyetlerinin giderek azalması ve bu sistemlerde maksimum faydayı sağlamaya dönük-elektrik elektronik denetim sistemlerindeki hızlı ve önemli gelişmeler sağlamaktadır.

GH temelli sistemler enerji tüketimi yapılacak ışıma alan herhangi bir yerde (örneğin bir binanın çatısı) kurulabileceği gibi, birçok güneş dizisinin seri ve/veya

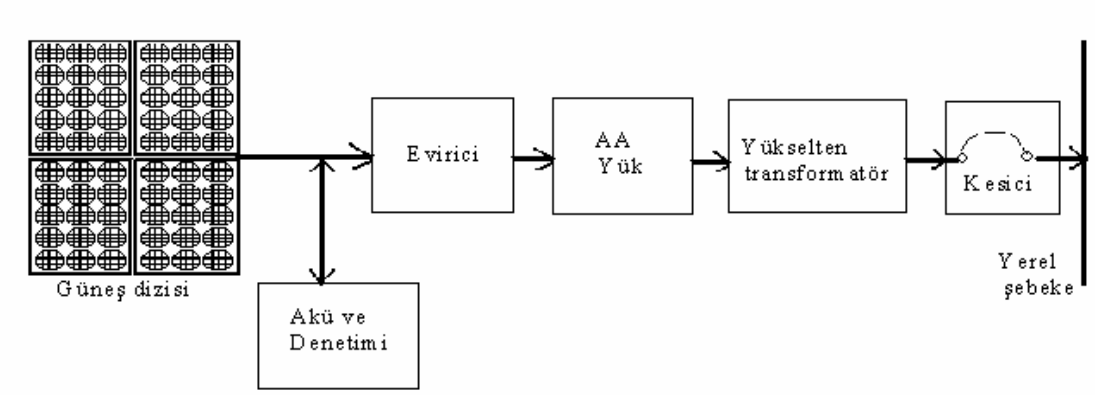
Paralel birleşiminden oluşan bir enerji santrali gibi de kurulup, dağıtım şebekesi ile birden fazla ve de farklı uzaklıktaki tüketim birimlerine dağıtılabilir.

GH temelli enerji sistemleri tek başına (stand alone) kullanılabileceği gibi, şebekeye bağlı (grid line) veya diğer sistemlerle birlikte (hybrid system)'de kullanılabilineceği literatürde verilmiştir [13-20]. Tek başına kullanıldığı durumlarda, ışımanın güçlü olduğu zamanlarda fazla enerjiyi depolayan ve ışımanın yeterli olmadığı zamanlarda ise depolanan enerjiyi kullanan bir yapı özelliğinde olması dolayısı ile enerji depolama ünitesi (akü) gerekmektedir. Aksi takdirde enerjide süreklilik sağlanamaz. Depolama ünitesinin fiziki ve mali büyüklüğü, hizmet sunulan enerji tüketim birimlerinin büyüklüğüne ve ışıma yeterli olmadığı zamanlarda verilecek bu hizmetin süresine göre değişir. Bu da sistemin maliyetinin artmasına neden olur. Maliyeti minimuma indirmek için, enerji sisteminden beslenen yükler arasında bir öncelik düzenlemesi yapılıp, ışımanın yeterli olmadığı durumlarda sadece zorunlu olan yük birimlerine enerji sağlayan sistemler geliştirilmiştir. Tek başına kullanılan GH temelli sistemler için bir örnek şekil 4.1'de blok şema olarak verilmiştir.



Şekil 4.1: Çok amaçlı tek başına kullanılan tipik bir sistem

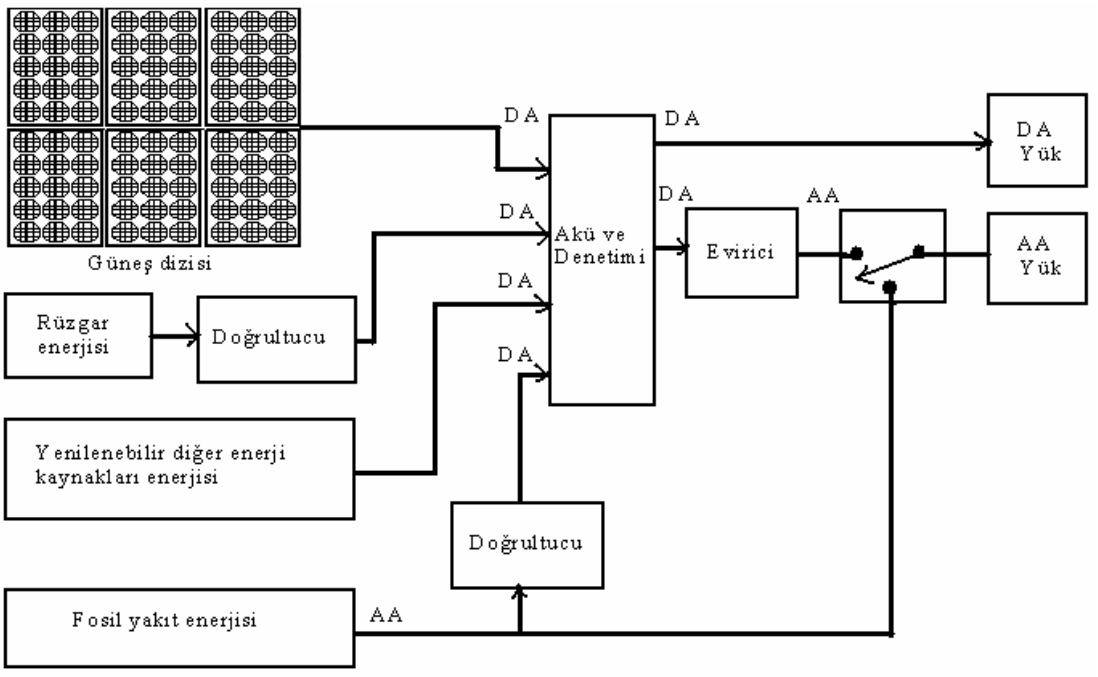
Tek başına kullanılan sistemler zorunlu olmadıkça tercih edilmezler. Bunların yerine uygun olan yerlerde şebekeye paralel çalışan sistemler, bu mümkün değil ise diğer yenilenebilir enerji kaynakları sistemleri ile birlikte kullanılırlar. Şebekeye paralel çalışan GH temelli bir sistem şekil 4.2'de blok şema olarak verilmiştir.



Şekil 4.2: Şebeke bağlantılı tipik bir sistemin blok şeması

Bu sistemler ışıma varken şebekeye güç aktarabilir ve ışıma yetersizken şebekeden güç çekebilir. Bu da enerji israfını önlediği gibi büyük depolama birimi kullanmayı da ortadan kaldırır. Çift yönlü bir enerji sayacı ile maksimum ekonomiklik sağlanır.

Şebekeye paralel çalışma imkanı yoksa veya mevcut enerji potansiyelini değerlendirmek için çoğu zaman GH temelli sistemler diğer enerji sistemleri (rüzgar, biodizel v.b.)ile birlikte kullanılır. Şebekeye paralel çalışma imkanı varken dahi diğer enerji kaynaklarının potansiyelinden faydalanma tercih edilebilir. Karma enerji sistemine tipik bir örnek şekil 4.3'de blok şema olarak verilmiştir.



Şekil 4.3: Tipik bir karma sistem

Yukarıda verilen sistemlere Türkiye'den ve dünyanın birçok yerinden örnekler verilebilir.

Muğla Üniversitesi Kötekli Yerleşkesi alanında biri şebeke bağlantısız, biri karma olmak üzere toplam dört adet (toplam 54 kW) G.H. temelli enerji sistemi 2004 yılından beri çalışmaktadır [21].

Kocaeli Üniversitesinde, yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili çalışmalar, oldukça uzun bir süredir yapılmaktadır. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma Birimi (YEKAB) ile başlayan bir süreç, Temiz Enerji Dönüşüm Sistemleri Araştırma Birimi (TEDSAB) ile devam etmektedir. 2004 yılında Umuttepe Yerleşkesinde deneme ve araştırma amaçlı karma bir sistem (3 X 1,5 kW lık rüzgar türbini ile 1,5 kW lık güneş paneli) oluşturulup şebekeye paralel çalışabilen bir sistem haline getirilmiştir. Yapılmakta olan izleme ve değerlendirmeler sonunda sistemin başarılı bir performansta çalışabildiği görülmüştür.

Almanya'nın Münih kentinin Yeni Fuar Merkezinde 1MW kapasiteli bir sistem 2000 yılından beri çalışmaktadır. Brezilya'da 151 kWp büyüklüğünde alıcı/verici istasyonu, Peru Amazon Ormanlarında 90 kWp kırsal telefon besleme sistemi, Cezayir Hassi de 121 kWp RTU sistem beslemesi, İran'ın çeşitli bölgelerinde toplam 640 kWp tekrarlayıcı istasyon besleme sistemleri, Ummanda 300 kWp GSM baz istasyonu beslemesi, Endonezya Irain Jaya'da 300 kWp radyo baz istasyonu, Tayland'da 641 kWp uydu yer istasyonu beslemesi, Göcek'de 13.2 kWp GSM baz istasyonu beslemesi kullanımda olan tipik GH temelli enerji sistemleridir [4].

Gün geçtikçe hem sayısal olarak hem de güç büyüklüğü bakımından Dünyanın değişik yerlerinde GH temelli sistemler hızla gelişmekte ve çoğalmaktadır.

GH temelli sistemlerin hangi formda kurulup kullanılacağı kadar önemli olan diğer bir konuda sistemden maksimum faydayı sağlamaktır. Maksimum fayda sağlamanın anlamı, değişen her bir ışıma değeri ve değişen her bir yük değerinde sistemden maksimum gücü çekmektir. Bunu sağlayabilmek için de, sistemin enerjisini yöneten ve denetleyen elektrik-elektronik sistemlere ihtiyaç vardır.

Klasik sistemlerde çoğunlukla sistemin giriş gücü sabit ve sadece beslenen yük değişken (bazen yük'te sabit) olduğundan, bunlar için geliştirilen enerji yönetim ve denetim sistemlerini, giriş gücü birçok parametre (ışıma, sıcaklık v.b) ile değişen GH temelli enerji sistemlerinde kullanılamaz. GH temelli sistemlerin yaygınlaşması ve önem kazanmasına paralel olarak, bu sistemlerin enerjisini yöneten ve denetleyen elektrik-elektronik sistemlerde (dönüştürücüler, eviriciler, maksimum güç denetleyicileri v.b.) hızla gelişmektedir.

GH temelli sistemlerde maksimum verimi elde etmek için iki açıdan değerlendirme yapılması gerekir:

- Sistemin mevcut ışımadan maksimum ışımayı alması
- Sistemin ürettiği enerjinin yüke maksimum aktarılması

Güneş ışınlarının yeryüzünün her hangi bir noktasına geliş açıları (Θ) ve ışımanın şiddeti mevsimden mevsime ve günün saatlerine göre değişmektedir. Güneş ışımasının GH yüzeyine geliş açısı (Θ) her ışıma için önemlidir. Mevcut ışımadan maksimum enerjinin Güneş hücresine aktarılması için geliş açısının 90^o olması gerekir. Güneşin sürekli hareket halinde olması ve Dünyanın herhangi bir noktasına göre çizdiği hareket yörüngesinin mevsime göre değişmesinden dolayı, Güneş hücresinin sürekli maksimum ışımayı alabilmesi için bu değişimi izlemesi gerekir. Güneş hücresinin her durumda maksimum ışımayı görebilmesi için, ışıma açısının değişimine göre GH temelli sistemi hareket ettiren sistemler literatürde verilmiştir. Ancak bu sistemler, hem kendileri enerji tükettiklerinden ve hem de ilave bir maliyet gerektirdiklerinden pek tercih edilmemektedirler. Bunun yerine GH temelli sistemler, güneş ışımasını en iyi bir şekilde alabilecekleri bir yere (genelde çatılara) sabitlenir.

Bu bölümde hedeflenen amaç, GH temelli enerji sistemlerinde maksimum faydayı sağlayan, enerjiyi yöneten ve denetleyen elektrik-elektronik sistemleri incelemektir.

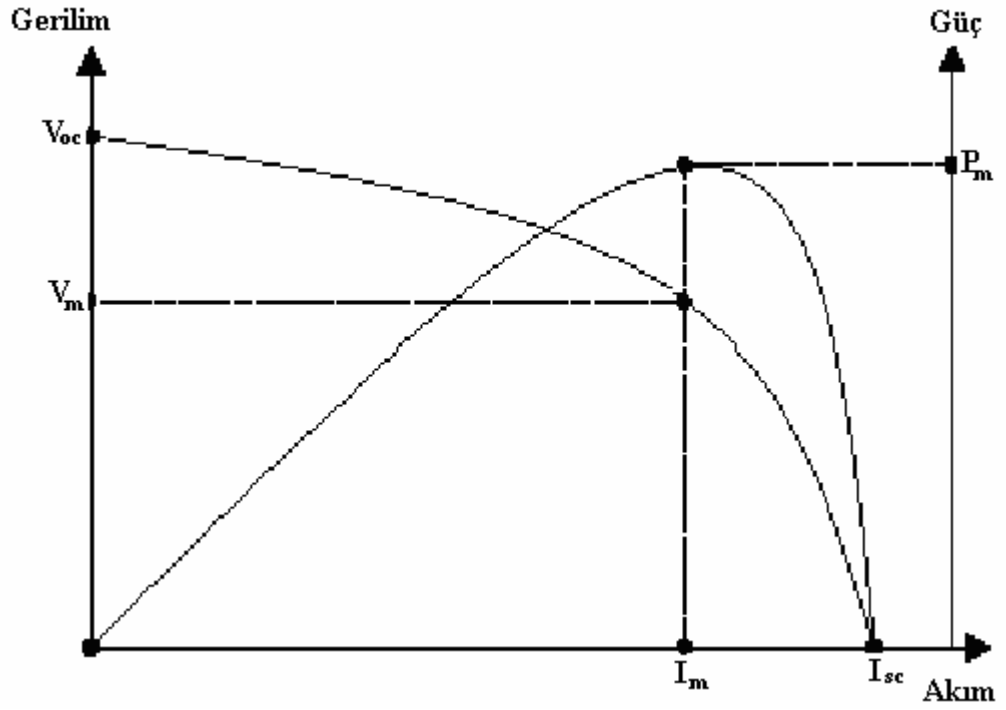
4. 1. GH Temelli Bir Sistemin Bir Yükü Doğrudan Beslemesi

GH temelli sistemin en basit modeline bir örnek olarak, sistemin bir rezistif yükü doğrudan beslemesi verilebilir. Böyle bir sistemin yük değerinin değişimine göre gösterdiği performans analizi aşağıda verilmiştir [22].

Bir güneş hücresinin akım gerilim karakteristiğini tanımlayan klasik ifadelerden biri denklem (3. 1) ile verilmişti. Bu denklemde gerilim ifadesi yalnız bırakılırsa, Güneş hücresinin akıma bağlı gerilim değişimi ifadesi denklem (4.41) elde edilir.

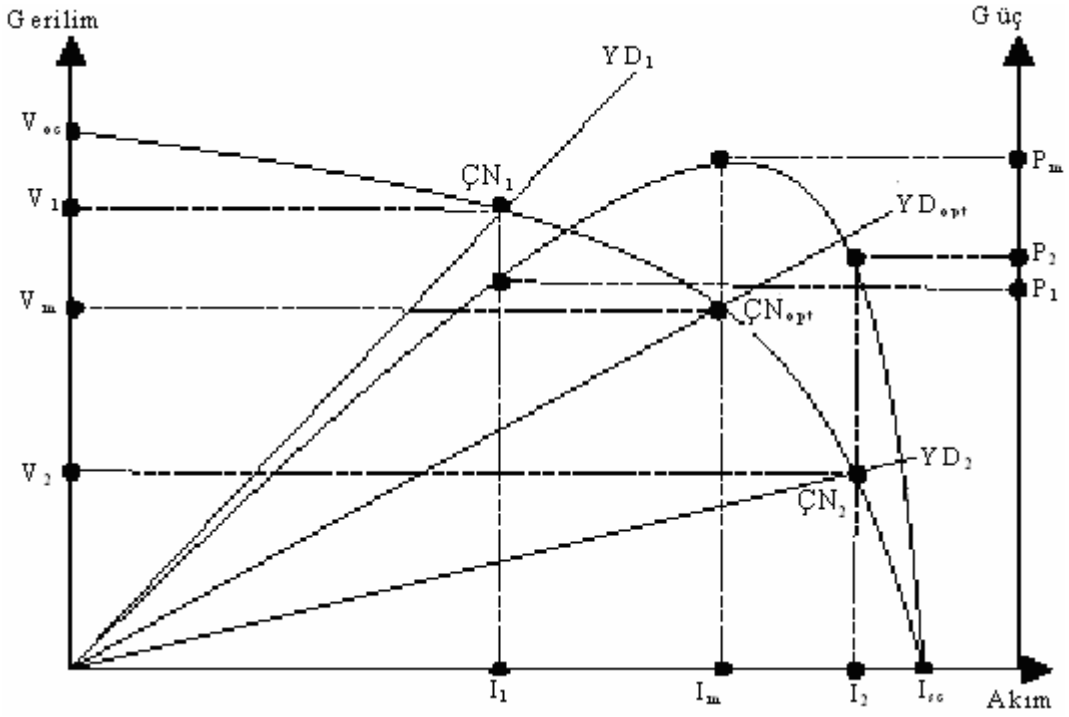
$$V = \frac{1}{\Lambda}\ln\left[1 + \frac{I_p - I}{I_s}\right] - R_s I \tag{4.1}$$

Burada "$\Lambda = q/akT_c$" ifadesi ile tanımlıdır. Güneş hücrelerinin seri ve/veya paralel bağlanması ile oluşan güneş paneli veya dizisi için de karakteristik denklem, denklem (4. 1) formunun farklı nümerik değerleri ile verilir. GH temelli bir sistemin tipik akım-gerilim karakteristiği şekil 4.4' de verilmiştir.



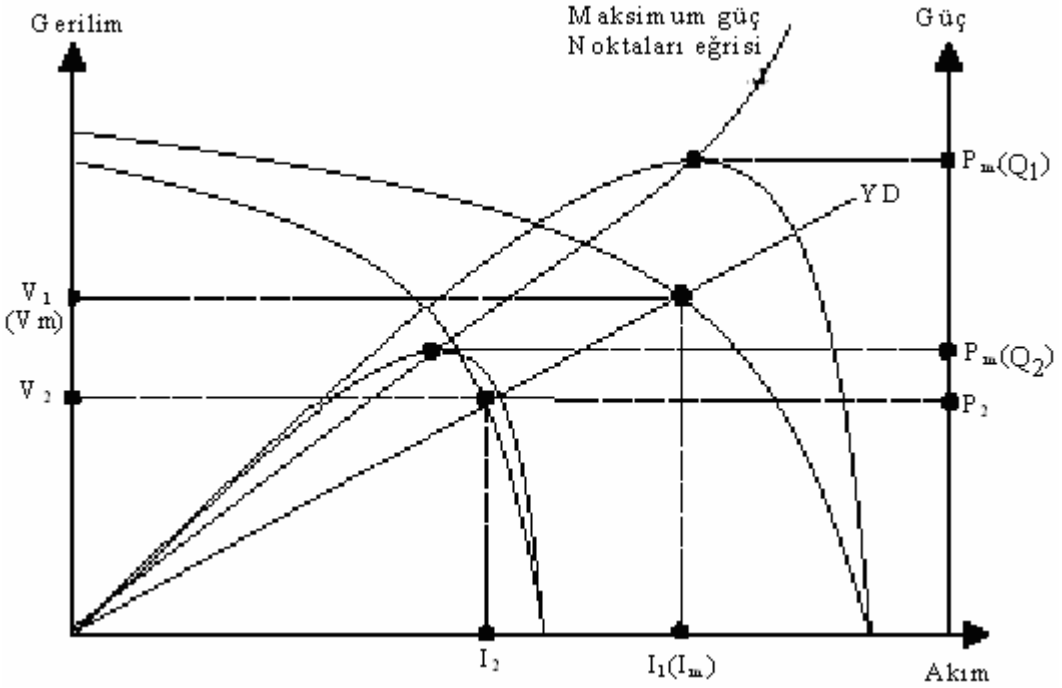
Şekil 4.4: Bir GH temelli sistemin tipik akım-gerilim ve güç-akım karakteristik eğrileri

Belirli bir ışıma ve sıcaklıkta modellenmiş bir GH temelli sistemin, farklı yükleri beslemesi durumunda farklı çalışma noktaları elde edilir. Şekil 4.5' de üç farklı yük için üç farklı çalışma noktası verilmiştir. Eğimi yük direncine eşit olan doğru yük doğrusu (YD) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.5: Üç muhtemel yük doğrusu ve onlara karşılık gelen çalışma noktaları

"YD_{opt}" olarak ifade edilen optimum yük doğrusunun sonucu olan "$ÇN_{opt}$" noktası, sistemin kendi maksimum güç noktasında çalışmasına izin verir. "YD_1" ve "YD_2" yükleri "$ÇN_1$" ve "$ÇN_2$" çalışma noktalarına tekabül eden keyfi değerlerdir. "$ÇN_{opt}$" noktası dışındaki noktalarda GH temelli sistemden çekilen güç muhtemelen önemli ölçüde daha azdır. İncelenen "$ÇN_1$" ve "$ÇN_2$" noktaları için ayrı ayrı değerlendirmeler yapılırsa: "YD_2" yük doğrusunun eğimi çok düşük olduğundan, gerilimi çok düşük seviyelere düşüren (kısa devre noktasına yakın) çok fazla akım çeker, buna karşın "YD_1" yük için yeterli akımı çekemez (açık devre noktasına yakın). Yükteki değişimlerin yanında ışımadaki değişimler de farklı çalışma noktalarına neden olurlar. Şekil 4.6'da sabit bir yükün değişen ışıma (Q_1 ve Q_2) değerlerine bağlı olarak farklı çalışma noktaları sonucu oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 4.6: Işımadaki değişimin çalışma noktalarına etkisi

GH temelli bir sistemin, yükteki, ışımadaki ve sıcaklıktaki değişimlerde çalışma noktasını kendi maksimum güç noktasına oldukça yakın bir noktada tutması gerekir. Çalışma noktasını ayarlamak için DA/DA dönüştürücü kullanmak gerekir. DA/DA dönüştürücünün doluluk oranı her yük durumu için yük ile GH temelli enerji kaynağını eşlemektir. Bu durumda dönüştürücünün hem yükseltici (boost) hem de düşürücü (buck) modda çalışabilmesi gerekir. Hem yükseltici moda hem de düşürücü modda verimli çalışabilen bir DA/DA dönüştürücü tasarımı çok zordur. Genelde sistem öyle planlamalıdır ki, en kötü durumda bile (örneğin yük maksimum, ışıma minimum ve sıcaklık maksimum), yük doğrusu GH temelli sistemin kısa devre akımına yakın olan çıkış karakteristiği ile kesişmelidir. Sonra basit ve verimli bir düşürücü dönüştürücü, tüm yük koşulları için yük ile GH temelli sistemi karşılayabilir.

Benzer şekilde yükün "YD_{opt}" den büyük olduğu durumlarda yükseltici tip DA/DA dönüştürücünün doluluk oranını (duty cycle) değiştirerek, herhangi bir yükün GH temelli sistemin maksimum güç noktası akımından (I_m) daha fazla akım çekmesini sağlayacağı aşikardır.

4. 2. DA/DA Dönüştürücüler

Bir GH temelli sistemin her koşulda (ışımada, sıcaklıkta ve yükteki değişimler) maksimum güç noktasına oldukça yakın bir noktada çalışabilmesi için bir DA/DA dönüştürücüsüne ihtiyaç vardır.

DA/DA dönüştürücüleri; bir doğru akım kaynağı gerilimini bir değerden başka bir değere dönüştüren güç dönüştürücü devreleridir. Bu devreler dizüstü bilgisayarları, mobil telefonlar gibi pille beslenen elektronik cihazlar için çok önemlidir. Bu tür elektronik cihazlar genelde beslendikleri pil geriliminden ve birbirlerinin gerilimlerinden farklı değerlere sahip birden fazla alt sistemler içerirler. DA/DA dönüştürücüleri tek bir pil geriliminden her bir alt sistem için gerekli gerilimi üreterek, her bir alt sistem için ayrı pil kullanma dezavantajını ortadan kaldırır [23].

Bir gerilimi başka bir gerilime dönüştüren en basit metot, seri bağlı dirençlerle oluşturulan "Gerilim Bölücü" devrelerdir. Ancak bu devrelerin de önemli sorunları vardır. Bunlar:

- Gerilim regülasyonu sağlayamama
- Yük direnci değerinin bilinmesi ihtiyacı
- Düşük verim
- Kaynak geriliminden daha yüksek bir gerilim üretememe
- Kaynak geriliminden farklı kutuplu bir gerilim üretememe

gibi dikkate alınması gereken sorunlardır.

Yukarıda sayılan sorunları gidermek için gerilim bölücü devreler yerine anahtarlamalı DA/DA dönüştürücü devreleri kullanılır. Bu devreler anahtarlama modlu güç kaynaklarına çok benzerler. Genellikle bir bobine veya kondansatöre DA gerilimini zamanın bir periyodunda uygulayarak bu elemanlarda akımın akmasına ve dolayısıyla bunlarda manyetik enerji birikimine yol açması ve sonrasında bu gerilim devre dışı bırakılarak birikmiş manyetik enerjinin çıkış gerilimine (yüküne) aktarılması ile dönüştürme işlemi yapılır. Bu dönüşümde verim %80 ile %95 arasında değişir. Anahtarlamalı dönüştürücülerin en önemli sorunu yüksek frekansta elektronik gürültünün oluşması ve bazen mutlaka filtrelenmesi gereğidir.

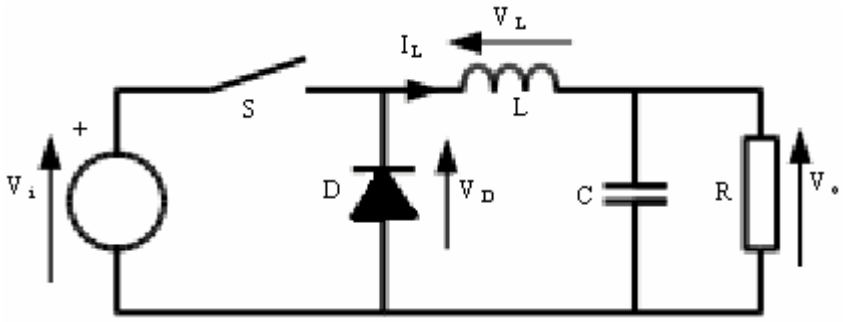
Yalıtılmış DA/DA dönüştürücüleri, bir DA giriş güç kaynağını bir DA çıkış güç kaynağına dönüştürür. Giriş gerilimi ile çıkış gerilimi farkının istenilen oranda olması imkanını verir. DA/DA dönüştürücülerinin değişik topolojileri, giriş geriliminden daha yüksek, daha düşük, daha yüksek ve daha düşük veya negatif çıkış gerilimi özelliği gösterir. Bunlar:

• Düşürücü (buck) dönüştürücü
• Yükseltici (boost) dönüştürücü
• Düşürücü-yükseltici (buck-boost) dönüştürücü
• Geridönüşlü (Flyback) dönüştürücü
• İt-çek (push-pull) dönüştürücü
• Yarım köprü dönüştürücü
• Tam köprü dönüştürücü
• Kondansatörlü (cuk) dönüştürücü
• Sepic dönüştürücü

devrelerdir. Genel anlamda bir DA/DA dönüştürücü bu devrelerden birini içerir. Biz bu devrelerden düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici ve geridönüşlü yapıda olanları incelenecektir.

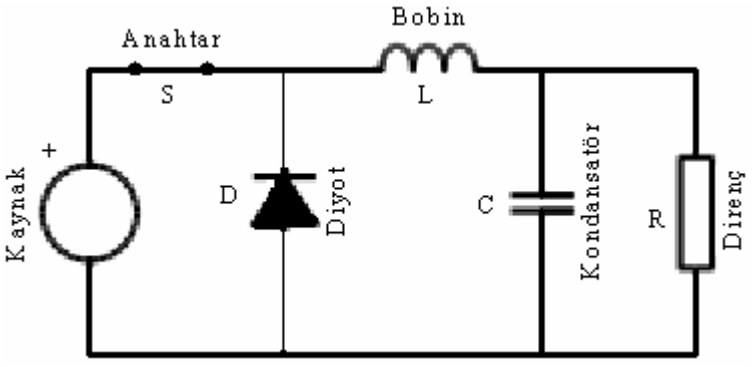
4. 2. 1. Düşürücü DA/DA dönüştürücüler

Bir düşürücü DA/DA dönüştürücüsü, iki anahtar elemanı (bir tranzistör, tristör veya IGBT ve bir diyod), bir bobin ve bir kondansatör kullanan bir anahtarlamalı mod güç kaynağıdır. Yük olarak "R" direnci kullanan bir düşürücü DA/DA dönüştürücü devresi şekil 4.7' de verilmiştir.

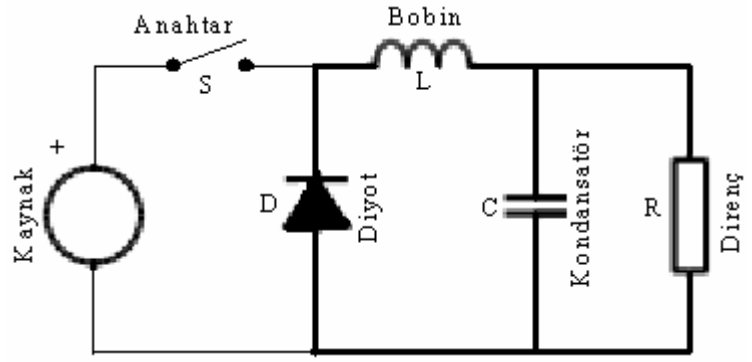


Şekil 4.7: Yük olarak "R" direnci kullanan bir düşürücü DA/DA dönüştürücü

Devre, anahtarın iletimde (on) ve kesimde (off) olmasına bağlı olarak iki moddan birinde çalışır. İletim ve kesim modunun eşdeğer devreleri sırasıyla şekil 4.8 ve şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8: Anahtar iletim (on) modu durumunda eşdeğer devre



Şekil 4.9: Anahtar kesim (off) modu durumunda eşdeğer devre

Düşürücü DA/DA dönüştürücünün çalışması, bir bobin ve onu kontrol eden iki anahtar (genellikle bir transistor ve bir diyod) ile basitleştirilebilir. "S" anahtarı sayesinde bobin bir kaynak gerilimine bağlanıp enerji depolar ve bir kaynaktan ayrılarak depoladığı enerjiyi yüke aktarır.

Bir düşürücü DA/DA dönüştürücü sürekli ve süreksiz olmak üzere iki modun birinde çalışır.

4. 2. 1. 1. Sürekli modda çalışma

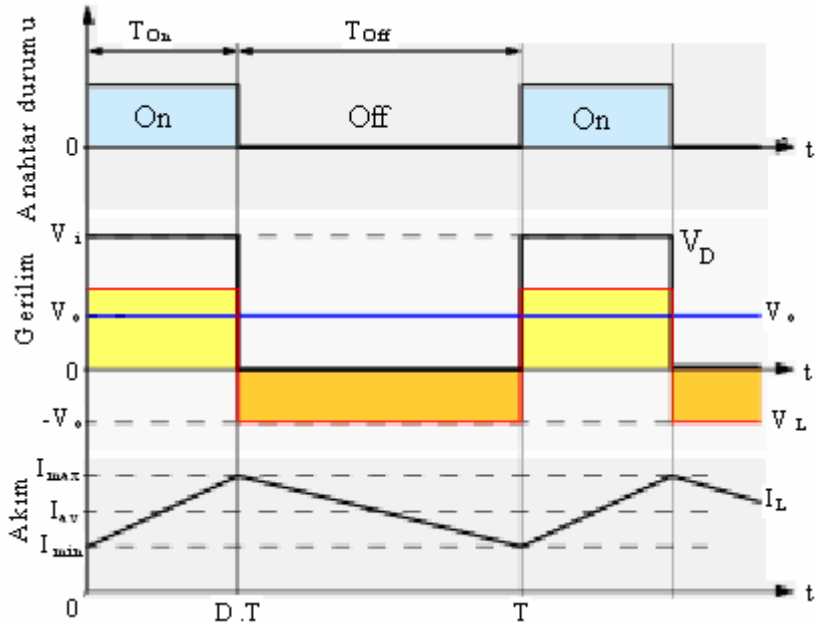
Bir düşürücü DA/DA dönüştürücüsünün bobinindeki akım, anahtarlama periyodu boyunca sıfır olmuyorsa, sürekli modda çalışıyor denir. Devrenin sürekli modda çalışma temel dalga şekilleri şekil 4.10'da verilmiştir.

"S" anahtarı iletimde iken; bobine giriş gerilimi (V_i) ile yük geriliminin (V_o) farkı kadar gerilim uygulanır, bobin akımı lineer olarak artar. Diyod ters kutuplandığından dolayı kesimde kalır.

"S" anahtarı kesimde iken; diyod iletime kutuplanır, bobin gerilimi "$-V_o$" olur (diyod üzerinde düşen gerilim ihmal ediliyor) ve bobin akımı "I_L" azalır.
Bobinde biriken enerji (E); denklem (4.2) ile verilir.

$$E = \frac{1}{2} L I_L^2 \tag{4.2}$$

Eşitlikten görüleceği gibi bobinde biriken enerji; anahtar iletimde iken akımdaki artışa paralel olarak artacak ve anahtar kesimde iken akımdaki azalışa paralel olarak azalacaktır. Bobin, dönüştürücünün girişinden çıkışına enerji transferi yapmaktadır.



Şekil 4.10: Sürekli modda çalışan bir düşürücü DA/DA dönüştürücü devresinin grafikleri

Dönüştürücü kararlı durumda çalıştığında, her bir elemanda biriken enerjinin anahtarlama çevriminin başında ve sonunda aynı değerde olması gerekir. Bunun anlamı; I_L akımının, t = 0 ve t = T değerlerinde aynı olması demektir.

Şekil 4.10 ve akım-gerilim denklemlerinden yararlanarak dönüştürücünün giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi belirleyen denklem (4.3) elde edilir.

$$V_o = DV_i \tag{4.3}$$

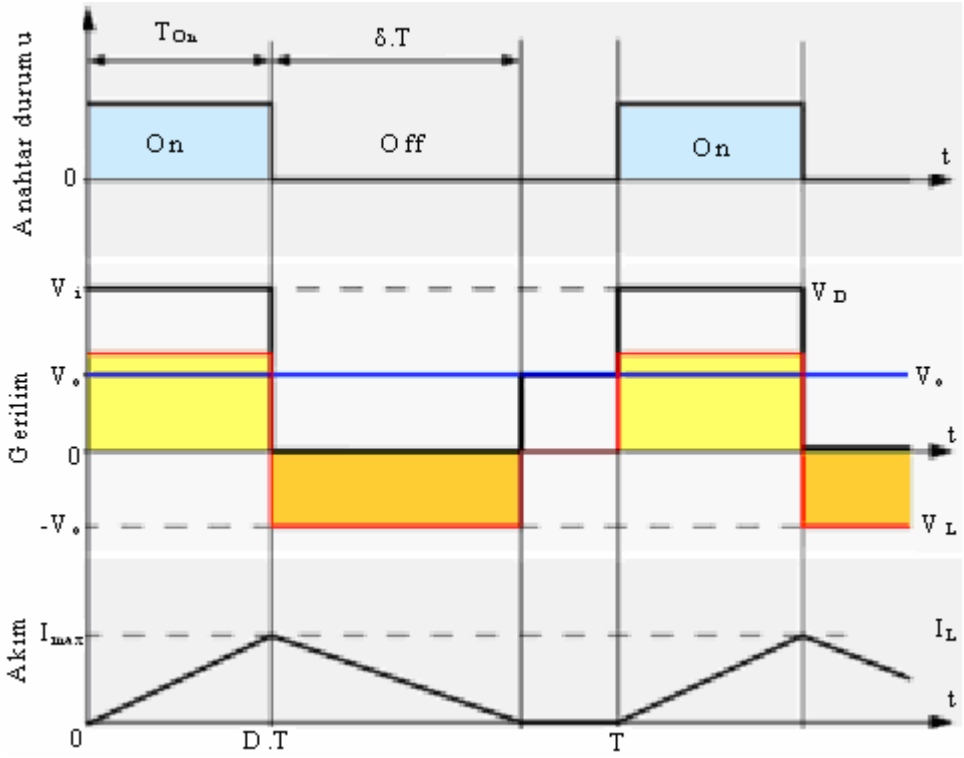
Son denklemde kullanılan "D" doluluk oranı (duty cycle) olarak adlandırılır ve değeri 0 ile 1 aralığında değişir. Bir düşürücü DA/DA dönüştürücünün çıkış geriliminin, giriş gerilimine ve doluluk oranına bağlı olarak doğrusal bir değişim gösterdiği açıktır. Doluluk oranı en fazla 1 olacağına göre, çıkış geriliminin alacağı maksimum değer giriş gerilimi değeridir. Genelde doluluk oranı 1'den küçük olduğundan, bu dönüştürücüye düşürücü dönüştürücü adı verilmiştir.

4. 2. 1. 2. Süreksiz modda çalışma

Bazı durumlarda yüke transfer edilecek enerji miktarı için gerekli zaman, anahtarlama periyodundan daha küçük olabilir. Bu durumda bobindeki akım, periyodun bir bölümünde sıfır olacaktır. Bir önceki durumdan tek farkı, anahtarlama periyodu sonunda bobinin tamamen boşalacağıdır. Süreksiz mod çalışma grafikleri şekil 4.11'de verilmiştir.

Dönüştürücünün hala kararlı durumda çalıştığını farz edebiliriz. Bobindeki enerji, anahtarlama periyodunun başında ve sonunda eşittir (süreksiz moda sıfırdır). Bu da, bobin geriliminin ortalama değerinin sıfır olması demektir. Şekil 4.11 ve akım-gerilim denklemlerinden yararlanarak dönüştürücünün giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiyi belirleyen denklem (4.4) elde edilir.

$$V_o = V_i \frac{1}{\frac{2LI_o}{D^2 V_i T} + 1} \tag{4.4}$$



Şekil 4. 11: Süreksiz mod çalışma grafikleri

Son ifade de, düşürücü DA/DA dönüştürücünün süreksiz mod çıkış geriliminin, sürekli mod çıkış gerilimine göre çok daha karmaşık olduğu görülmektedir. Ayrıca çıkış gerilimi, sadece giriş gerilimi ve doluluk oranının değil aynı zamanda bobin akımının, anahtarlama periyodunun ve çıkış akımının da fonksiyonudur.

4. 2. 1. 3. Sürekli ve süreksiz mod arasındaki limit

Süreksiz mod ile sürekli mod arasındaki limit, anahtarlama periyodonun sonunda bobin akımının kesin olarak sıfıra düşmesi ile ortaya çıkar. Süreksiz mod ile sürekli mod arasındaki limit değerindeki çıkış akımı bobin akımının ortalama değerine eşittir ve denklem (4.5) ile ifade edilir.

$$I_{o\lim} = \frac{V_i(1-D)}{2L}DT \tag{4.5}$$

Aşağıda belirtilen iki notasyon geliştirelim:

• $|V_o|$ = V_o/V_i ifadesi ile tanımlı normalize gerilim; sıfıra (V_o = 0 iken) ve bire (V_o = V_i iken) eşittir.

•Normalize akım, $|I_o|$ = $(L/TV_i)I_o$ ifadesi ile tanımlıdır. (TV_i/L) ifadesi bir periyoddaki bobin akımının maksimum artışına eşittir. Örneğin bir doluluk oranındaki (D = 1) bobin akımı artışı için (kararlı durumda çalışan dönüştürücü); çıkış akımı yokken $|I_o|$ değeri sıfıra ve dönüştürücünün maksimum akımı alması durumunda $|I_o|$ değeri bire eşit olur.

Bu notasyonları kullanarak:

• Sürekli modda (4.6) denklemi,

$$|V_o| = D \tag{4.6}$$

• Süreksiz modda (4. 7) denklemi,

$$|V_o| = \frac{1}{\frac{2LI_o}{D^2V_iT}+1} = \frac{1}{\frac{2|I_o|}{D^2}+1} = \frac{D^2}{2|I_o|+D^2} \tag{4.7}$$

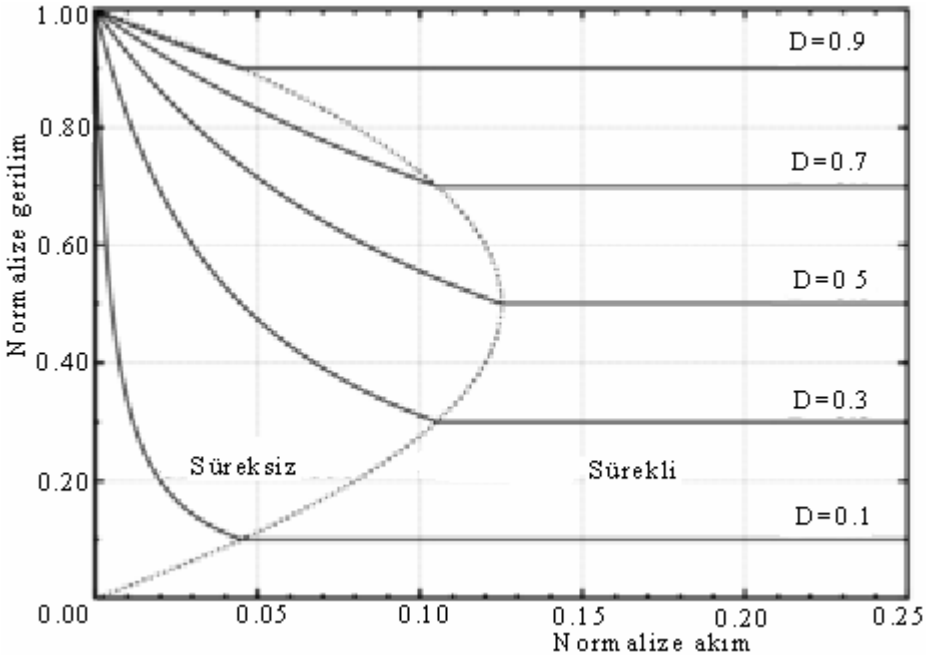
• İki durum arasındaki limitteki akım (4.8) denklemi,

$$I_{o\lim} = \frac{V_i(1-D)}{2L}DT = \frac{I_{o\lim}}{|I_o|}\frac{(1-D)D}{2} \tag{4.8}$$

yazılabilir. İki mod arasındaki limitin eğrisi (locus) denklem (4.9) ile verilir.

$$\frac{(1-D)D}{2|I_o|} = 1 \tag{4.9}$$

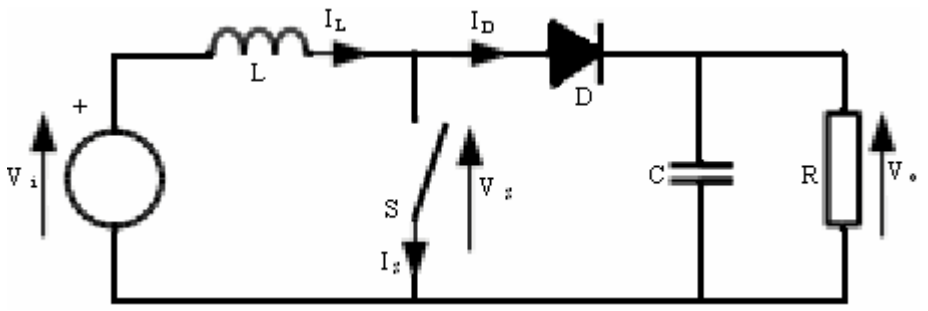
Bu denklemlerin çizimleri şekil 4.12'de verilmiştir. Sürekli modda çıkış geriliminin sadece doluluk oranına bağlı olmasına karşın sürekli olmayan modda çıkış gerilimi ifadesinin çok daha karmaşık olduğu aşikardır.



Şekil 4.12: Düşürücü dönüştürücünün normalize akım-gerilim grafikleri

4. 2. 2. Yükseltici DA/DA Dönüştürücüler

Yükseltici bir DA/DA dönüştürücü, giriş DA gerilimi çıkış DA geriliminden küçük olan bir güç dönüştürücü devresidir. En az iki yarı iletken anahtar (bir diyod ve bir transistor) ve en az bir enerji depolama elemanı içeren anahtarlamalı mod güç kaynaklarının (SMPS) bir türüdür. Çoğu zaman performansı geliştirmek için, bir bobin ve bir kondansatör birlikte dönüştürücü çıkışına eklenir. Anahtar olarak mosfet, IGBT veya BJT kullanılabilir. Şekil 4.13'de temel bir yükseltici DA/DA dönüştürücü devresi verilmiştir.



Şekil 4. 13: Temel yükseltici DA/DA dönüştürücü devre şeması

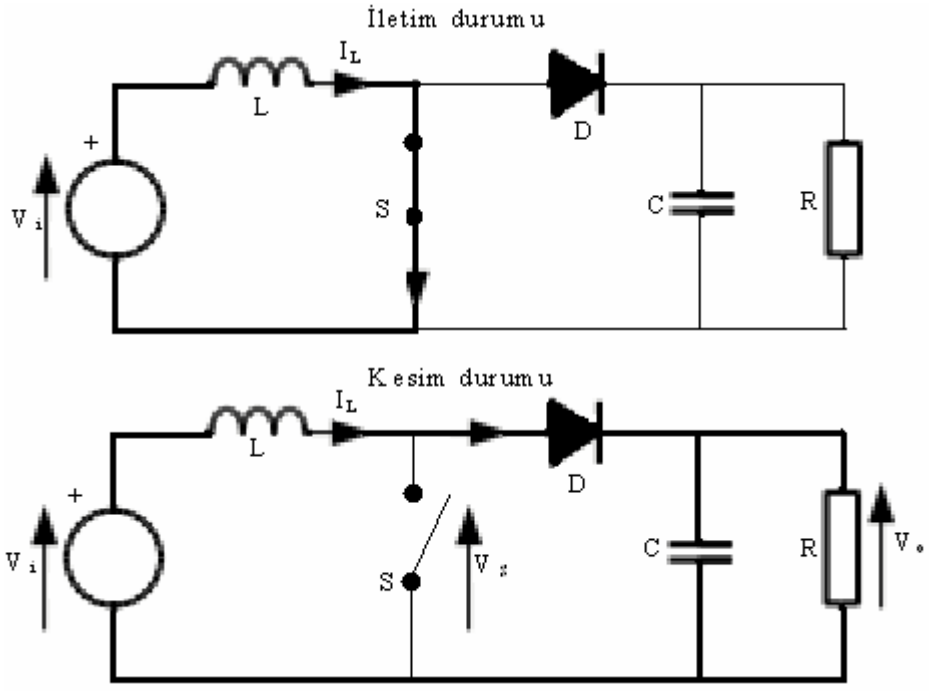
Anahtarlamalı mod güç kaynakları (SMPS), yüksek verim için, açma ve kapamayı çok hızlı yapmalı ve düşük kayba sahip olmalıdırlar. 1950'li yıllarda yarı iletken anahtarlarda sağlanan gelişmeler, bu tür devrelerin tasarımında büyük kolaylıklar sağladı. Yarı iletken anahtarlar, vakum tüplerden ve elektromekanik rölelerden daha hızlı açma ve kapama yaparlar. Büyük DA/DA dönüştürücüler 1960'lı yıllarda geliştirildi. Bu gün kullanılan bir DA/DA modeli 1997 yılında geliştirildi [23].

Pil ile beslenen sistemlerde, yüksek gerilim elde etmek için, birçok pil seri bağlanır. Yükseltici dönüştürücü, gerilimi yükseltip kullanılan pil sayısını azaltır. Karışık (hybrit) elektrikli araç ve aydınlatma yükseltici dönüştürücü kullanan pille beslenen sistemlere örnek olarak verilebilir.

Yükseltici dönüştürücünün temel çalışma prensibi Şekil 4.14'de gösterildiği gibi iletim ve kesim olmak üzere iki ayrı durumu içerir:

• Anahtar iletim durumunda; "S" anahtarı kısa devre ve bobin akımında artış oluşur.

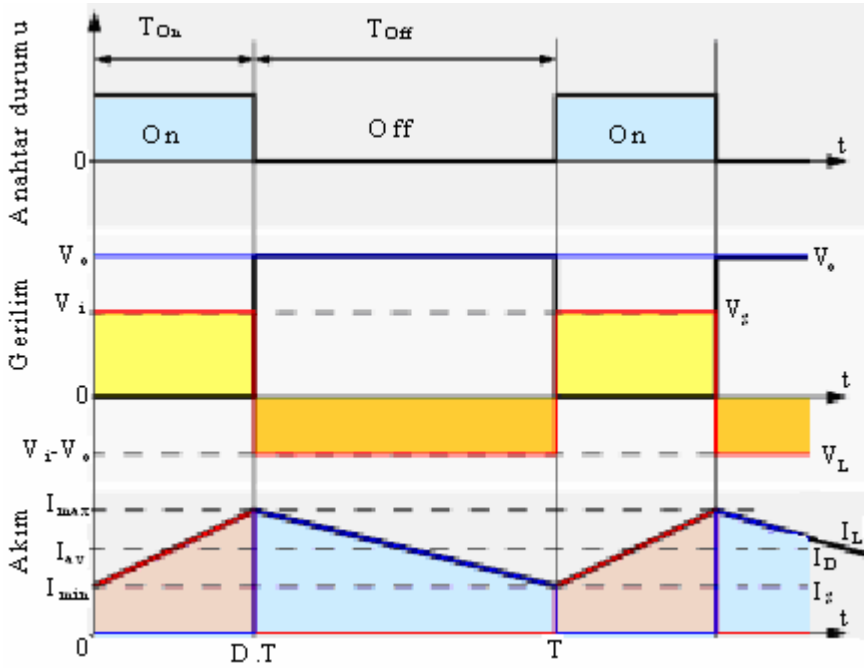
• Anahtar kesim durumunda; "S" anahtarı açık devre olduğundan, bobin akımının dolaşacağı tek yol "D" diyodu, "C" kondansatörü ve "R" yük direncidir. Bu da, anahtar iletimde iken biriken enerjinin kondansatöre aktarılmasına neden olur.



Şekil 4.14: S anahtarının konumuna bağlı olarak dönüştürücünün iki çalışma modu

4. 2. 2. 1. Sürekli modda çalışma

Bir yükseltici dönüştürücü, sürekli modda çalıştığı zaman bobin akımı (I_L) asla sıfıra düşmez. Şekil 4.15 bu tür bir çalışmanın grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.15: Sürekli modda çalışan yükseltici dönüştürücünün dalga şekilleri

Kararlı durumda çalışan ideal bir yükseltici dönüştürücünün çıkış gerilimi şöyle hesaplanır:

Anahtar iletimde iken, "S" anahtarı kısa devre, bobindeki akım denklem (4.10) ifadesindeki gibi artış gösterir.

$$V_i = L\frac{dI_L}{dt} \tag{4.10}$$

Düşürücü dönüştürücüde olduğu gibi "D", doluluk oranı olarak adlandırılan ve değeri sıfır ile bir arasında değişen bir çarpandır.

Anahtar kesimde iken, "S" anahtarı açık devre, bobin akımı yük üzerinden akar. Diyoda düşen gerilimi sıfır ve kondansatörü uçlarındaki gerilimi sabit tutacak kadar büyük varsayarsak, bobin akımındaki değişim, (4.11) denklemi ile verilir.

$$V_i - V_o = L\frac{dI_L}{dt} \tag{4.11}$$

Dönüştürücünün kararlı durumda çalıştığını düşünürsek, anahtarlama periyodunun başında ve sonunda her bir devre elemanındaki enerji miktarı aynı olmalıdır. Özellikle bobinde biriken enerji (E), (4.12) denklemi ile verilir.

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \tag{4.12}$$

Anahtarlama periyodunun başında ve sonunda bobin akımı aynı olacağı varsayımından hareketle akım-gerilim denklemlerinden giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki (4.13) denklemi ile ifade edilir.

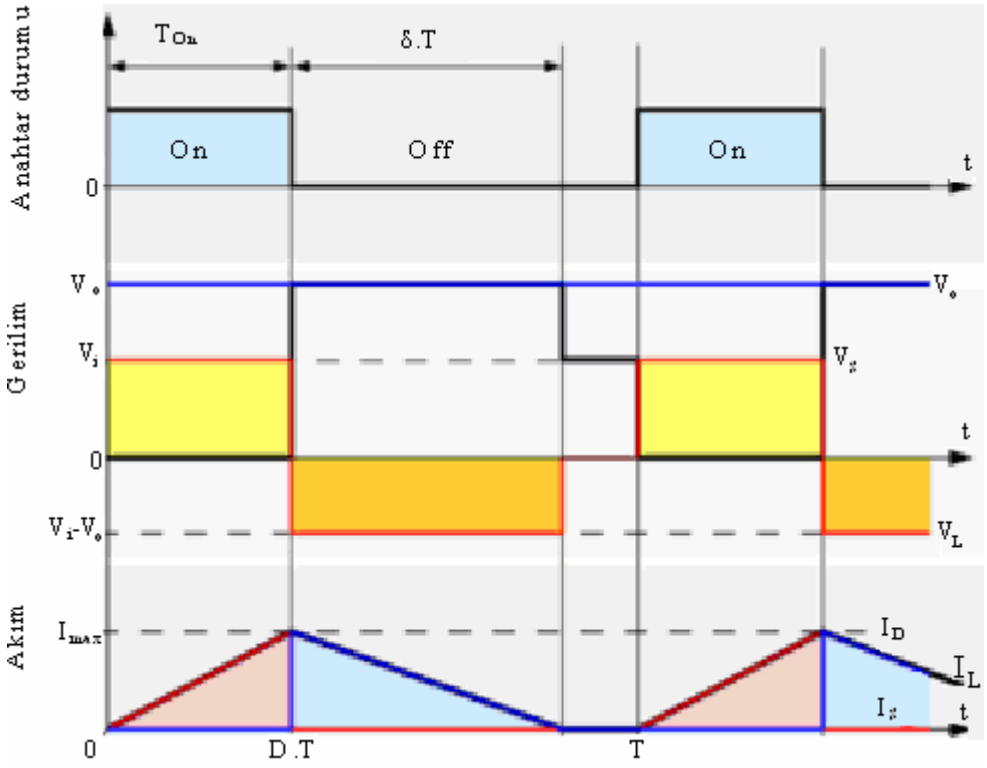
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \tag{4.13}$$

4. 2. 2. 2. Süreksiz modda çalışma

Bazı durumlarda yükün ihtiyaç duyduğu enerji miktarı, anahtarlama periyoduna göre küçük bir zaman diliminde transfer olabilecek kadar küçük olabilir. Bu durumda bobinden geçen akım, periyodun bir bölümünde sıfır olur. Sürekli moddan tek farkı, anahtarlama periyodunun sonunda bobinin tamamen boşalmasıdır. Bu küçük farkın çıkış gerilimi denklemi üzerinde önemli bir etkisi olur. Şekil 4.16'da süreksiz mod çalışmada yükseltici dönüştürücü grafikleri verilmiştir.

Şekil 4.16'nın grafiklerinden ve akım-gerilim denklemlerinden yararlanarak yükseltici dönüştürücünün süreksiz mod çalışmadaki giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki denklem (4.14) ile ifade edilir.

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{V_i D^2 T}{2LI_o} \tag{4.14}$$



Şekil 4.16: Süreksiz mod çalışmada yükseltici dönüştürücü grafikleri

Sürekli moddaki çıkış gerilimi ile kıyaslandığında bu ifadenin oldukça karmaşık olduğu görülmektedir. Dahası, çıkış gerilimi; sadece doluluk oranına bağlı olmayıp, aynı zamanda bobin değerine (L), giriş gerilimine (V_i) ve çıkış akımına (I_o) da bağlıdır. Ayrıca "D" sıfırdan büyük olduğu sürece çıkış gerilimi giriş geriliminden büyüktür.

4. 2. 2. 3. Sürekli ve süreksiz mod arasındaki limit

Daha önceden de belirtildiği gibi, yükseltici dönüştürücü, yükün çektiği akımın büyüklüğüne bağlı olarak, süreksiz mod ve sürekli mod olmak üzere iki modun her hangi birinde çalışabilir. Bu iki mod arasındaki limite anahtarlama periyodunun sonunda bobin akımının kesin olarak sıfır olduğu durumda ulaşılır.

Limit akımı, her iki mod sınırındaki akım olduğundan, her iki moda ait denklemleri sağlamalıdır. Denklem (4.15) ile ifade edilen bu akım sürekli mod çıkış gerilimi denkleminden yazılabilir.

$$I_{o_{\lim}} = \frac{V_i T V_i}{2 L V_o}\left(1 - \frac{V_i}{V_o}\right) \tag{4.15}$$

Aşağıda belirtilen iki notasyon üretelim:

• $|V_o| = \frac{V_o}{V_i}$ ifadesi, dönüştürücünün normalize gerilimini tanımlasın.

• $|I_o| = \frac{L}{TV_i} I_o$ ifadesi, normalize akımı tanımlasın. "$(TV_i)/L$" terimi, bir periyod boyunca bobin akımının maksimum yükselişine eşittir (D = 1). Kararlı durumda çalışan dönüştürücü için; akım çekmiyorsa "$|I_o|$" değeri sıfır ve maksimum akım çekiyorsa "$|I_o|$" değeri birdir.

Bu iki notasyonu kullanarak;

Sürekli mod için,

$$|V_o| = \frac{1}{1 - D} \tag{4.16}$$

Süreksiz mod için,

$$|V_o| = 1 + \frac{V_i D^2 T}{2 L I_o} = 1 + \frac{D^2}{2|I_o|} \tag{4.17}$$

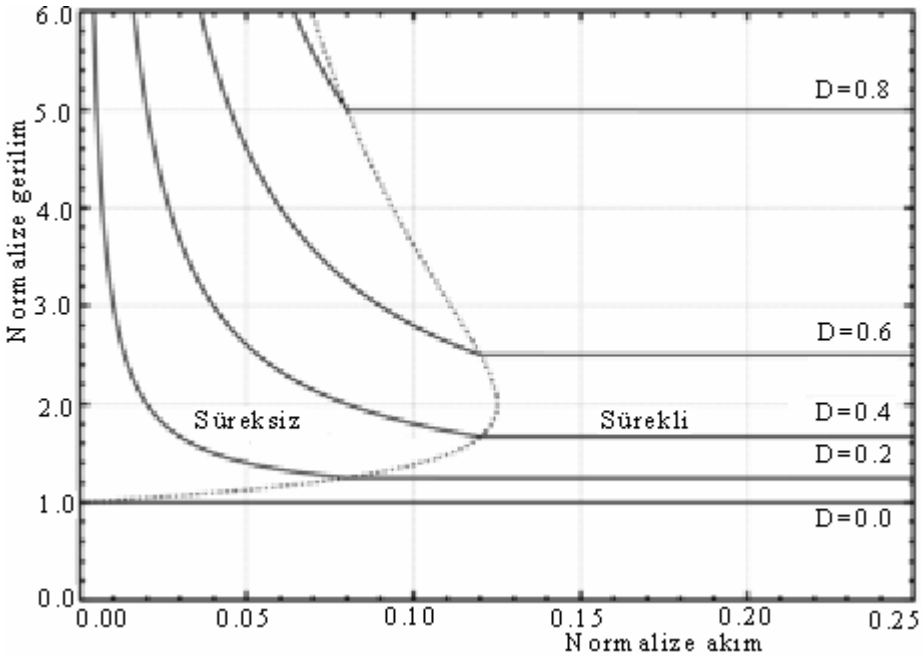
İki mod limitindeki akım için,

$$I_{o_{\lim}} = \frac{V_i T}{2L} D(1 - D) = \frac{I_{o_{\lim}}}{2|I_o|} D(1 - D) \tag{4.18}$$

denklemleri yazılabilir. Limitteki akımın çizdiği eğri, denklem (4.19) ile verilir.

$$\frac{1}{2|I_o|} D(1 - D) = 1 \tag{4.19}$$

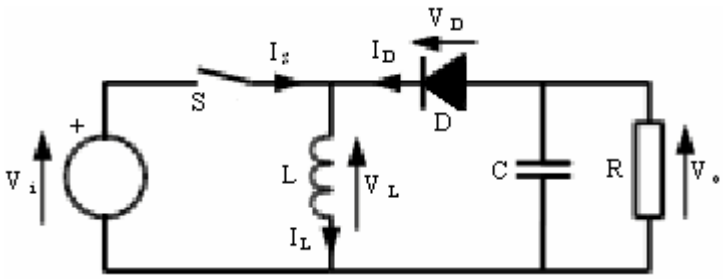
Bu denklemlerin çizimleri, şekil 4.17'de verilmiştir. İki mod arasındaki davranış farkı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.17: Yükseltici dönüştürücünün normalize akım-gerilim grafikleri

4. 2. 3. Düşürücü Yükseltici Dönüştürücü

Düşürücü yükseltici dönüştürücü, çıkış gerilimi genliği giriş gerilimi genliğinden büyük veya küçük olabilen dönüştürücü devresidir. Düşürücü ve yükseltici dönüştürücüler gibi, basit bir devre yapısındaki anahtarlama mod güç kaynağıdır. Çıkış gerilimi, doluluk oranına bağlı olarak değiştirilebilir. Bu dönüştürücüdeki bir dezavantaj, anahtarlama elemanının (toprak bağlantısı olmadığından) sürücü devresinin zorlaşmasıdır. Ayrıca çıkış gerilimi ile giriş gerilimi zıt kutupludur. Şekil 4.18'de yük olarak "R" direnci kullanan temel yükseltici dönüştürücü verilmiştir.



Şekil 4.18: Yük olarak "R" direnci kullanan düşürücü yükseltici dönüştürücü devresi

Şekil 4.18'de verilen bu tür bir dönüştürücünün çalışma grafikleri incelendiğinde, çalışma prensibinin oldukça basit olduğu görülmektedir.

İletim durumunda, giriş gerilimi bobine (L) doğrudan bağlanır. Bu bobinde enerji birikimine neden olur. Bu durumda kondansatör çıkış yüküne enerji sağlar.

Kesim durumunda bobin, çıkış yüküne ve kondansatöre bağlanır. Bobinde birikmiş enerji, kondansatöre ve dirence aktarılır.

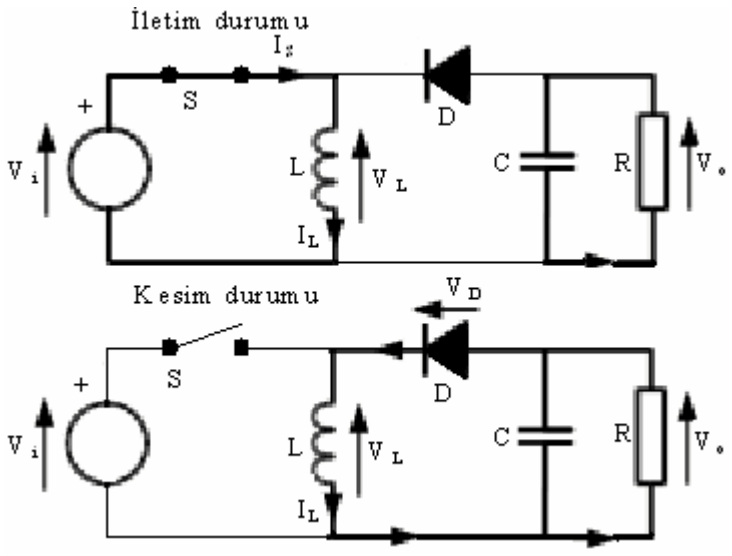
Düşürücü ve yükseltici dönüştürücülerle kıyaslandığında, düşürücü yükseltici dönüştürücünün karakteristiğinin temel farkları:

• Çıkış gerilimi ile giriş geriliminin zıt kutuplu olması,

• Çıkış geriliminin "0" ile "-∞" arasında olduğu

sayılabilir.

Bu çalışma modları ile ilgili eşdeğer devreler, şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19: Düşürücü yükseltici dönüştürücünün iletim ve kesim eşdeğer devreleri

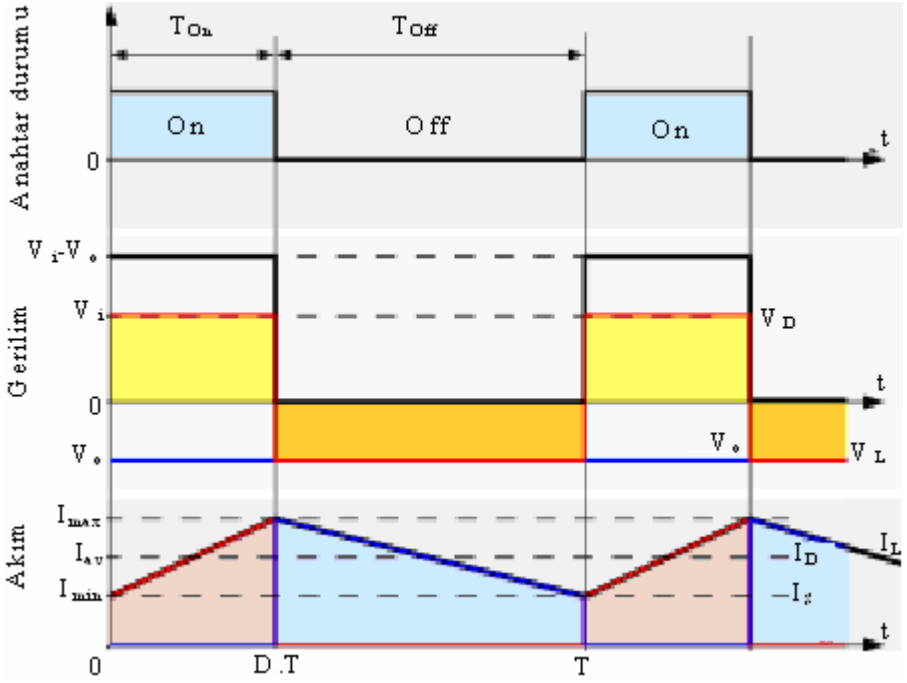
4. 2. 3. 1. Sürekli modda çalışma

Önceki dönüştürücülerde de olduğu gibi, anahtarlama periyodunu boyunca bobin akımı asla sıfır olmuyorsa, dönüştürücü sürekli modda çalışıyor denir. Bu modda çalışan ideal bir yükseltici düşürücü dönüştürücü devresi grafikleri şekil 4.20'de verilmiştir.

"S" anahtarı iletimde iken ($0 \le t \le DT$) bobin akımındaki değişim,

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \tag{4.20}$$

denklemi ile verilir. "D" önceden de belirtildiği gibi $(0 \le D \le 1)$ doluluk oranıdır.



Şekil 4.20: İdeal düşürücü yükseltici dönüştürücünün sürekli mod akım-gerilim grafikleri

"S" anahtarının kesimde olduğu sürede $(DT \le t \le T)$, bobin akımı yük üzerinden akar. Eğer diyodu ideal ve kondansatörü uçlarındaki gerilimi sabit tutabilecek kadar büyük varsayarsak, bobin akımı değişimini denklem (4.21) ile verebiliriz.

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \tag{4.21}$$

Dönüştürücü kararlı durumda çalıştığında, devre elemanlarının anahtarlama periyodunun başında ve sonunda aynı olması gerekir. Bobindeki enerji,

$$E = \frac{1}{2} L_L^2 \tag{4.22}$$

denklemi ile verilir.

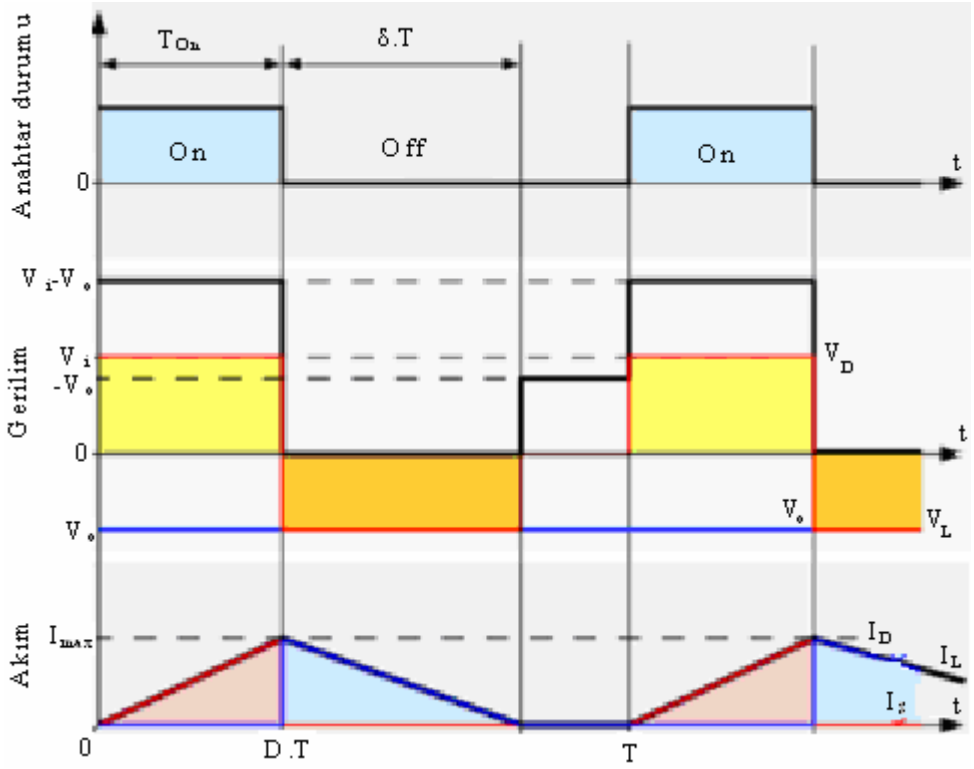
Kesim durumunun sonundaki bobin akımı ile iletim durumunun başındaki bobin akımının aynı, iletim ve kesim boyunca bobin akımındaki değişimin sıfır olması gerekir. Bu durumda dönüştürücünün akım-gerilim denklemlerinden yararlanarak giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki denklem (4.23) ile ifade edilir.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-D}{1-D} \tag{4.23}$$

Son denklemde, $0 \le D \le 0{,}5$ aralığında çıkış geriliminin doluluk oranına bağlı olarak giriş geriliminden daha düşük olduğu (düşürücü dönüştürücü) açıktır. Benzer şekilde, $0{,}5 \le D \le 1$ aralığında ise çıkış geriliminin giriş geriliminden daha büyük (yükseltici dönüştürücü) olduğu görülmektedir. Dolayısı ile, doluluk oranı değiştirilerek dönüştürücü, düşürücü veya yükseltici bir dönüştürücü (giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki kutup farkı hariç) olarak çalıştırılabilir.

4. 2. 3. 2. Süreksiz modda çalışma

Bazı durumlarda, yük için gerekli olan enerji, anahtarlama periyodu süresinden daha az bir sürede transfer imkanı verecek kadar küçük olabilir. Bu durumda periyodun bir bölümünde bobin akımı sıfır olur. Sürekli mod çalışma prensibinden tek farkı, anahtarlama periyodunun sonunda bobinin tamamen boşalmasıdır. Bu basit fark, çıkış gerilimi denklemi üzerinde önemli etki yapar Bu modda çalışan bir dönüştürücünün dalga grafikleri şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21: Bir yükseltici düşürücü dönüştürücünün süreksiz mod akım-gerilim grafikleri

Şekil 4.21 grafiklerinden ve akım-gerilim denklemlerinden yararlanarak yükseltici düşürücü dönüştürücünün süreksiz mod çalışmada giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki denklem (4.24) ile ifade edilir.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{V_i D^2 T}{2LI_o} \tag{4.24}$$

Sürekli çalışma modu ile kıyaslandığında, son ifadenin daha karmaşık olduğu görülmektedir. Dahası, sürekli olmayan modda çıkış gerilimi, sadece doluluk oranına değil aynı zamanda bobinin değerine, giriş gerilimine ve çıkış akımına da bağlıdır.

4. 2. 3. 3. Sürekli ve süreksiz mod arasındaki limit

Önceden de belirtildiği gibi, dönüştürücü yükü tarafından çekilen akımın değerine bağlı olarak dönüştürücü, süreksiz veya sürekli moddan birinde çalışabilir. İki mod arasındaki limit, anahtarlama periyodunun sonunda bobin akımının sıfıra düştüğü zamanda oluşur.

İki mod arasındaki limitte akım denklem (4.25) ile ifade edilir.

$$I_{o_{\lim}} = \frac{V_i DT}{2L}(1-D) \tag{4.25}$$

Aşağıda belirtilen üç notasyon üretelim:

• sürekli mod için,

$$|V_o| = \frac{-D}{1-D} \tag{4.26}$$

• süreksiz mod için,

$$|V_o| \frac{-D^2}{2|I_o|}, \tag{4.27}$$

• iki mod arasındaki limitteki akım için,

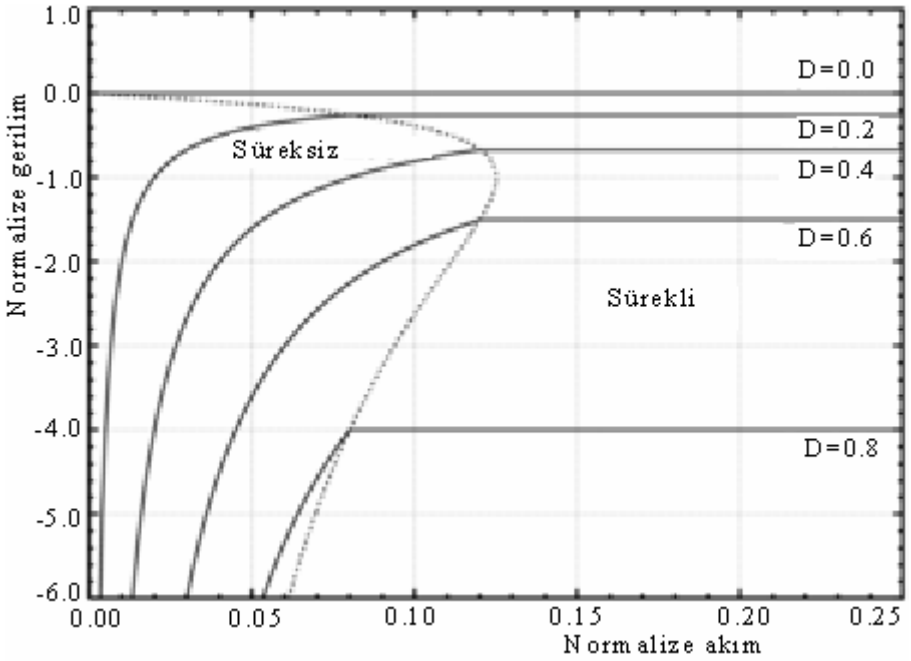
$$I_{o_{\lim}} = \frac{V_i DT}{2L}(1-D) = \frac{I_{o_{\lim}}}{2|I_o|} D(1-D), \tag{4.28}$$

denklemleri yazılabilir.

İki mod limitindeki akımın çizdiği eğri denklem (4.29) ile verilir.

$$\frac{1}{2|I_o|} D(1-D) = 1 \tag{4.29}$$

Bu denklemlerin çizimi, şekil 4.22'de verilmiştir.



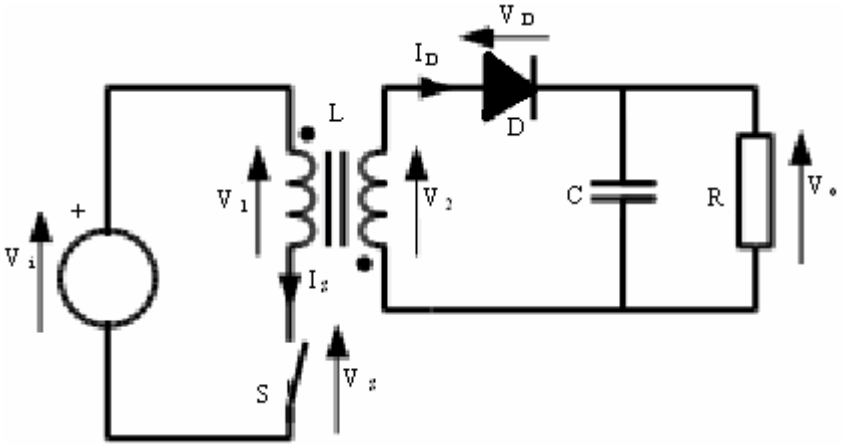
Şekil 4.22: Düşürücü yükseltici dönüştürücünün normalize akım-gerilim grafikleri

4. 2. 4. Geridönüşlü Dönüştürücü

Geridönüşlü dönüştürücü, girişi ile çıkışı arasında galvanik yalıtım olan bir DA/DA dönüştürücüdür. Geridönüşlü dönüştürücü, bobini bir trafo formunda çalışan bir düşürücü yükseltici devresidir. Yalıtıma ek olarak, gerilim değerinin ayarlanabilir olması da önemli bir avantajdır. Örneğin bir plazma lamba veya gerilim çoklayıcı sürüldüğü zaman, düşürücü yükseltici dönüştürücünün diyotu kaldırılır ve devre geridönüşlü trafo olarak adlandırılır. Kendine özgü bazı sınırlandırmalara bağlı olarak bu dönüştürücü 250W'a kadar olan düşük güçlerde kullanılır.

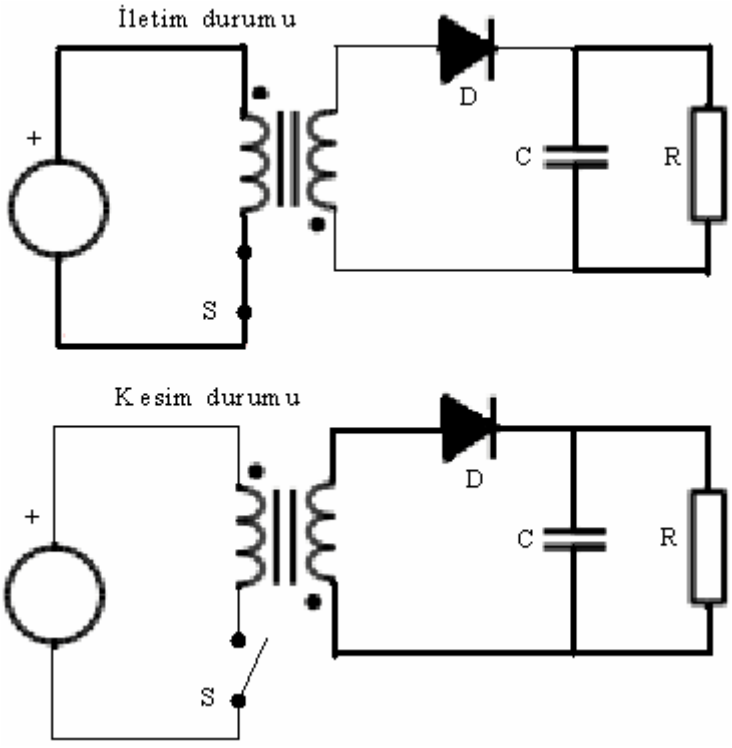
4. 2. 4. 1. Devre yapısı ve prensibi

Bir geridönüşlü dönüştürücünün şeması şekil 4.23'de verilmiştir. Bobinin bir trafo doluluki gördüğü bir düşürücü yükseltici dönüştürücüye eşittir. Bu nedenle her iki dönüştürücünün çalışma prensibi oldukça yakındır.



Şekil 4.23: Bir geridönüşlü dönüştürücünün devre şeması

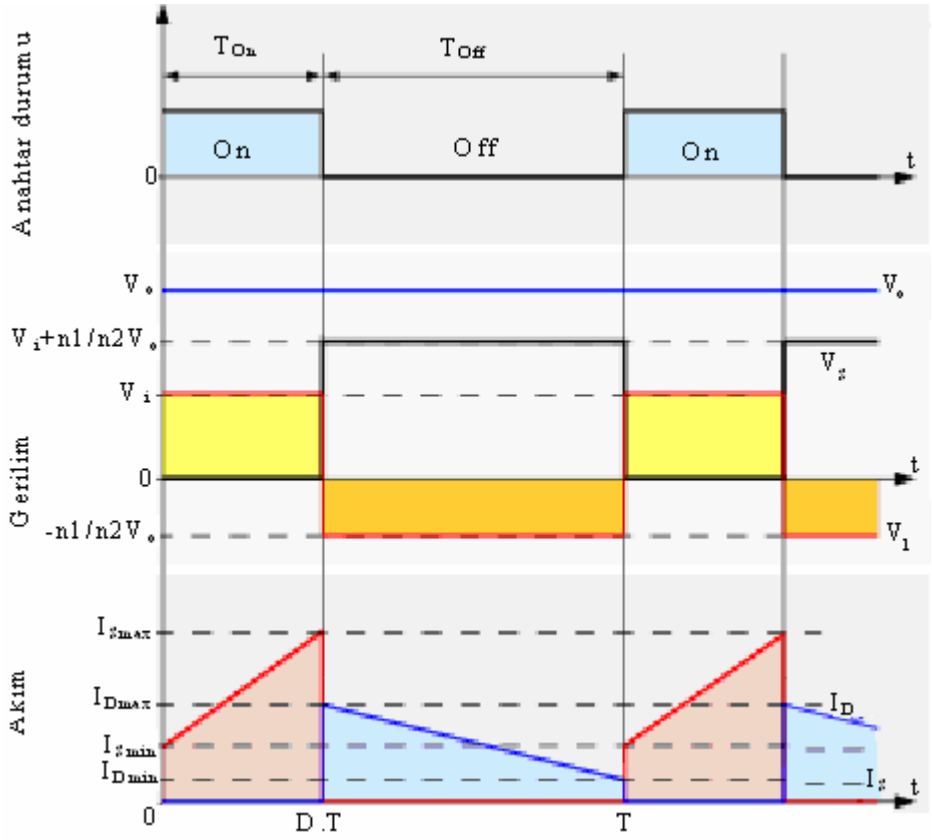
Şekil 4.24'de görüldüğü gibi, anahtar iletimde iken trafonun birincil tarafı doğrudan giriş gerilimine bağlıdır. Bu, trafoda bir manyetik akı (flux) artışına neden olur. Trafonun ikincil tarafındaki gerilim negatif olduğundan diyot ters kutuplanmıştır. Çıkış kondansatörü, çıkış yüküne güç sağlamaktadır. Anahtar kesimde iken, trafoda biriken enerji, dönüştürücüye aktarılır.



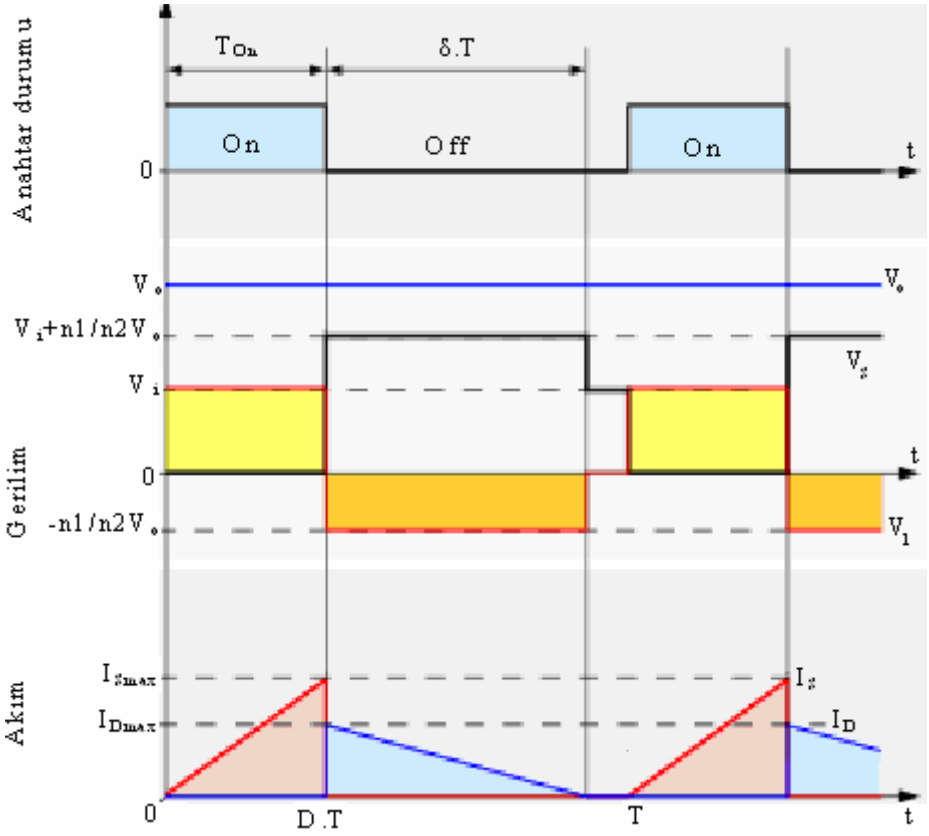
Şekil 4.24: Bir geridönüşlü dönüştürücünün iletim ve kesimdeki eşdeğer devreleri

4. 2. 4. 2. Çalışması

Geridönüşlü dönüştürücü, yalıtımlı bir dönüştürücü olduğundan, kontrol devresi yalıtımına da gereksinim duyar. Çıkış gerilimini kontrol etmek için, onunla bağlantılı uygun bir gerilime de ihtiyaç vardır. Bir birincil yan geri besleme DCM operasyonu için kullanılabilir (bu durumda çıkış gerilimi, trafonun reset zamanı ve iletim zamanı ile orantılıdır). Bu gerilim, ayrı bir sarımdan elde edilebilir. Genellikle, CCM çalışması için, ikincil taraf gerilimi, yalıtımı sürdürmek için denetleyici ile optokuplör arasındaki sinyalizasyonu sağlayan bir sinyale duyarlıdır ve onunla kıyaslanır. Şekil 4.25 ve 4.26'da sırasıyla, bir geridönüşlü dönüştürücünün sürekli modda ve süreksiz modda çalışma akımı ve çalışma gerilimi değişimleri verilmiştir.



Şekil 4.25: Bir geridönüşlü dönüştürücünün sürekli mod akım-gerilim dalga formları



Şekil 4.26: Bir geridönüşlü dönüştürücünün süreksiz mod akım-gerilim dalga formları

4. 2. 4. 3. Sınırlandırmalar

Bir düşürücü yükselticide olduğu gibi, birincil taraftaki anahtar, birincil tarafa uygulanan gerilimden daha yüksek gerilimlere dayanabilmelidir. Dayanma geriliminin değeri, denklem (4.30) ile verilir.

$$V_p + V_p\left(\frac{N_1 D}{N_2(1-D)}\right) \tag{4.30}$$

Burada:

V_p; birincil tarafa uygulanan gerilimi,

N_1; birincil tarafın sarım sayısını,

N_2; ikincil tarafın sarım sayısını,

D; anahtarın doluluk oranını

ifade eder.

Düşürücü yükseltici dönüştürücü ve trafonun aksine kaçak akı bobini, ikincil taraf gerilimi artışı olmadan, bu gerilimlerin artışına tek başına neden olur. İt çek dönüştürücünün aksine hava aralıklı bir çekirdeğe gereksinim duyulur.

4. 2. 4. 4. Uygulama alanları

Bu tip dönüştürücülerin yaygın kullanım alanlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır:

• Düşük güç anahtarlama mod güç kaynakları (telefon pili, doldurucu, pesonel bilgisayarlarda yedek güç kaynağı, 250W tan küçük PC' ler için ana güç kaynağı).
• Televizyon ve monitörlerdeki ekranlara yüksek gerilim kaynağı
• Yüksek gerilim üretimi (örneğin Xenon flaş lambalar, lazerler v.b. için).
• Kıvılcımlı ateşleme motorlarının ateşleme sistemlerinde
• Yalıtımlı kapı sürücüsü

Hangi tip dönüştürücü kullanılırsa kullanılsın, giriş gerilimine bağlı olarak gerekli olan çıkış gerilimini (dolayısı ile çıkış gücünü) elde edebilmek için doluluk oranını değiştirebilen bir denetleme mekanizması mutlaka kullanılmalıdır. Buradaki amaç akım, gerilim ve güç denetimi sağlayarak, giriş gücünü maksimum oranda çıkışa aktarabilmektir. Bu amaçla kullanılan devrelere, maksimum güç noktası izleme denetçisi (MGNİ) denir. Güç denetiminin çok önemli bir elemanıdır ve ayrı bir bölümde incelenecektir. Geridönüşlü dönüştürücü 6. bölümde detaylı inceleneceğinden burada sadece temel prensipler üzerinde durulmuştur.

4. 3. Eviriciler

Bir önceki ayrıtta, güneş panellerinden elde edilen ve doğası gereği DA formunda olan enerjinin mümkün olan en yüksek verimle yük veya alıcılara aktarılması için DA/DA dönüştürücünün kullanılmasının gerekliliği belirlenmiş ve bu amaçla kullanılan temel güç elektroniği devreleri incelenmişti. Güneş enerjisinin kullanımında bazı hallerde, güneş panellerinden doğrudan veya bir DA/DA dönüştürücü üzerinden alınan enerjinin alternatif akım kullanan alıcılara aktarılması veya mevcut AA şebekeye paralel çalışması gerekebilir. Bu durumda DA formundaki enerjinin AA formuna dönüştürülmesi ihtiyacı ortaya çıkar. Bu amaçla

geliştirilen güç elektroniği düzenekleri, genel olarak evirici veya inverter olarak adlandırılırlar.

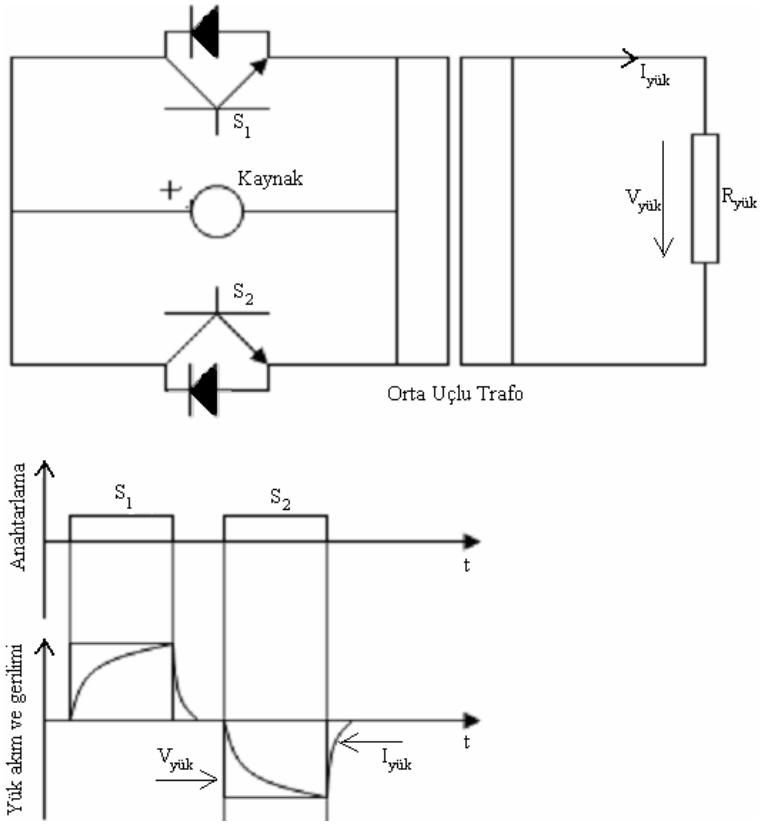
Evirici düzenekleri, devre topolojileri ve kullanım amaçlarına uygun olarak çok farklı şekillerde tasarlanmaktadır. Eviricilerin genel olarak sınıflandırılması ve incelenmesi bu tez çalışmasının kapsamını aşan bir karmaşıklıktadır. Bu ayrıtta, özellikle güneş enerjisi sistemlerinde yaygın olarak kullanılan evirici sistemlerinin temel prensipleri ve özellikleri incelenecektir. Burada incelenen evirici yapıları çıkış dalga şekli açısından, doğrudan veya bir transformatör üzerinden sabit gerilim ve frekanslı bir alternatif gerilim oluşturmaya yönelik düzeneklerdir.

Bu belirleme ışığında eviriciler devre yapısı ve çalışma şekli açısından;
• Orta uçlu transformatörlü eviriciler,
• Sabit gerilim beslemeli Yarı veya Tam Köprü eviriciler
Denetim ve dalga şekli açısından;
• Kare dalga,
• Düzeltilmiş Kare dalga,
• DGM (Darbe genişlik modülasyonu),
• Çok seviyeli çıkışlı eviriciler.
Anahtarlama şekli açısından;
• Rezonans eviriciler,
•Sıfır gerilim ve akım anahtarlamalı tipler,
• Çıkışı modüle edilmiş ve ilave anahtarlarla DA/AA dönüşümü yapabilen dönüştürücüler.
sayılabilir.
Literatürdeki evirici düzenleri incelendiğinde, kullanılan anahtar sayısı ve devre karmaşıklığı, verim, çıkış dalga şeklinin harmonik içeriği, güvenirlik ve maliyet gibi farklı unsurların farklı tiplerin karşılaştırılması açısından ön plana çıktığı söylenebilir [24-26].

En basit evirici yapısı bir orta uçlu transformatör ve iki güç anahtarı ile tasarlanabilir. Bu evirici yapısı özellikle düşük güçlü ve dalga şekline duyarlı olmayan yükler için kesintisiz güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.27'de bu temel yapı

gösterilmiştir. Çalışma prensibi bu devrede S_1 ve S_2 güç anahtarları istenilen frekansta uygun olarak devreye alınarak, transformatörün primerinde bir alternatif gerilim oluşturulur. Genel olarak yükseltici bir transformatör kullanıldığından, çıkış gerilimi istenilen değerde bir alternatif gerilim olacaktır.

Bu temel devre yapısının en önemli özelliği, yapısının ve denetiminin basitliğidir. Gerilimin yüke bağlı değişiminin önlenmesi için anahtarların alternatif akımın her bir alternansındaki iletimde kalma süreleri ayarlanabilir. Çıkış gerilimi doğal şekli ile periyodik bir kare dalgadır. Gerektiği hallerde çıkış uygun bir süzgeç devresi yardımı ile sinüs formuna yaklaştırılabilir. Bazı uygulamalarda, anahtarlar daha sonra incelenecek darbe genişlik modülasyonu yöntemi ile denetlenerek çıkış gerilimi daha kolay filtrelenebilecek bir şekilde de oluşturulabilir. Kullanılan transformatör, şebeke frekansında çalışan, lamine sac nüveli bir transformatördür ve çıkış gücü ile orantılı boyut ve ağırlıktadır.

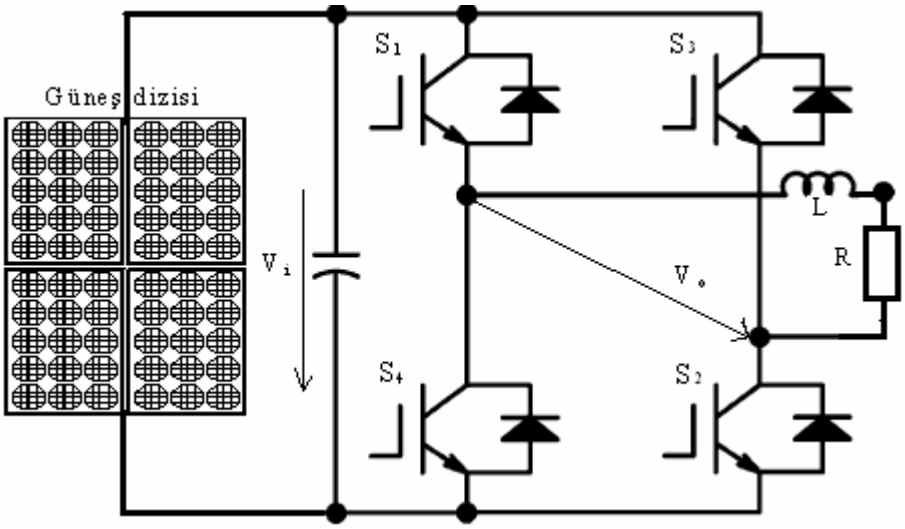


Şekil 4.27: En temel evirici yapısı

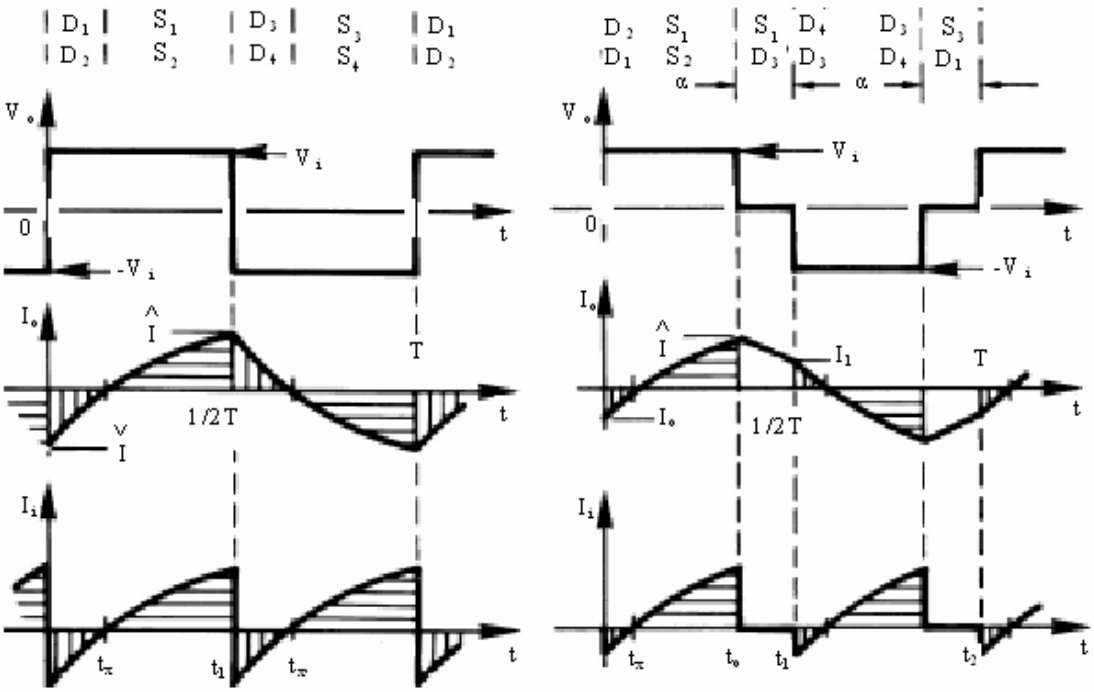
4. 3. 1. Tek fazlı köprü evirici

4. 3. 1. 1. Köprü kare dalga ve üç seviyeli kare dalga çalışma

En temel evirici yapısı, 4 adet güç anahtarı ile tasarlanmış köprü eviricidir. Güç anahtarı olarak IGBT veya MOSFET'ler kullanılır. Yükün genel olarak R_L tipi olduğu varsayılırsa, gerilim yön değişimlerinde, bobinde birikmiş enerjinin kaynağa (veya kondansatöre) akışını sağlamak üzere anahtarlara ters olarak serbest geçiş diyotları da kullanılır. MOSFET ve IGBT anahtarlarda bu diyotlar tümleşik olarak bulunmaktadır. Devrenin prensip bağlantısı şekil 4.28'de ve R_L yük durumu için gerilim-akım dalga şekilleri şekil 4.29'da gösterilmiştir. Anahtarların devreye alınma mantığına göre, aynı devre yapısı ile kare dalga ve üç seviyeli kare dalga çıkışı elde edilebilir. Üç seviyeli kare dalga şekli ticari eviricilerde "düzeltilmiş sinüs (modified sine wave)"olarak da adlandırılmaktadır. İstenilen çıkış frekansına uygun olarak çapraz anahtarlar (S_1_S_2 ve S_3_ S_4) birlikte ve periyodik olarak iletime sürülürler. Üç seviyeli kare dalga için, S_1_S_2 iletimini izleyen anahtarlama evresinde S_2 kesime sokularak, çıkışta "0" gerilim oluşması sağlanır. "0" gerilim süresi değiştirilerek, gerilimin yüke bağlı değişimi de (gerilim regülasyonu) önlenebilir.



Şekil 4.28: Köprü evirici devresi (güneş paneli ve tampon kondansatör)



a **b**

Şekil 4.29: Köprü evirici devresi çıkışları: a) iki seviyeli çıkış, b) üç seviyeli çıkış

Yük akımı üstel ve periyodik bir değişim gösterir. Yük'ün güç faktörü, R_L elemanlarının değerine bağlıdır. Çıkış gerilimi periyodik ve sinüzoidal olmayan bir dalga şekline sahip olduğundan denklem (4.31)'deki gibi bir Fourier serisi ile ifade edilebilir.

$$V_{çıkı} = \frac{4}{\pi} V_{giriş} \sum_{n=1,3,5..}^{\infty} \frac{1}{n} \sin n\omega t \tag{4.31}$$

temel bileşen denklem (4.32) ile verilir.

$$V_1 = \frac{4}{\pi} V_{giriş} \sin \omega t \tag{4.32}$$

Benzer şekilde diğer harmonik bileşenler de ayrı ayrı ifade edilebilir. Örneğin üçüncü bileşen için denklem (4.33) yazılabilir.

$$V_3 = \frac{4}{3\pi} V_{giriş} \sin 3\omega t \tag{4.33}$$

Temel bileşenin etkin (RMS) değeri denklem (4.34) ile verilir.

$$V_{1_{etkin}} = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} V_{giriş} \cong 0{,}90 V_{giriş} \tag{4.34}$$

Üç seviyeli kare dalga şekli için , "0" da kalma açısı (α)'nın değerine bağlı olarak çıkış geriliminin etkin değeri ayarlanabilir. Bu durumda çıkış geriliminin etkin değeri, denklem (4.35) ile verilir.

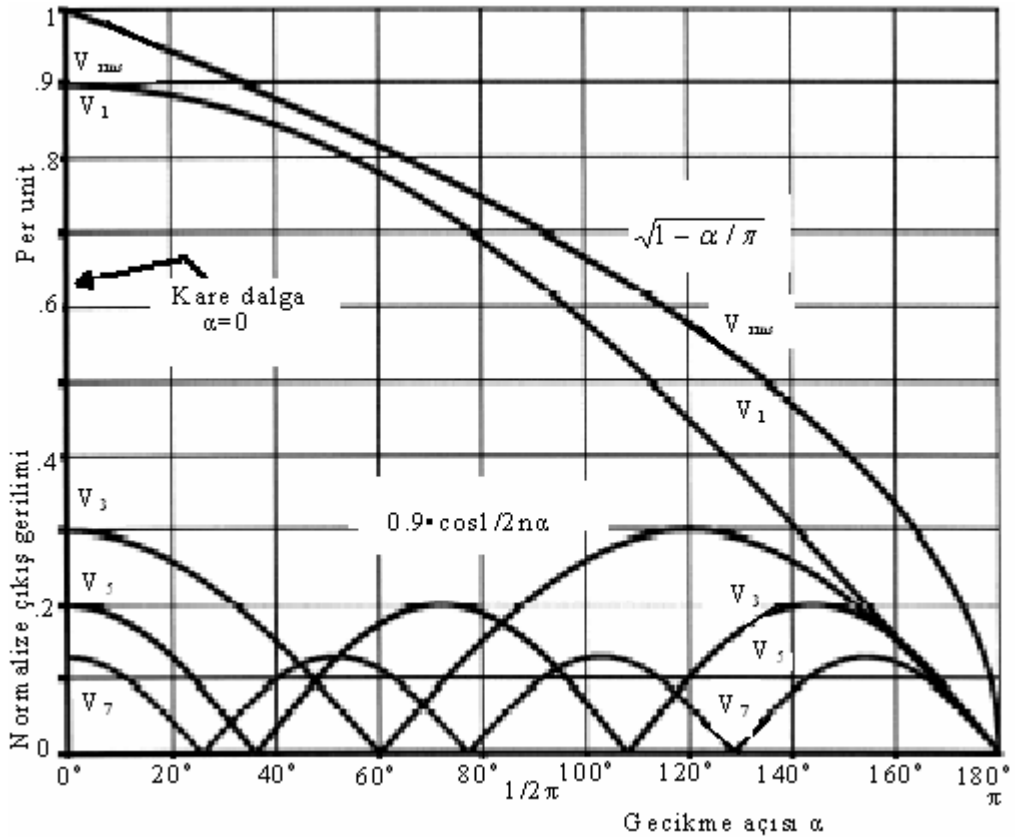
$$V_{çıkı_{etkin}}(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi-\alpha} V_{çıkı}^2 d(\omega t)} = \sqrt{1-\frac{\alpha}{\pi}} V_{giriş} \tag{4.35}$$

Yük değişimlerinde "α" değeri uygun bir şekilde ayarlanarak çıkış geriliminin etkin değeri sabit tutulabilir. Üç seviyeli kare dalganın harmonik analizi yapıldığında, α'ya bağlı olarak gerek temel bileşenin, gerekse harmoniklerin genliklerinin değiştiği görülür. Belirli bir α değeri için bazı harmonik bileşenin yok edilmesi mümkündür. α = π/n koşulunu sağlayan "α" değeri için "n" ile gösterilen harmonik bileşeni "0" yapılabilir. Örneğin α = 60^o için 3. harmonik bileşeni yok edilebilir.

Üç seviyeli kare dalga her hangi bir α değerindeki çıkış geriliminin temel bileşeninin etkin değeri, denklem (4.36) ile verilir.

$$V_{çıkı\,1_{etkin}}(\alpha) = 0{,}90 V_{giriş} \cos\frac{\alpha}{2} \tag{4.36}$$

Çıkış gerilimi ve harmoniklerin α' ya bağlı değişimi şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. Çıkış gerilimi ve harmoniklerin α ile değişimi

Bazı basit uygulamalarda, 4 anahtar yerine 2 anahtar kullanılarak tasarlanmış yarı köprü eviriciler kullanılabilir. Kaynak olarak iki eş ve seri bağlı kaynak kullanılabileceği gibi, bir kaynak ve kapasitif gerilim bölücü ile orta uçlu simetrik bir kaynak oluşturulabilir. Anahtar sayısında bir avantaj sağlamakla beraber, yarı köprü eviricide kaynak geriliminin yarısından faydalanılabilir. Dalga şekli açısından tam köprü eviriciden bir farkı yoktur

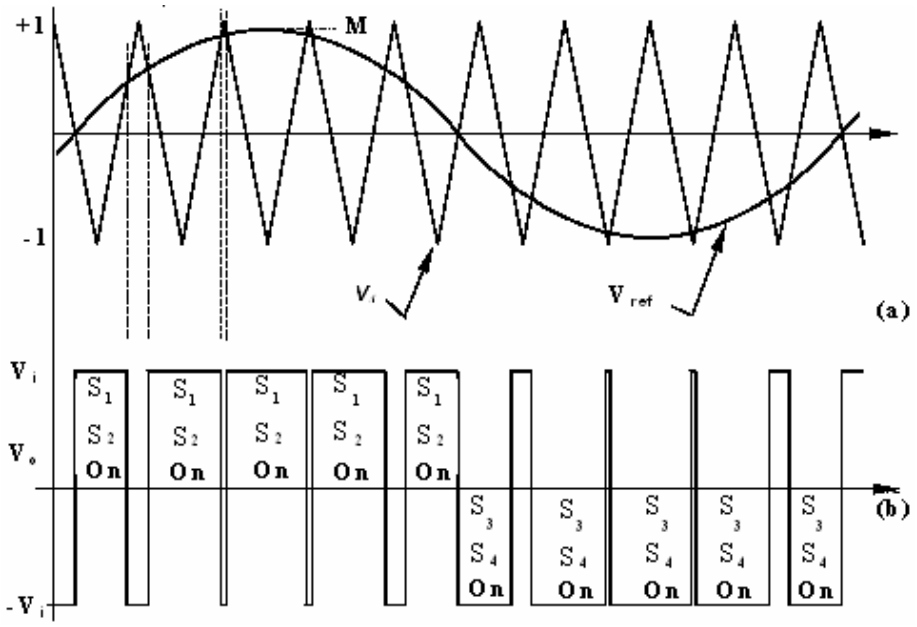
4. 3. 1. 2. Darbe genişlik modülasyonlu (DGM) çalışma durumu

Yukarıda tam kare dalga ve üç seviyeli kare dalga çalışma şekli incelenen köprü evirici yapısı ile, daha farklı anahtarlama mantıkları kullanılarak, darbe genişlik modülasyonu ile, daha kolay filtre edilebilen çıkış gerilimlerinin elde edilmesi mümkündür.

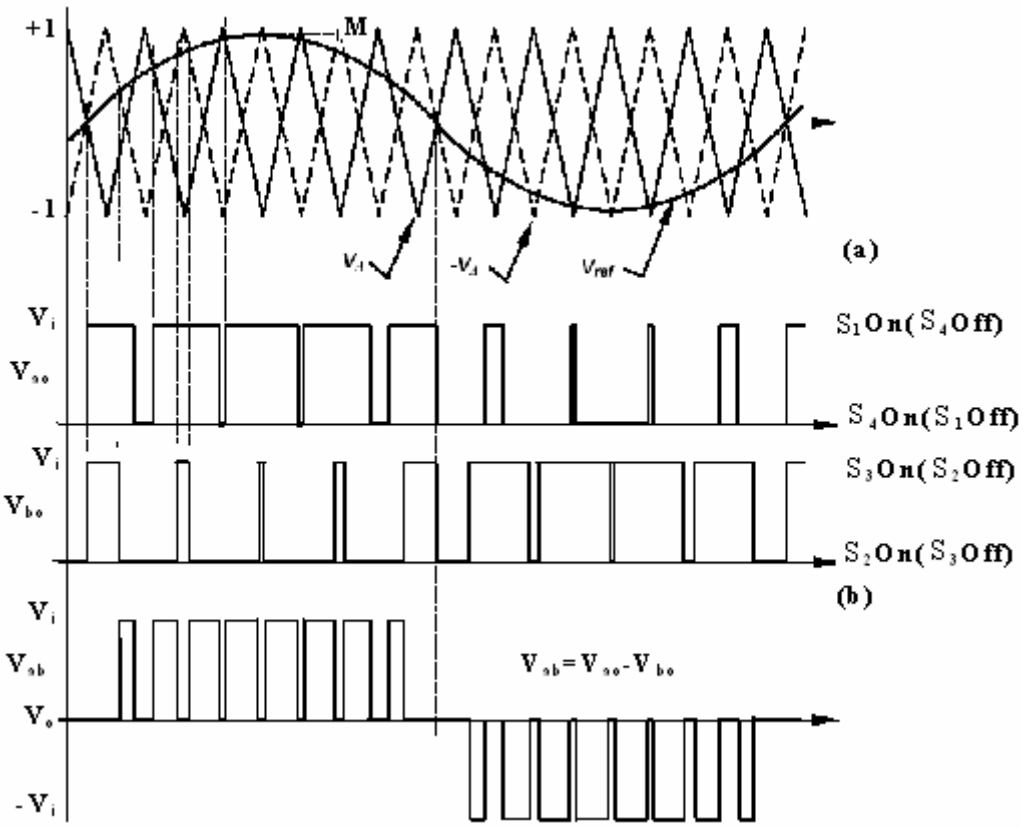
Pratikte, darbe genişliğinin sinüzoidal bir işarete göre modüle edilen bir darbe dizisi elde etmek için en sık kullanılan yöntem sinüs-üçgen karşılaştırma yöntemidir.

Bu yöntemde yüksek frekanslı bir üçgen dalga, istenilen genlik ve frekanstaki referans sinüs dalgası ile sürekli olarak karşılaştırılır. İki işaretin anlık değerlerinin birbirlerinden büyük veya küçük olmalarına göre anahtarlama yapılır. Yük uçlarında $+V_{giriş}$ ve $-V_{giriş}$'in oluştuğu iki seviyeli DGM veya $+V_{giriş}$, 0, $-V_{giriş}$'in oluştuğu üç seviyeli DGM çıkışları elde edilebilir. Şekil 4.31'de İki seviyeli DGM'ye ilişkin dalga şekilleri, taşıyıcı üçgen dalga ve referans sinüs dalgası gösterilmiştir. Anlık değer olarak sinüs dalgasının büyük olduğu sürelerde S_1_S_4 iletime sürülmüş, küçük olduğu sürelerde ise S_2_S_3 iletime sürülmüştür. Sinüsün + alternastaki anlık değeri büyüdükçe $+V_{giriş}$ darbe süreleri uzamakta, - alternastaki anlık değeri büyüdükçe $-V_{giriş}$ darbe süreleri uzamaktadır.

Üç seviyeli DGM çıkışı elde etmek için 180^o faz farklı (birbirine simetrik) iki taşıyıcı dalga kullanılır. Referans sinüs $+V_\Delta$'dan büyükse S_1, küçükse S_3 iletime sürülür. S_1 iletimde iken $V_{ao} = V_{giriş}$, S_3 iletimde iken $V_{ao} = 0$ olur. Diğer taraftan referans sinüs $-V_\Delta$'dan küçükse S_2, büyükse S_4 iletime sürülür. S_2 iletimde iken $V_{bo} = V_{giriş}$, S_4 iletimde iken $V_{bo} = 0$ olur. V_{a_b} gerilimi V_{ao}-V_{bo} olacağından sonuçta üç seviyeli DGM dalga şekli elde edilir. Bu grafikler şekil 3.32' de verilmiştir.



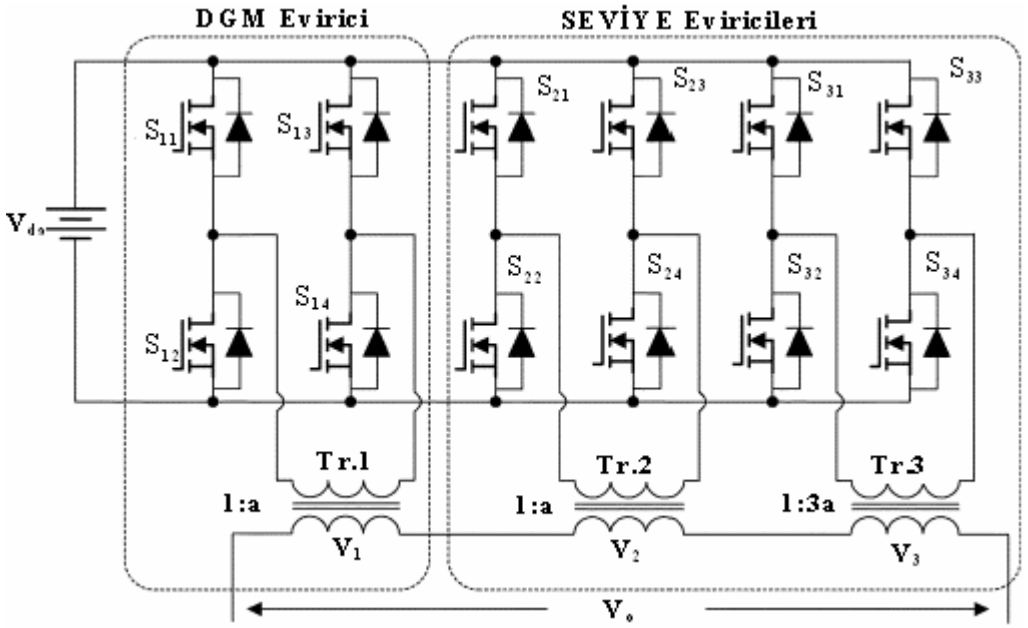
Şekil 4.31: İki seviyeli DGM çalışma modu dalga formları



Şekil 4.32: Üç seviyeli DGM çalışma modu dalga formları

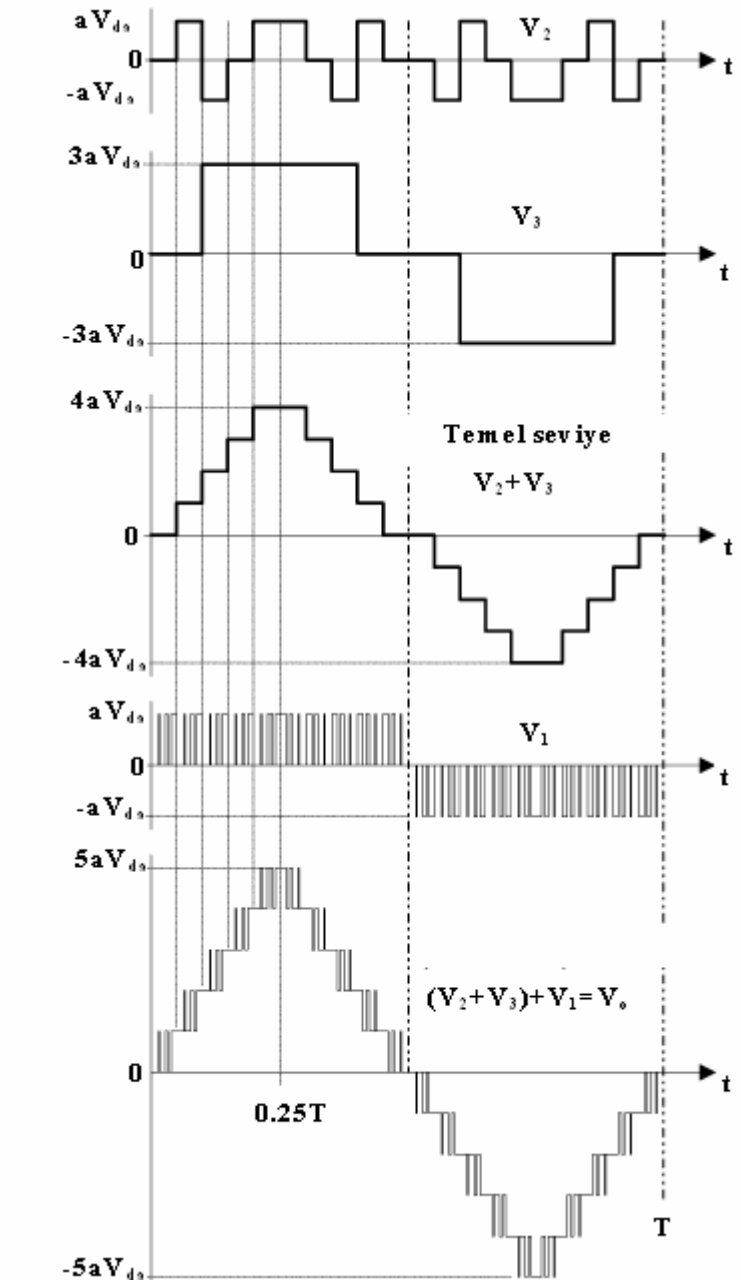
4. 3. 1. 3. Çok seviyeli eviriciler

Yukarıda incelenen eviricilere ek olarak, çıkış gerilimi 3'ten daha fazla seviyeden oluşan çok seviyeli eviriciler de tasarlanmıştır. Bu eviricilerde 5, 7, 9, 11 gibi çok basamaklı çıkış gerilimleri elde edilir. Çok seviyeli eviriciler genel olarak diyod kilitlemeli ve kondansatör kilitlemeli şekillerde tasarlanabileceği gibi, birden fazla tam köprü eviricinin kaskad bağlanması ile de tasarlanabilir. Çok seviyeli eviricilere ticari olarak "tam sinüs evirici" adı da verilmektedir. En yaygın kullanılan tipler 11 veya daha yüksek seviyeli kaskad eviricilerdir. Şekil 4.33'de 11 seviyeli bir eviricinin prensip bağlantı şekli ve şekil 4.34'de tipik dalga şekilleri gösterilmiştir [27].



Şekil 4.33: 11 seviyeli bir eviricinin prensip bağlantı şeması

Şekilden görüldüğü gibi üç adet köprü evirici kullanılmıştır. Bu köprülerden bir tanesi, Çalışması daha önce açıklanan DGM yöntemi ile denetlenerek çıkış geriliminin yüke bağlı değişimlerini gidermek amacı ile kullanılmıştır. 11 seviyeli geriliminin elde edilmesi için, dönüştürme oranları 1:a ve 1:3a olan iki adet transformatör kullanılmıştır. Çıkış geriliminin 0, $a.V_{da}$, $2aV_{da}$, $3aV_{da}$, $4aV_{da}$, $5aV_{da}$ gibi kademelerde olmasını sağlamak için uygun anahtarlama sırası izlenerek gerekli anahtarlar devreye alınır. Örneğin aV_{da} için 1. seviye eviricinin S_{21} ve S_{24} anahtarları iletime sürülür. $2aV_{da}$ seviyesi $3aV_{da}$-aV_{da} ile elde edilebileceğinden 2. seviye eviricisindeki S_{31} ve S_{34} anahtarları ve 1. seviye eviricisindeki S_{23} ve S_{22} anahtarları İletime sürülür. Bu şekilde istenilen seviyeler elde edilir. Bu yöntemle, çıkış gerilimi sinüs formuna oldukça yakın eviriciler tasarlanabilmektedir.



Şekil 4.34: 11 seviyeli eviricinin tipik dalga şekilleri

4. 4. Şebekeye Paralel Çalışan Sistemler

Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülüp kullanılmasında üç temel yaklaşım söz konusudur. Bunlardan birincisi panelin yükü beslemesi, ikincisi bir akü sistemini beslemesi ve üçüncüsü de mevcut şebekeye paralel çalışarak üretilen enerjinin şebekeye aktarılmasıdır.

Önceki ayrıtlarda, güneş panelinin yük ile uyumunun sağlanması ve maksimum güç transferinin sağlanabilmesi için bir DA/DA dönüştürücüye ihtiyaç duyduğu vurgulanmış ve panelden elde edilen da formundaki elektrik enerjisinin eviriciler yardımı ile alternatif akıma dönüştürülmesine ilişkin temel devre yapıları incelenmişti.

Yükün panel tarafından beslenmesinde, yük tipine bağlı olarak farklı dönüştürücü ve/veya evirici kombinasyonlarına gereksinim duyulur. Daha önce de vurgulandığı gibi hiçbir güç elektroniği devresi olmadan panelin doğrudan yüke bağlanması pratik olarak karşılaşılabilecek bir uygulama değildir. Dolayısıyla bu anlamdaki en basit sistem; panel, DA/DA dönüştürücü ve yükten oluşmaktadır. Yükün değeri ve değişim aralığına bağlı olarak, DA/DA dönüştürücü yükseltici, düşürücü veya düşürücü yükseltici tipte olur.

Yük alternatif akım formunda enerji talep eden bir yapıda ise yukarıdaki sistem; panel, DA/DA dönüştürücü, evirici ve yük şeklinde oluşturulur. Bazı uygulamalarda gerilim seviyesi alternatif akıma dönüşümden sonra da yapılabilir. Bu durumda DA/DA dönüştürücünün yerine bir transformatör de kullanılabilir. Pratikteki uygulamalar incelendiğinde bu amaçla geliştirilmiş pek çok devre ve sistem farklılıkları göze çarpmaktadır.

Akü şarjı, özellikle şebeke enerjisinin bulunmadığı bölgelerdeki uygulamalarda, enerjinin sürekliliğinin sağlanması için kaçınılmaz bir gereksinimdir. Bu uygulamalara en tipik örnek olarak haberleşme sistemlerindeki anten ve aktarma merkezleri gösterilebilir. Akü şarjı için akü seviyesi ve panel çıkışının uyumunu sağlayacak (maksimum güç transferi sağlayacak) düşürücü veya yükseltici tip da/da dönüştürücüler kullanılır. Genelde akülerde depo edilen da formundaki elektrik enerjisinin tekrar evirici üzerinden alternatif akıma dönüştürülmesi gereklidir.

Elektrik enerjisinin mevcut olduğu merkezlerde, güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi şebekeye paralel bağlama yolu ile doğrudan şebekeye aktarılır. Bu tip sistemlerde akü kullanılmasına gerek olmadığından, akü maliyeti, bakım gereksinimi ve şarj-deşarj sırasındaki enerji kayıplarının yarattığı olumsuzluklar

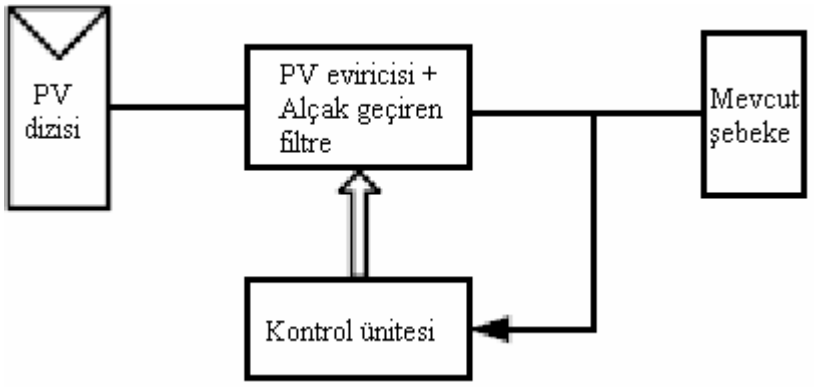
ortadan kalkmış olur. Şebekeye paralel çalışan sistemler küçük ve orta güçlerde elektrik enerjisi tüketiminin kısmen karşılanmasına yönelik olarak kullanılabileceği gibi, daha büyük güçlerde bölgesel enerji ihtiyaçlarının karşılanması amacı ile enterkonnekte sistemi takviye edici şekilde de kullanılabilir.

Yukarıda sözü edilen tüm sistemlerde güneş panellerinin her ışınım ve yük koşulunda maksimum güç noktasına olabildiğince yakın çalışması ve ışınım, sıcaklık ve yük değişimlerinde değişen çalışma noktalarının bir denetim düzeneği ile maksimum güç noktasına getirilmesi gerekmektedir. Maksimum güç izlemenin önemi ve bu amaçla kullanılabilecek yöntemlerin çeşitliliği nedeni ile, bu konu bir sonraki bölümde detaylı olarak incelenecektir.

Şebekeye paralel çalışan sistemlerle ilgili pek çok uygulama bulunmaktadır [28-36]. Şebekeye paralel çalışan güneş enerjisi sistemleri için literatürde farklı yaklaşımlar ve çözümler önerilmiştir. Bunlardan bazıları yaygın bir şekilde uygulamada da kullanılmaktadır. Aşağıda şebekeye paralel çalışan sistemlerden bazıları prensipleri açısından incelenmiştir.

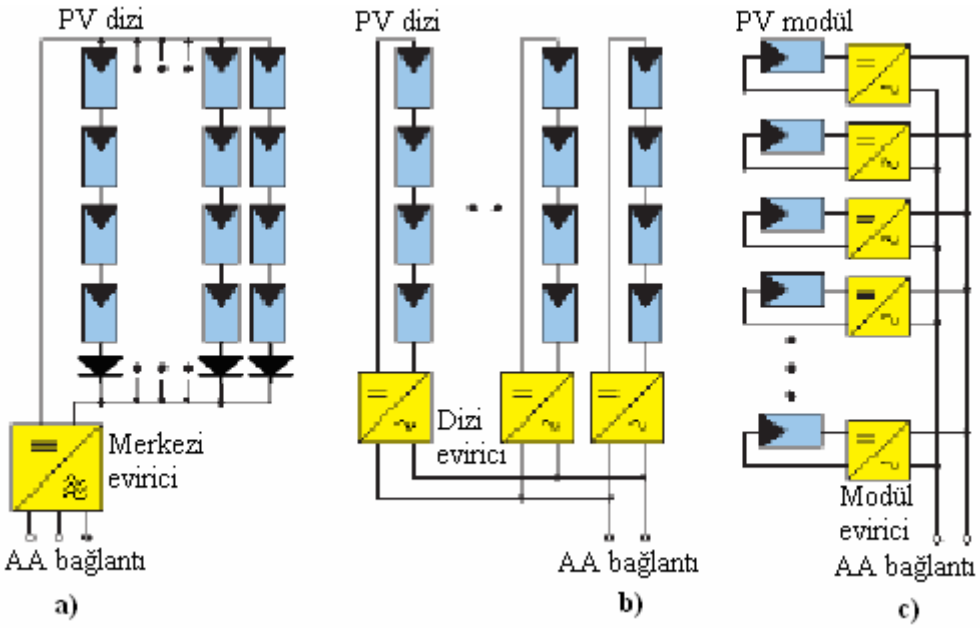
4. 4. 1. Şebekeye paralel çalışan tek faz PV eviricili sistemler.

Şebekeye paralel bağlı tek faz fotovoltaik (PV) sistemin genel blok şeması şekil 4.35'de verilmiştir. Sistem PV dizisini, PV eviricisini, denetleyiciyi ve şebekeyi içermektedir.



Şekil 4.35: Şebekeye bağlı tek faz PV sistemlerin genel blok şeması

PV dizisi; tek bir panel, bir dizi PV paneli veya bir çoklu paralel dizi panelinden oluşabilir. Şekil 4.36 (a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi merkezileştirilmiş veya merkezileştirilmemiş PV sistemleri kullanılabilir.



Şekil 4.36: Sırası ile; a) merkezi eviricili sistem, b) dizi eviricili sistem, c) modül ile tümleşik eviricili sistem

4. 4. 1. 1. Merkezi eviricili sistem

Bu topolojide PV devresi (>10 kW), şekil 4.36 (a)'da görüldüğü gibi merkezi bir eviriciye DA olarak bağlı birçok paralel sıra ile düzenlenir. Bu eviriciler yüksek verimlilik ve en düşük maliyet amaçlanarak tasarlanırlar. Bununla beraber, PV devresinden sağlanan enerji panellerin uyumsuzluğu veya kısmi gölgelenme koşullarına bağlı olarak azalabilir. Ayrıca devrenin güvenirliği, tek bir devre elemanı üzerinden enerji üretmeye bağlı olarak sınırlandırılmıştır. Merkezi eviricideki bir arıza tüm sistemi devre dışı bırakır.

4. 4. 1. 2. Dizi eviricili sistem

Şekil 4.36 (b)'de görüldüğü gibi merkezi eviricili sisteme benzerdir. Burada PV devresi birçok paralel diziye bölünmüştür. Her bir PV dizisine dizi eviricisi diye

adlandırılan bir evirici bağlanmıştır. Her bir dizinin ayrı MGNİ imkanı vardır. Bu, uyumsuzluk ve kısmi gölgelenme kayıplarını azaltarak sağlanan enerjiyi arttırır. Bu üstün teknik karakteristikler sistem maliyetinde azalma, sağlanan enerjide artış ve enerji güvenirliğinde iyileşmeye neden olurlar. Dizi eviricileri şebekeye bağlı PV devreleri için standart olarak geliştirilmişlerdir.

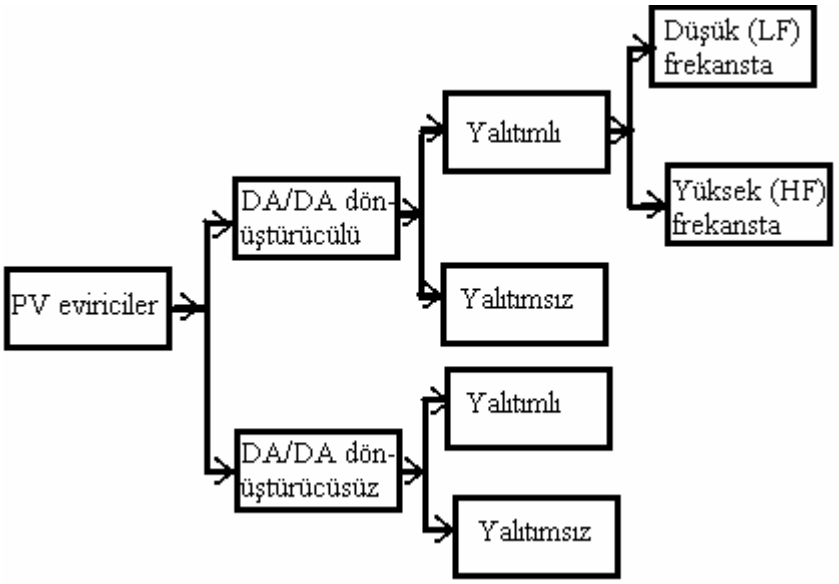
Yüksek güçlere uygulanabilir bir dizi evirici teknolojisi evrimi çoklu-dizi eviricidir [28]. Bu, ayrı MGNİ sistemleri olan modül dizilerinin DA/DA dönüştürücü üzerinden ortak bir eviriciye bağlanmasına izin verir. Buradan, merkezi ve dizi teknolojilerinin avantajları birleştirilerek küçük hacimli ve ekonomik bir çözüm başarılmıştır. Bu çoklu-dizi topolojisi, farklı teknolojilerin PV dizilerinin ve farklı oryantasyonlarının (güney, batı ve doğu cephelerine yerleştirme) entegrasyonuna izin verir. Çoklu dizi eviricilerin uygulama alanı 3-10 kW'lık PV devrelerini kapsar.

4. 4. 1. 3. Modül ile tümleşik eviricili sistem

Şekil 4.36 (c)'de görüldüğü bu sistemde her bir modüle tümleştirilmiş ayrı bir evirici kullanılır. Her bir modül kendi MGN izleyicisine sahip olduğundan bu topoloji, eviricilerin PV karakteristiklerine uyumunu optimize eder. Enerji verimini optimize etmesine rağmen, modüle tümleştirilmiş evirici dizi eviricisinden daha düşük bir verime sahiptir. PV devresinin her bir modülü mevcut şebekeye bağlanmak zorunda olduğundan, modüle tümleşik eviriciler AA kablolama genişletimi ile karakterize edilirler. Aynı zamanda bakım işlemleri (özellikle cephe montajlı PV sistemlerde) oldukça karmaşıktır. Bu yaklaşım 50-400 W tepe değerli PV devrelerine uygulanabilir.

4. 4. 2. PV eviricileri

Son yıllarda PV teknolojisinde oldukça önemli ilerlemeler kaydedildi. Şekil 3.37 de gösterildiği gibi farklı güç düzenlemeleri hala mümkündür [29].



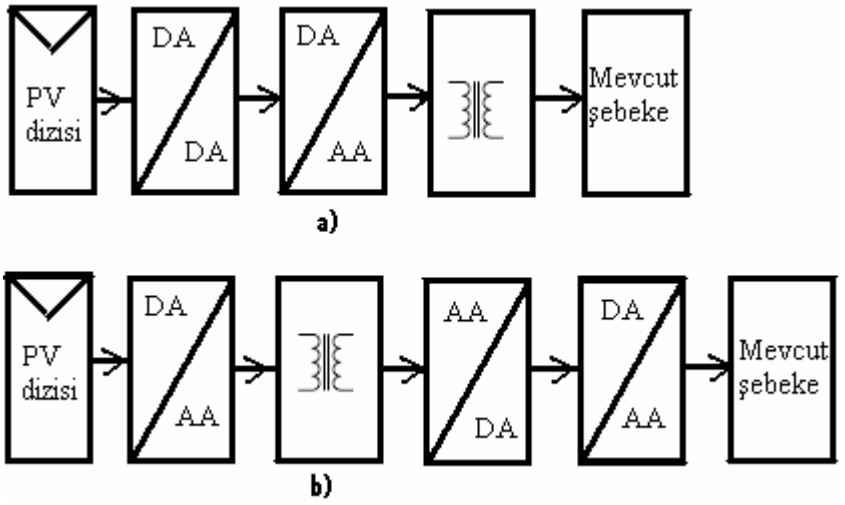
Şekil 4.37: PV eviricileri için güç düzenlemeleri

PV dizi düzenlemeleri ile ilgili soruların ilki, DA/DA dönüştürücü kullanılıp kullanılmamasıdır. Seri bağlı birçok panel ve düşük şebeke gerilimi durumunda (ABD ve Japonya'da olduğu gibi) yükseltme işleminden kurtulmak mümkündür. Böylece tek aşamalı PV evirici yüksek verimlilik için kullanılabilir.

Yalıtım, özellikle güvenlik açısından önem taşır. Mevcut AA şebekesi ile güneş panellerinin elektriksel olarak birbirleri ile doğrudan bağlantılı olması, bir arıza durumunda can güvenliği açısından riskli olabilir. Seri bağlı birçok paneldeki sorun, özellikle kısmi gölgelenmede MGNİ yapmanın zor olmasıdır. Aşağıda detaylı olarak farklı PV evirici güç düzenlemeleri verilmiştir [30].

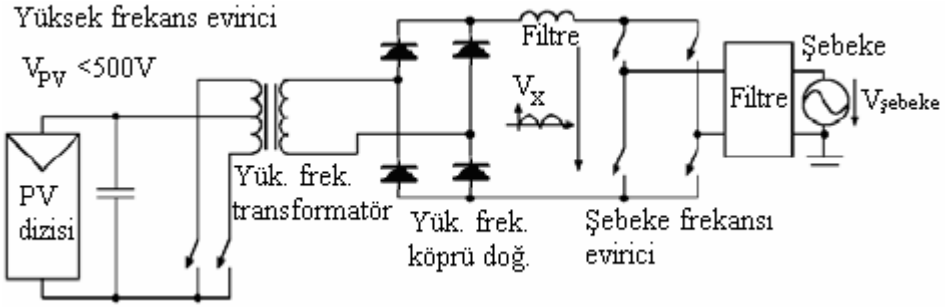
4. 4. 2. 1. DA/DA dönüştürücülü ve yalıtımlı PV eviricileri

Tipik olarak yalıtım, ya şekil 4.38 (a)'da gösterildiği gibi şebeke frekansında (LF) ya da şekil 4.38b'de gösterildiği gibi yüksek frekansta (HF) DA/DA dönüştürücüde bir transformatör kullanarak sağlanır.



Şekil. 4.38: DA/DA dönüştürücülü ve yalıtımlı PV evirici sistemi blok şeması; a) düşük frekansta b) yüksek frekansta.

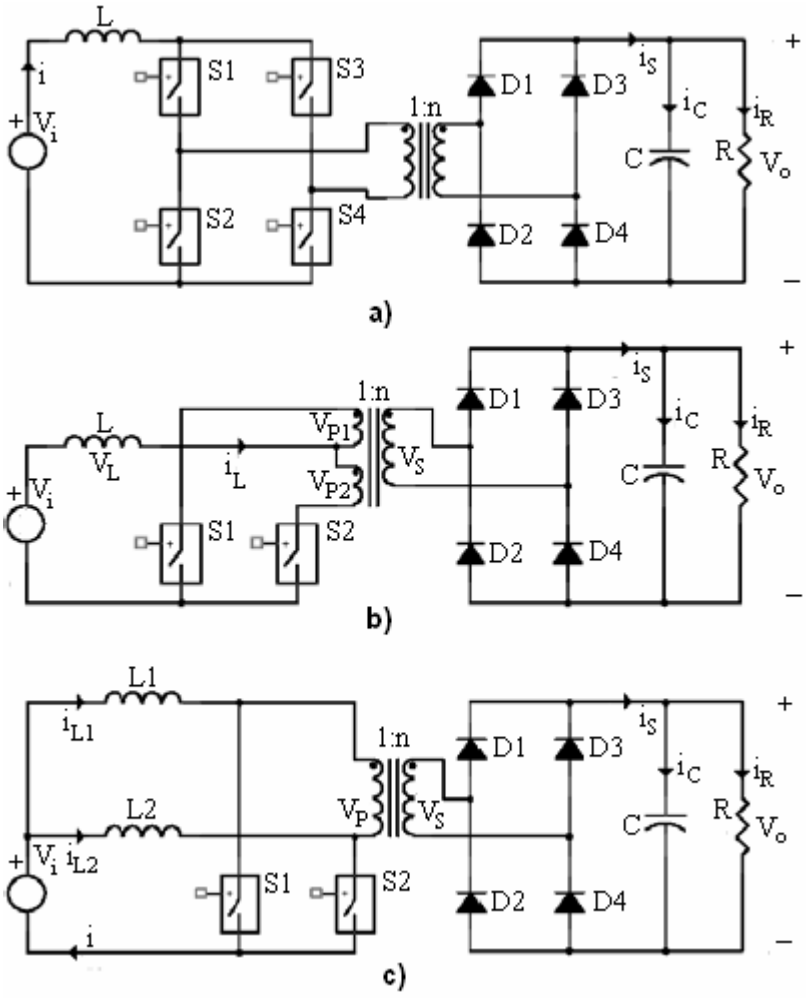
Şekil 4.39'da yalıtımlı bir it-çek yükseltici dönüştürücü kullanan yüksek frekans transformatörlü bir PV evirici gösterilmiştir [31].



Şekil 4.39: DA/DA dönüştürücüde yüksek frekans transformatörü kullanan PV evirici

Bu çözümdeki DA/DA evirici, şebeke frekansında anahtarlanan düşük maliyetli bir eviricidir. Piyasadaki yeni çözümler, iyi güç kalitesi performansı sağlayan, tipik olarak 10-20 kHz frekansında anahtarlanan IGBT li DGM evirici kullanmaktır.

Yalıtımlı yüksek frekans DA/DA dönüştürücüler için diğer çözümler; Şekil 4.40 ta verilen tam köprü yalıtımlı dönüştürücü, tek bobinli it-çek dönüştürücü ve çift bobinli dönüştürücü devreleridir [32].



Şekil 4.40: Yalıtımlı DA/DA dönüştürücü topolojileri; a) tam köprü, b) tekli bobin it-çek, c) çiftli bobin it-çek.

Manyetik elemanları küçültmek amacıyla, 20-100 kHz aralığında yüksek frekans anahtarlamalar kullanılabilir. Bu topolojinin avantajları: transformatörden yüksek oranda faydalanma, çekirdeğin çift yönlü mıknatıslanması, akım denetimli çalışma için daha iyi bir performans ve transformatör DA mıknatıslanmasının düşürülmesidir. Kullanılması it-çek topoloji ile kıyaslandığında dezavantajları: Daha fazla eleman sayısı ve şebeke gerilimi seviyesini yakalamak için transformatör dönüştürme oranının yüksek olması zorunluluğudur.

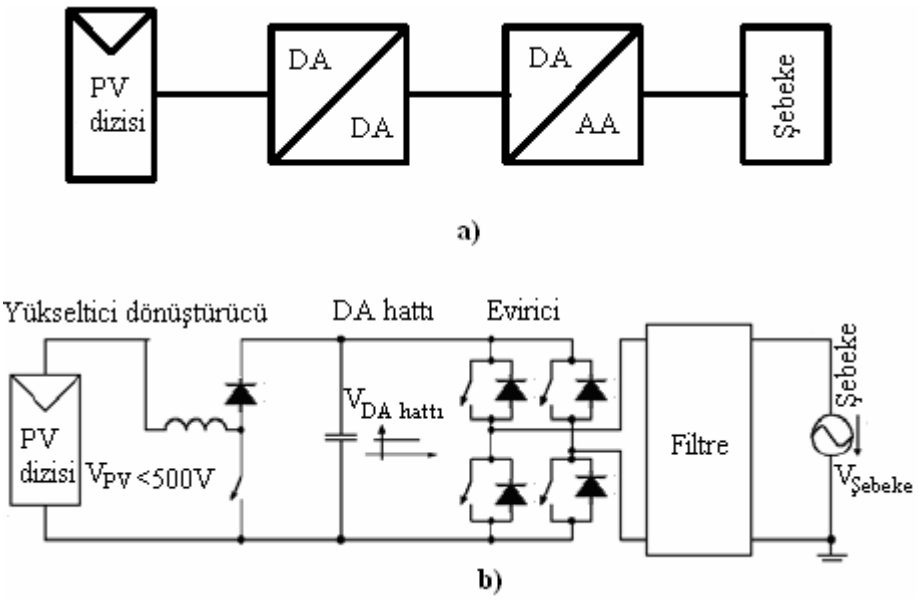
Tekli bobin it-çek dönüştürücü, hem yükselten bobin hem de transformatörün yükseltme fonksiyonunu sağlar. Bu da, transformatör dönüştürme oranının bir önceki yapıdan daha düşük olmasını sağlar.

Böylece yüksek verimlilik ve düzgün giriş akımı özellikleri elde edilir. Bu yapıda, orta uçlu bir transformatörün kullanılması zorunluluğu ve anahtarların yüksek kapama gerilimine maruz kalması en önemli sakıncalardır.

Bu sakıncalar, bir yerine iki parça bobin kullanılarak, çift bobinli it-çek dönüştürücü tasarımı ile giderilebilir. Esas olarak bu yapı bir yükseltici dönüştürücünün iki eşit parçaya ayrılmış şeklidir. Transformatör yapısı çok basit ve orta uç gerektirmez. Bu topolojinin tek dezavantajı fazladan bir bobine ihtiyaç duymasıdır.

4. 4. 2. 2. Yalıtımsız DA/DA dönüştürücülü PV eviricileri

Bazı ülkelerde şebeke yalıtımı zorunlu olmadığından, şekil 4.41'de görüldüğü gibi çok basitleştirilmiş PV eviricileri tasarımları kullanılabilir.

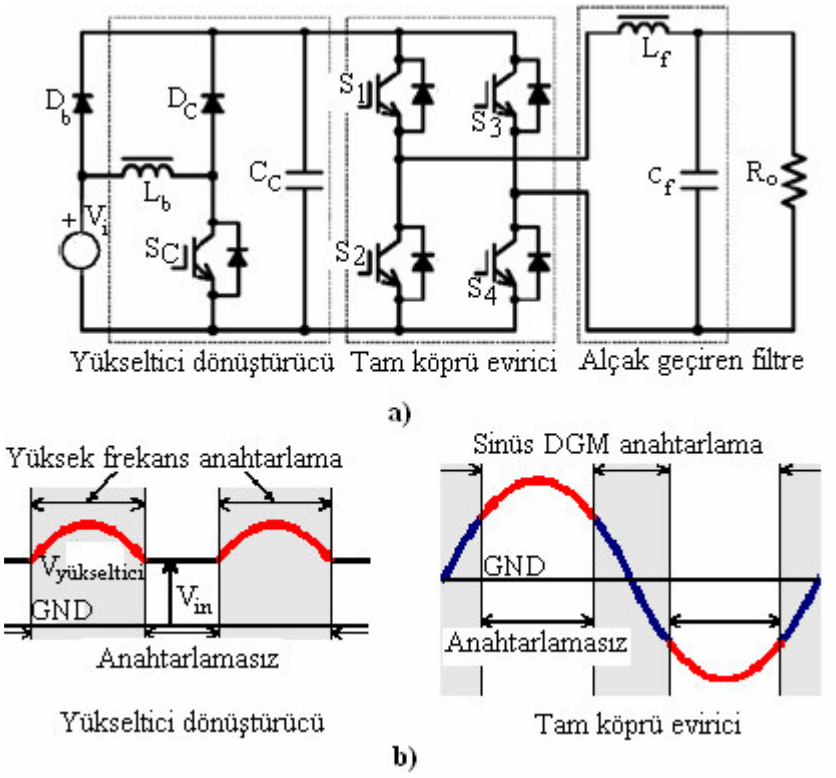


Şekil 4.41: Yalıtımsız DA/DA dönüştürücülü PV evirici sistemi; a) genel blok şeması, b) yükseltici dönüştürücü ve tam köprü uygulama örneği.

Şekil 4.41 (b)'de basit bir yükseltici dönüştürücü ve köprü eviriciden oluşmuş bir uygulama örneği görülmektedir [33].

Yalıtımsız yapılara ilginç bir örnekte şekil 4.42'de gösterilmiştir. Burada, yükseltici dönüştürücü ile DGM köprü evirici zaman paylaşımlı olarak çalıştırılmaktadır.

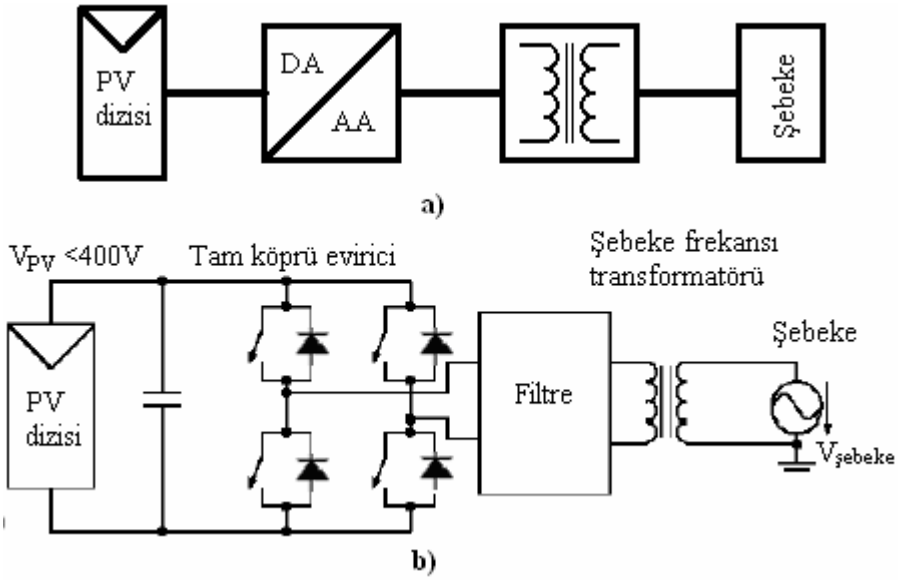
Alternatif gerilimin sentezlenmesinde, belirli zaman aralıklarında köprü evirici anahtarları bir konumda tutularak, denetim yükseltici dönüştürücü üzerinden yapılmakta, belirli zaman aralıklarında da, denetim DGM köprü evirici anahtarlaması ile sağlanmaktadır. Bu şekilde denetimin sadece yükseltici dönüştürücü veya DGM evirici üzerinden sağlandığı duruma göre bir verim artışı sağlanmıştır.



Şekil 4.42: Zaman paylaşımlı ikili mod sinüs modüleli, yükseltici dönüştürücülü tek faz evirici; a) devre yapısı, b) çalışma prensibi [34].

4. 4. 2. 3. Yalıtımlı DA/DA dönüştürücüsüz PV eviricileri

Yükseltici DA/DA dönüştürücü kullanıldığında şebeke frekanslı bir yükseltici transformatör kullanılması zorunlu hale gelir. Bu topolojinin blok diyagramı şekil 4.43 (a)'da verilmiştir.

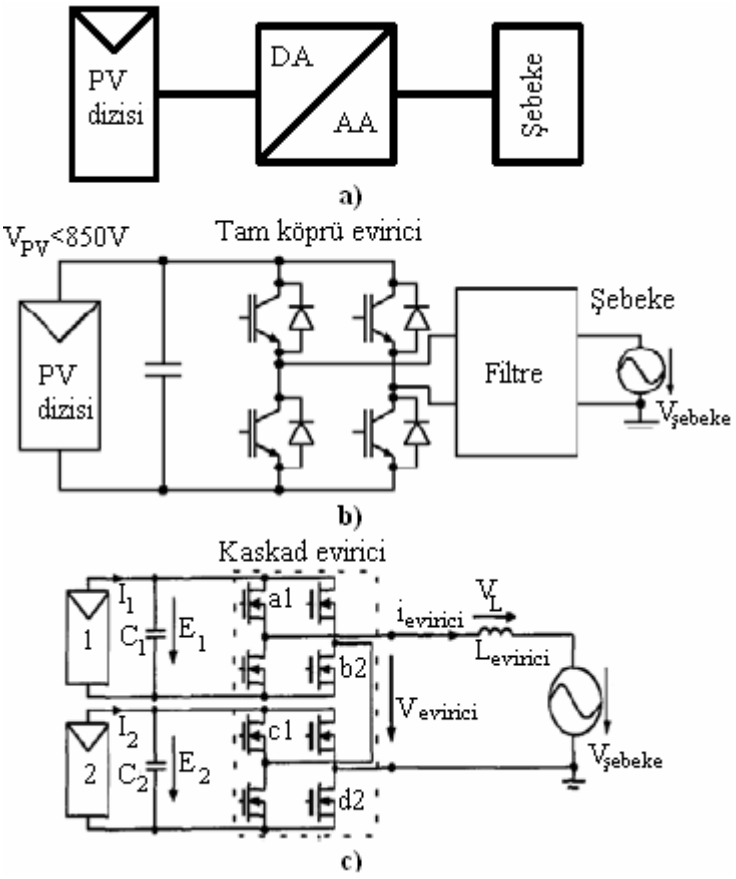


Şekil 4.43: Yalıtımlı DA/DA dönüştürücüsüz PV evirici sistemi; a) genel blok diyagramı, b) tam köprü ve şebeke yanlı transformatörlü uygulama.

Şekil 4.43 (b)'de şebeke frekanslı transformatör kullanan PV eviricilerden iki yapı verilmiştir. Yüksek güç seviyeleri için, tristör kullanan kendinden komutasyonlu eviriciler ticari olarak mevcuttur [31].

4. 4. 2. 4. Yalıtımsız DA/DA dönüştürücüsüz PV eviricileri

Bu topolojinin blok diyagramı şekil 4.44 (a)'da verilmiştir. Şekil 4.44 (b)'de DGM'li IGBT evirici kullanan tipik bir transformatörsüz topoloji görülmektedir. Bu topoloji, her zaman şebeke geriliminden daha fazla gerilim sağlayacak büyük sayıda güneş panellerinin seri bağlanması durumunda kullanılır. Yükselticisiz ve yalıtımsız diğer bir ilginç PV evirici topolojisi, çok seviyeli konsept kullanılarak sağlanabilir. Şekil 4.44 (c)'de beş seviyeli kaskad eviricili şebekeye bağlı fotovoltaik sistem sunulmuştur.



Şekil 4.44: Transformatörsüz DA/DA dönüştürücüsüz PV evirici sistemi; a) genel blok diyagramı, b) tam köprü evirici uygulaması [31], c) çok seviyeli yapı. [36]

5. GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMLERDE MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMLERİ

Önceki ayrıtlarda da belirtildiği gibi GH temelli panellerden en fazla gücü almak için yapılması gereken birinci iş, mevcut ışımadan maksimum faydalanmaktır. Bunu sağlamak için de bir elektro-mekanik düzeneğe gereksinim vardır. Bu düzenek panellerin güneşe dik olarak konumlanmasını sağlar. Ancak böyle bir düzeneğin kullanılması sistemin fiziki olarak büyümesine, mali olarak pahalılaşmasına neden olur. Ayrıca bu düzeneğin çalışması için de enerji kaynağına gereksinim vardır. Bütün bunlar kurulacak sistemde böyle bir düzeneğin kullanılmasının ne kadar gerekli olduğunun sorgulanmasına neden olmaktadır. İkinci ve en önemli iş ise, panele gelen enerjiden maksimum düzeyde yararlanmaktır. Güneş ışımasının panellere maksimum gücü aktarmasını sağlamak kadar, hatta belki ondan da önemlisi, panele gelen enerjiden maksimum verimle faydalanmayı hedeflemektir. Bunu sağlamak için sistemde kullanılan eviriciler için geliştirilen yönteme "Maksimum Güç Noktası İzleme, adı verilir. Bu yöntem GH temelli dizinin herhangi bir anda mevcut ışımada en yüksek gücü üretebileceği noktayı yakalamayı hedefler. Bu amaçla GH temelli dizi ile yük arasında bir DA/DA dönüştürücü bulundurulur ve bu çeviricinin çevirme oranı, GH temelli diziden en yüksek gücü çekecek şekilde ayarlanır.

En yüksek güç noktası izlemenin temel prensibi, GH temelli diziden çekilebilecek en yüksek gücün yük üzerine aktarılmasıdır. Normal bir DA/DA dönüştürücü ile MGNİ denetimli bir DA/DA dönüştürücü arasındaki tek fark: gerilim ya da akım çevirme oranının, normal bir DA/DA dönüştürücü çıkış gerilimini sabit tutmak için ayarlanması, MGNİ denetimlide ise girişteki gücü olabildiğince büyük oranda çıkışa aktarabilmek için ayarlanmasıdır.

MGNİ denetimini gerçekleştirmek için sistemin bazı noktalarından çeşitli ölçümler yapmak gerekir. Yapılan bu ölçümleri değerlendirip gerekli çevirme oranını tespit

etmek için bir denetleme ünitesi gerekir. Bu ünite bir bilgisayar, bir mikroişlemci ya da bir mikrodenetleyici devresi olabilir. Bu sayede GH temelli dizinin belirli bir ışıma düzeyi için üretebileceği enerjinin mümkün olan en büyük düzeyde yük tarafına aktarılması sağlanmaya çalışılır.

Herhangi bir GH'li enerji üretim sistemini, GH temelli dizinin en yüksek güç noktasında çalıştırabilmek için denetleme biriminin uygulayacağı algoritma önem kazanmaktadır. Bu nedenle MGNİ denetimi üzerine yapılan çalışmaların büyük bölümü, denetleme biriminin uygulayacağı algoritmayı belirlemeye yöneliktir. Burada algoritma kısaca işlem basamakları olarak;

• ne tür ölçümler yapılacağı,
• bu ölçümlerin sonuçlarının nasıl değerlendirileceği,
• değerlendirme sonucunda sistemde nasıl değişikliklerin yapılacağı

şeklinde tanımlanabilir.

Literatürdeki MGNİ algoritmaları aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [37- 46].

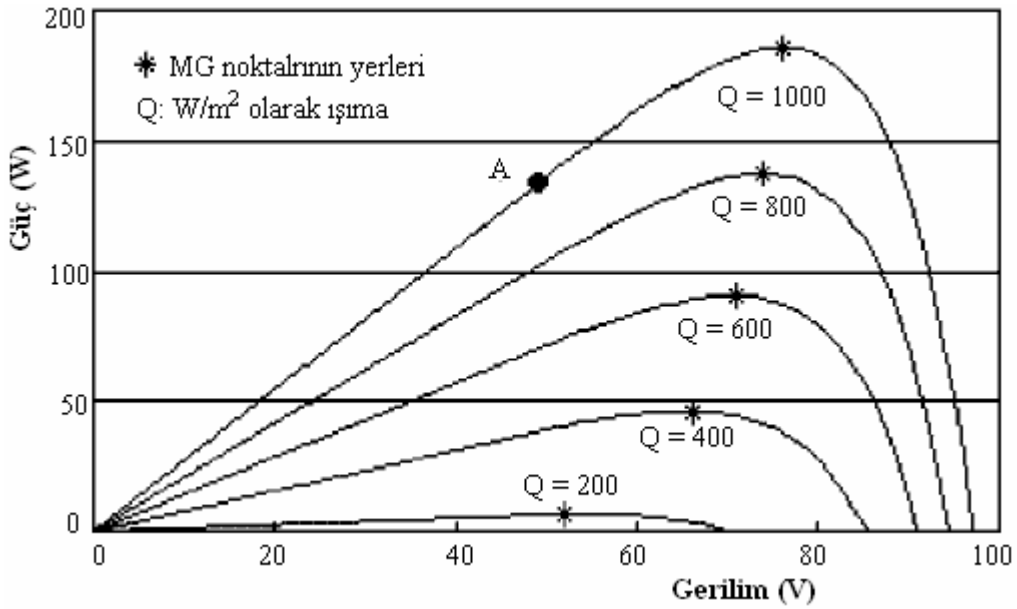
1. Değiştir-Gözle Yöntemi
2. Sabit Gerilim/Sabit Akım Yöntemi
3. Pilot (Örnek) Hücre Yöntemi
4. Artan İletkenlik Yöntemi
5. Parazitik Kondansatör Yöntemi
6. Model Tabanlı Yöntem

5. 1 Değiştir-Gözle Yöntemi

Uygulaması çok kolay olduğundan değiştir gözle (DG) algoritması pratikte en çok kullanılan yöntemdir [39]. DG yöntemi algoritmasının en temel formunun çalışması aşağıdaki gibidir.

PV dizisinin farklı ışıma düzeyleri için güç-gerilim değişimlerini gösteren şekil 5.1 göz önüne alınsın. Her bir eğrinin ayrı bir maksimum güç noktası (MGN) vardır. PV dizisinin şekil 5.1' deki "A" noktasında (MGN'dan uzak) çalıştığı farz edilsin. DG algoritmasında, PV dizisinin çalışma noktasındaki gerilimde küçük bir artış (ΔV)

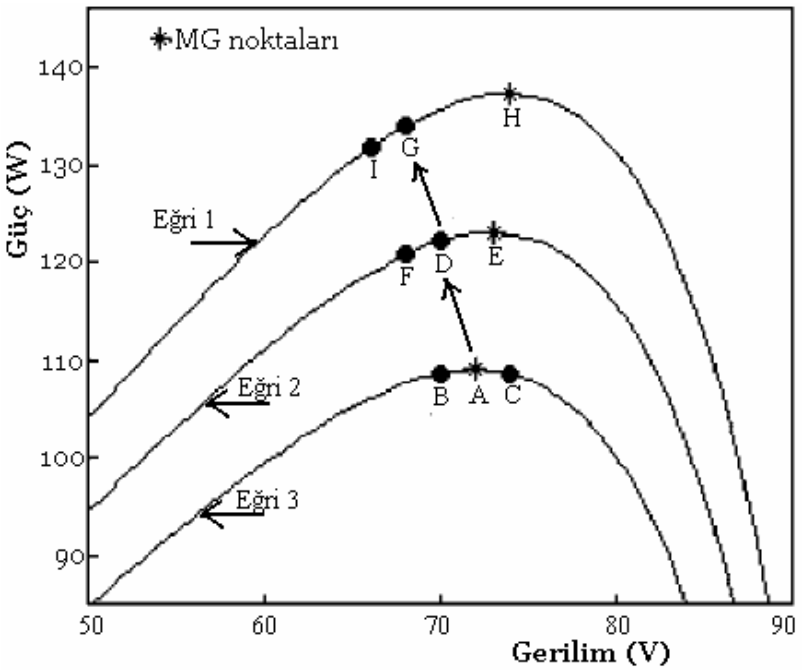
yaratılarak güç değişimi (ΔP) ölçülür. Eğer ΔP pozitif ise, çalışma gerilimindeki bu değiştirme (attırma) işlemi PV dizisinin çalışma noktasının MG noktasına yaklaşmasını sağlar. Eğer ΔP negatif ise, sistemin çalışma noktası MG noktasından uzaklaştığı anlaşılarak gerilim değişiminin yönü değiştirilmelidir (azaltılmalıdır) ki MGN' nı yakalanabilsin.



Şekil 5.1: Fotovoltaik dizi güç-gerilim grafikleri

Önceden de belirtildiği gibi bu algoritmanın avantajları, basit ve uygulanmasının kolay olmasıdır. Bununla beraber DG yöntemi kendi MGN izleyicisinin etkinliğini düşüren bazı sınırlamalara sahiptir. Bu sınırlamalardan bir tanesi, şekil 5.1'de görüldüğü gibi ışımanın çok azalması PV eğrisinin düzleşmesine neden olmasıdır. Bu da gerilim artışına bağlı küçük güç değişimlerine neden olduğundan, MGN izleyicisinin MG noktasını sezmesini zorlaştırır. DG yönteminin diğer bir temel sorunu da, hiçbir zaman MG noktasına ulaşıp ulaşamadığını anlayamamasıdır. Bunun yerine her bir ΔP ölçümünden sonra gerilim değiştirme yönünü değiştirerek MGN etrafında salınım yapar. Ayrıca ışıma seviyelerinin hızlı değişimlerinde DG yönteminin kararsız davranış sergilediği literatürden bilinmektedir [39]. Herhangi bir çalışma anında ışıma düzeyinin şekil 5.2' deki "3" numaralı karakteristiği oluşturduğu kabul edilsin. MGNİ, MGN etrafında "B" noktasından "A" noktasına, oradan "C" noktasına ve oradan da tekrar "A" noktasına değişerek salınım gösterir. Sonra ışımanın arttığını ve PV eğrisinin "2" numaralı eğriye geçtiğini farz edelim.

Işımada ve güç çıkışındaki hızlı değişimler süresinde, eğer MGNİ artış işlemini "A" noktasından "B" noktasına yaparsa bu gerçekte "A" noktasından "D" noktasına yapılmış olur. Şekil 5.2' de görüleceği gibi, bu işlem ΔP'nin pozitif olması sonucunu doğurur ve gerilim değişimi yönünün değiştirilmesi ihtiyacı doğmayacağından değişim "F" noktasına doğru olacaktır. Eğer ışıma hala hızla değişiyorsa, PV güç eğrisi "2" numaralı eğrideki "F" noktası yerine "1" numaralı eğrideki "G" noktasına hareket edecektir. MGN izleyicisi hala pozitif bir ΔP gördüğünden, MG noktasına yaklaştığını zannederek artış yönünü değiştirmeyeceğinden "I" noktasına gelecek. Sonuç itibarıyla MGNİ sürekli MG noktasından uzak kaldığından DG yönteminin MGN izleme etkinliği düşecektir. Bu durum özellikle havanın parçalı bulutlu olduğu veya PV sisteminin hareketli olduğu durumlarda ortaya çıkar ve MGN izleyicisinin MG noktasını izlemesi zorlaşır.

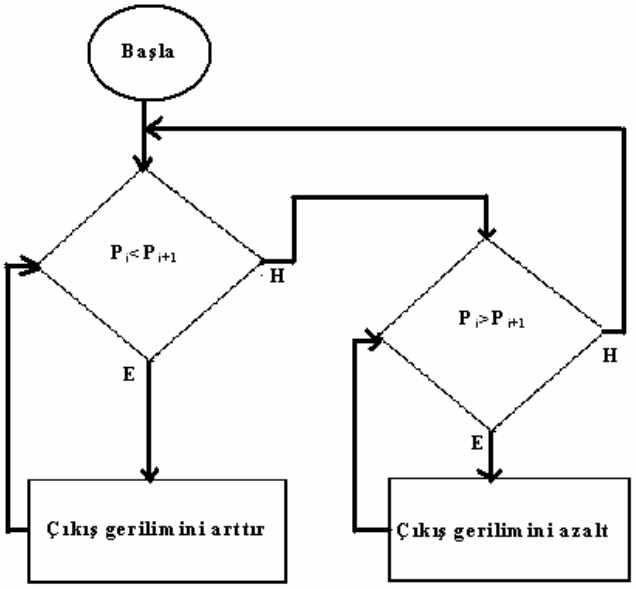


Şekil 5.2: Hızlı değişen ışıma durumunda DG yönteminin davranışı

DG yönteminin birçok gelişimi önerilmiştir [40]. En basit yöntemlerden biri; eğer artış yönü peş peşe birçok kez yön değiştiriyorsa, MG noktasının yükseldiğini farz edip kısa bir süre artışı durduran bir bekletme fonksiyonu eklemektir. Bu kararlı durumdaki MGN salınımını azaltır ve sabit ışınım koşulları altındaki DG yönteminin etkinliğini arttırır. Diğer bir modifikasyon ise şöyledir; "V_1" gerilimindeki "P_1" gücü

hesaplanır, gerilim değiştirilerek "V_2" gerilimindeki "P_2" gücü hesaplanır, gerilim ters yönde değiştirilerek (yeniden "V_1") "P'_1" gücü hesaplanır ve iki ölçüm değerlendirilerek ışımada bir değişimin olup olmadığı algoritma tarafından anlaşılır. Dizi gücünün örnekleme sayısındaki artışın algoritmanın yavaşlamasına neden olmasıyla birlikte "V_1" gerilimindeki iki ölçüm, örnekleme aralığında oluşan ışıma değişimi miktarını tahmin etmekte ve bu tahmin de çalışma noktasının nasıl değiştirileceğini belirlemekte kullanılabilir. Bütün bunlarla birlikte, bu işlemler algoritmanın karmaşıklığını arttırır ve MGN izleyicisinin çalışmasını yavaşlatır.

Şekil 5.3' de DG yönteminin uygulanması akış şeması görülmektedir.



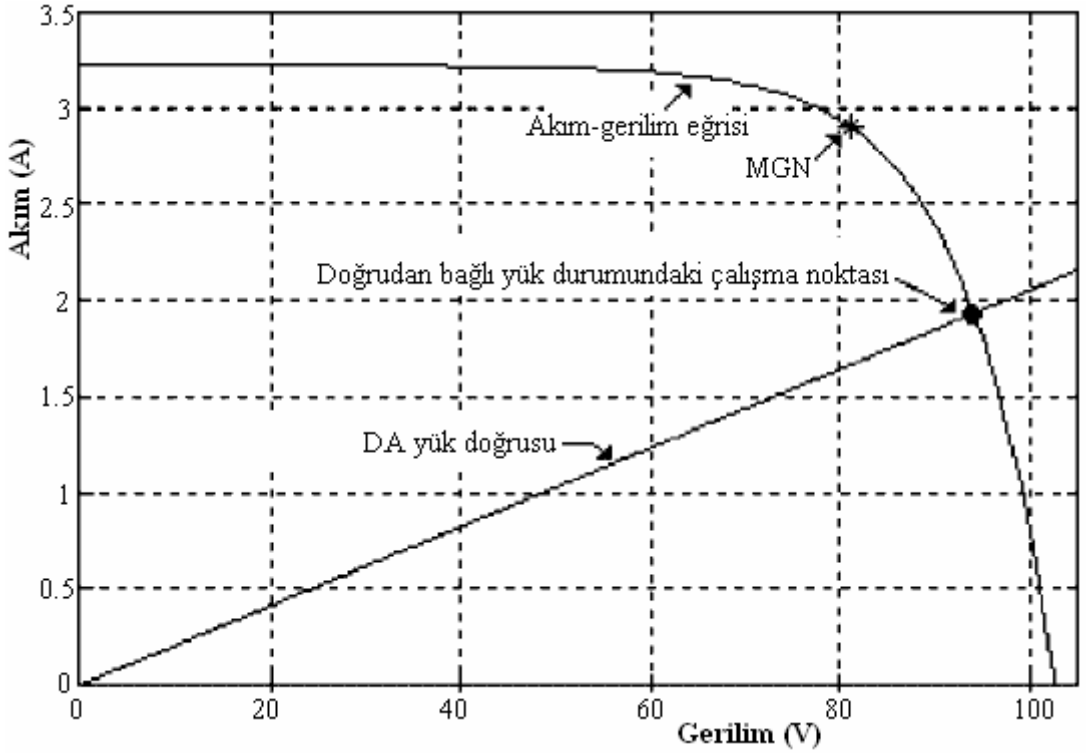
Şekil 5.3: DG yöntemi akış şeması

Burada giriş gücü (P_i), çıkış gerilimi değiştirilmeden önceki çıkış gücünü ifade etmektedir. Çıkış gücü(P_{i+1}) ise çıkış gerilimi değiştirildikten sonra elde edilen çıkış gücünü ifade etmektedir. Uygulanan algoritma, çıkış gerilimi değiştirildikten sonra elde edilen çıkış gücü ile çıkış gerilimi değiştirilmeden önceki çıkış gücünün kıyaslanması esasına dayanmaktadır. Buna göre elde edilen yeni çıkış gücünün daima en yüksek noktada olmasını sağlamak üzere çıkış gerilimi artırılmakta ya da azaltılmaktadır.

5. 2 Sabit Gerilim/Sabit Akım Yöntemi

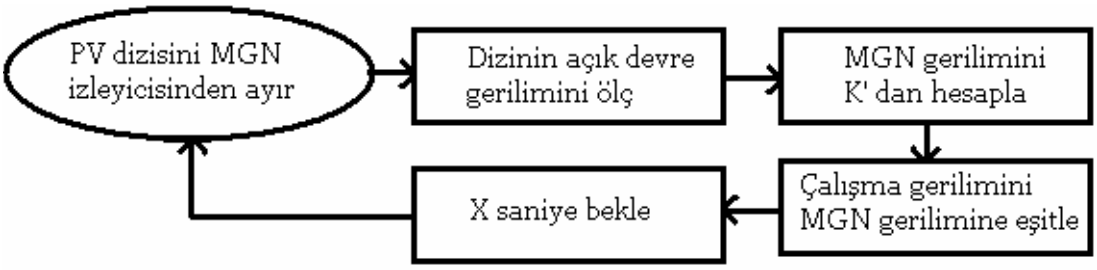
Sabit gerilim yöntemi, şekil 5.4'deki akım-gerilim eğrilerinde olduğu gibi PV dizisinin maksimum güçteki geriliminin, dizinin açık devre gerilimine oranının yaklaşık sabit bir değere (K) eşit olduğu üzerine temellendirilmiştir. K'nın değeri birden küçüktür. Bu denklem (5.1) ile ifade edilir.

$$\frac{V_{MGN}}{V_{oc}} \cong K \tag{5.1}$$



Şekil 5.4: Bir PV dizisinin tipik akım-gerilim karakteristiği

Sabit gerilim yöntemi şekil 5. 5'de verilen akış şeması kullanılarak uygulanabilir. PV dizisini geçici olarak MGN izleyicisinden ayırarak bir açık devre gerilimi hesaplanır. Sonra, MGN izleyicisi denklem (5.1)'i kullanarak doğru çalışma noktasını hesaplar ve dizi gerilimini MGN gerilimine ayarlar. MG noktasını izlemek için bu işlem periyodik olarak tekrar edilir.



Şekil 5.5: Sabit gerilim yöntemi akış şeması

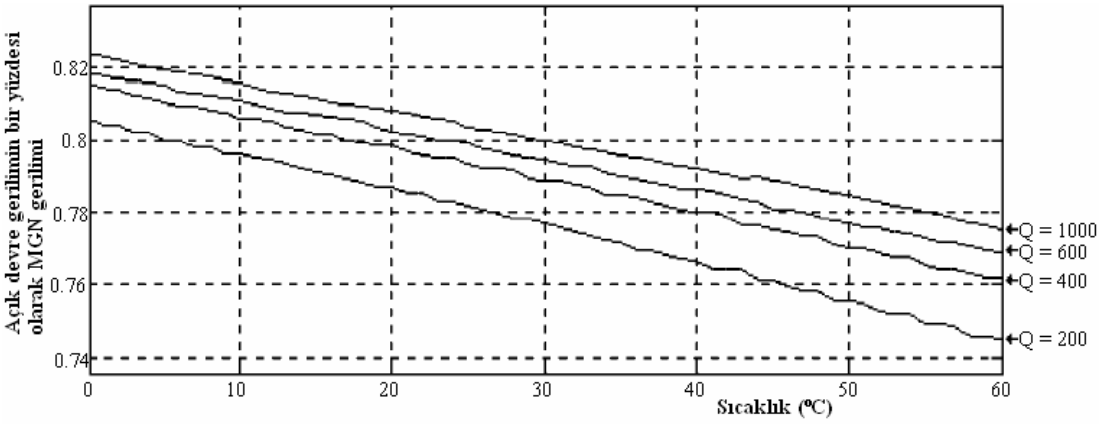
Bu yöntem oldukça basit olmakla birlikte, sabit K değerinin optimal değerini seçebilmek zordur. Literatürde seçilen K değerleri %73 ile %80 arasında değişmektedir [41-43]. Şekil 5.6'da, sıcaklığın 0-60 ^{o}C ve ışımanın 200-1000 W/m^2 aralığında değişmesi durumunda, bir PV dizisinin K değerleri görülmektedir. Bu eğriler (5.2), (5.3) ve (5.4) denklemleri kullanılarak hesaplanır.

$$I = I_p - I_s\left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{akT}} - 1\right] \tag{5.2}$$

$$I_s = I_{sr}\left(\frac{T}{T_r}\right)e^{\left[\frac{qE_G}{ak}\left(\frac{1}{T_r}-\frac{1}{T}\right)\right]} \tag{5.3}$$

$$I_p = \left(\frac{Q}{1000}\right)\left[I_{sc} + K_{T,I}\left(T - T_r\right)\right] \tag{5.4}$$

Denklem (5.2), ışıma altındaki bir p-n ekleminin denklemi olarak bilinir ve ayrıt 3'deki denklem (3.1)'in tekrarıdır. Denklem (5.3) sıcaklığa bağlı olarak ters doyma akımını hesaplar. Denklem (5.4) ışıma, sıcaklık, kısa devre akımı ve akım sıcaklık katsayısının fonksiyonu olan Işık akımını hesaplar. Şekil 5.6'da K değerinin sabit olmadığı, ancak verilen çalışma koşulları aralığında, sıcaklık ve ışımaya bağlı olarak gösterdiği değişimin %8 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6: Sıcaklık ve ışımanın fonksiyonu olan açık devre geriliminin yüzdesi olarak MGN gerilimi

Sabit gerilim yöntemi analog devre ile kolayca uygulanabilir. Bununla birlikte, diğer yöntemlere nazaran MGNİ etkinliği düşüktür. Bunun nedenleri; K sabitindeki hata payı ve açık devre geriliminin ölçülebilmesi için dizinin geçici bir süre açık devre edilmesidir. K sabitinin değerini dinamik olarak ayarlamak mümkündür. Ancak bu da bir araştırma algoritması gerektirir ki aslında DG yöntemi ile aynı olur.

MGN akımının kısa devre akımına oranının sabit olduğu varsayımı temeline dayalı sabit akım yöntemi de kullanılabilir [44]. Bu yöntemi uygulamak için, giriş terminalindeki dönüştürücüye paralel bir anahtar konulur ve periyodik olarak anahtarlanır (giriş kısa devre edilir). Kısa devre akımı ölçülür, MGN akımı hesaplanır ve MGN izleyicisi hesaplanan akıma ulaşılıncaya kadar dizi akımını ayarlar. Bu işlem periyodik olarak tekrar edilir. Pratikte dizi terminalini kısa devre yapıp akım ölçmek açık devre yapıp gerilim ölçmekten daha zor olduğundan sabit gerilim yöntemi sabit akım yöntemine tercih edilir.

5. 3. Pilot (Örnek) Hücre Yöntemi

Pilot hücre yöntemi, sabit gerilim/sabit akım yöntemi ile aynıdır. Aradaki tek fark, dizinin açık devre geriliminin ya da kısa devre akımının doğrudan dizi sisteminden ölçmesi yerine sistemle aynı karakteristik yapıya sahip pilot hücre diye adlandırılan sistem dışındaki bir hücreden elde edilmesidir [44]. Pilot hücreden alınan ölçümler, MGN izleyicisi tarafından sistemin MG noktasında çalışmasının ayarlanmasında

kullanılır. Ayrıca kısa devre veya açık devre işlemleri sırasında oluşan PV sistemi güç kayıpları ortadan kalkar. Bununla beraber, K sabitindeki problem varlığını sürdürmektedir. Ayrıca pilot hücre ile diziyi oluşturan hücrelerin aynı karakteristik yapıda olması gibi lojistik bir problem de bu yöntemde mevcuttur. Pilot hücre-solar dizi çifti mutlaka kalibre edilmelidir ki bu da sistemin enerji maliyetini arttırır.

5. 4. Artan İletkenlik Yöntemi

Artan iletkenlik yöntemi, PV dizisi güç ifadesinin PV gerilimine göre türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesi temeline dayanır. Bu işlem denklem (5.5) ile ifade edilir.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} = 0 \tag{5.5}$$

(5.5) denkleminde gerekli düzenlemeler yapılarak (5.6) denklemi bulunur.

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \tag{5.6}$$

(5.6) denkleminin sol tarafı, PV dizisinin ani iletkenliğinin karşıtını (negatifini) ifade ederken sağ tarafı artan iletkenliği ifade eder. Maksimum güç noktasında bu iki büyüklük değer olarak eşit ve zıt işaretlidir. Eğer çalışma noktası MG noktasının dışında ise, (5.6) denkleminden çalışma geriliminin MGN geriliminin altında veya üstünde olduğu ile ilgili bir eşitsizlik seti üretilebilir. Bu ilişkiler denklem (5.7), denklem (5.8) ve denklem (5.9) ile özetlenmiştir [45].

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad ; \quad \left(\frac{dP}{dV} = 0\right) \tag{5.7}$$

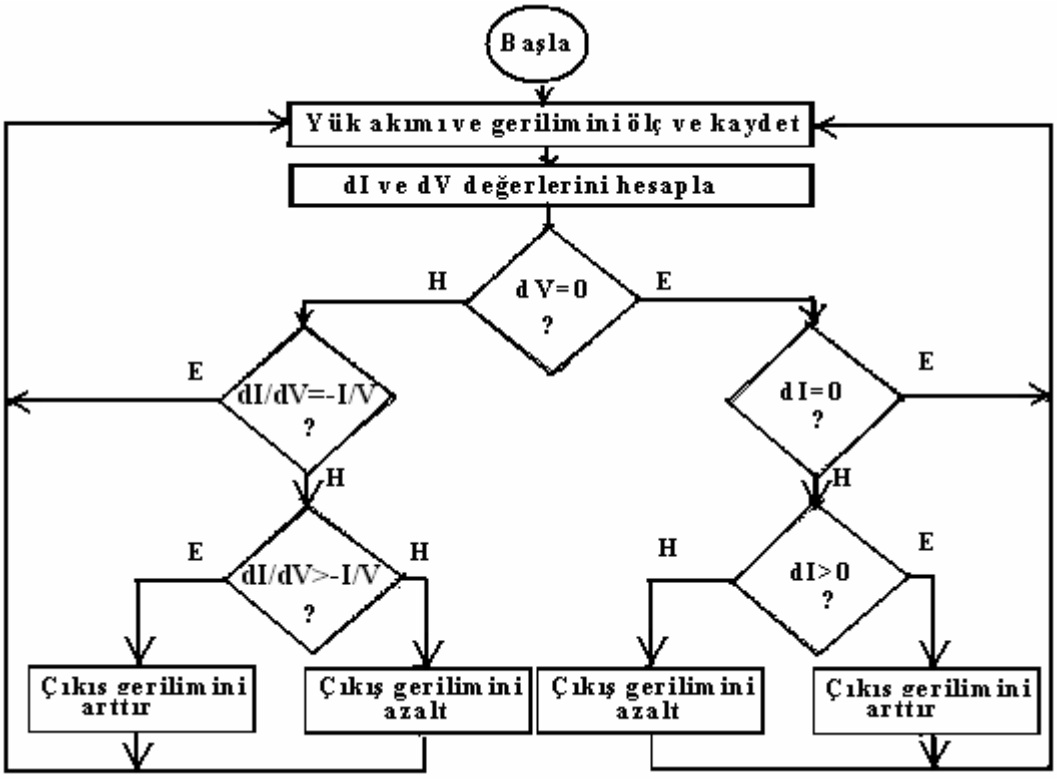
$$\frac{dI}{dV} \rangle -\frac{I}{V} \quad ; \quad \left(\frac{dP}{dV} \rangle 0\right) \tag{5.8}$$

$$\frac{dI}{dV} \langle -\frac{I}{V} \quad ; \quad \left(\frac{dP}{dV} \langle 0\right) \tag{5.9}$$

Denklem (5.7), denklem (5.6)'nın bir tekrarıdır. Denklem (5.8) ve denklem (5.9) artış yönünü belirlemekte kullanılır. Bu artış yönü, çalışma noktasını MG noktasına

yaklaştıran bir arttırmayı sağlamalıdır ve (5.7) denkleminin sonucuna ulaşılıncaya kadar bu işlem tekrar edilmelidir. MG noktasına bir kere ulaşıldıktan sonra, akımda bir değişim ölçülünceye kadar, MGN izleyicisi bu noktada çalışmayı sürdürür. Akımdaki bir değişim, dizi üzerindeki ışımanın veya yük koşullarının değişimi ile ilişkilendirilebilir. Şekil 5.1 de görüldüğü gibi, dizi üzerindeki ışımada bir artış olduğunda, MG noktası dizi gerilimine bağlı olarak sağa kayar. MG noktasındaki bu kaymayı telafi etmek için, MGN izleyicisi mutlaka dizi çalışma gerilimini artırmalıdır. Işımada bir azalma sezildiğinde (ölçülen akımda bir azalma durumu)ise, tam tersi MGN izleyicisi dizinin çalışma gerilimini azaltmalıdır.

Şekil 5.7' de bir artan iletkenlik yöntemi akış şeması verilmiştir [45]. Güneş dizisinin akım ve gerilimi ile ilgili şimdiki ve bir önceki değerler, akım değişimi (dI) ve gerilim değişimi (dV) değerlerinin hesaplanmasında kullanılır. Eğer dI ve dV değerleri sıfıra eşit ise, atmosferik koşullar değişmemiştir ve MGN izleyicisi hala MG noktasında çalışmaktadır. Eğer dV sıfır ve dI sıfırdan büyük ise, ışıma değeri artmıştır, MGN gerilimi yükselmiştir. Bu durumda PV dizisinin gerilimi, MG noktasını izleyebilmesi için, MGN izleyicisi tarafından arttırılmalıdır. Tersine dI sıfırdan küçük ise, ışıma değeri azalmıştır, MGN gerilimi düşmüştür. Bu durumda, PV dizisinin çalışma gerilimi, MGN gerilimini izleyebilmesi için, MGN izleyicisi tarafından azaltılmalıdır. Eğer akım ve gerilimdeki değişimler sıfır değilse, MG noktasına ulaşabilmek için gerilimdeki değişim yönünün belirlenmesinde denklem (5.8) ve denklem (5.9) kullanılır. Eğer dI/dV büyük –I/V ise, dP/dV sıfırdan büyük ve PV dizisinin P-V eğrisi üzerindeki çalışma noktası MG noktasının solundadır (küçüktür). Bu, durumda, MG noktasına ulaşması için PV dizisi gerilimi mutlaka MGN izleyicisi tarafından arttırılmalıdır. Benzer şekilde, eğer dI/dV küçük –I/V ise, dP/dV sıfırdan küçüktür ve PV dizisinin çalışma noktası P-V eğrisindeki MG noktasının sağına kayar (büyük). Bu durumda, MG noktasına ulaşması için, PV dizisi gerilimi MGN izleyicisi tarafından mutlaka azaltılmalıdır. DG yöntemi ile kıyaslandığında bu yöntemin birincil avantajı; MG noktasına ulaşmak için gerekli artış yönünün kesin belirlenebilmesi ve MG noktasına erişildiğinin anlaşılabilmesidir. Bu da, atmosferik koşulların hızlı değişimi durumunda, DG yönteminde görülen, yanlış artış yönü seçimlerine ve MGN etrafındaki sürekli salınıma izin vermez.



Şekil 5.7: Artan eğilimli iletkenlik yöntemi akış şeması

5. 5. Parazitik Kondansatör Yöntemi

Güneş hücrelerinin p-n eklemindeki yük birikimlerini modelleyen parazitik kondansatörün (C_p) etkisinin modellemeye dahil edilmesi dışında, parazitik kondansatör yöntemi artan iletkenlik yöntemine benzer. Kapasitans değeri i(t) = CdV/dt ifadesi ile tanımlanıp denklem (5.2)'ye eklenirse,

$$I = I_p - I_s\left[e^{\frac{V_p + R_s I}{a}} - 1\right] + C_p \frac{dV_p}{dt} = F(V_p) + C_p \frac{dV_p}{dt} \tag{5.10}$$

ifadesi elde edilir [46].

Son denklemde akımın, V_p nin fonksiyonu olan bir terim ve parazitik kondansatördeki akımın bir fonksiyonu olan bir terim olmak üzere iki terimden oluştuğu görülmektedir. Bu notasyon kullanılarak, dizinin artan iletkenliği (g_p); $dF(V_p)/dV_p$ ifadesi ile ve ani iletkenliği (g_L) ise; $-F(V_p)/V_p$ ifadesi ile tanımlanabilir. MG noktası, dP/dV_p ifadesinin sıfır olduğu yerdedir. Denklem (5.10), dizi gerilimi

ile çarpılıp (dizi gücünü bulmak için) sonucun türevi alınırsa MG noktasındaki dizi gücü denklemi elde edilir. Bu, denklem (5.11) ile ifade edilir [46].

$$\frac{dF(V_p)}{dV_p}+\left(\frac{\dot{V}}{V}+\frac{\ddot{V}}{\dot{V}}\right)+\frac{F(V_p)}{V_p}=0 \tag{5.11}$$

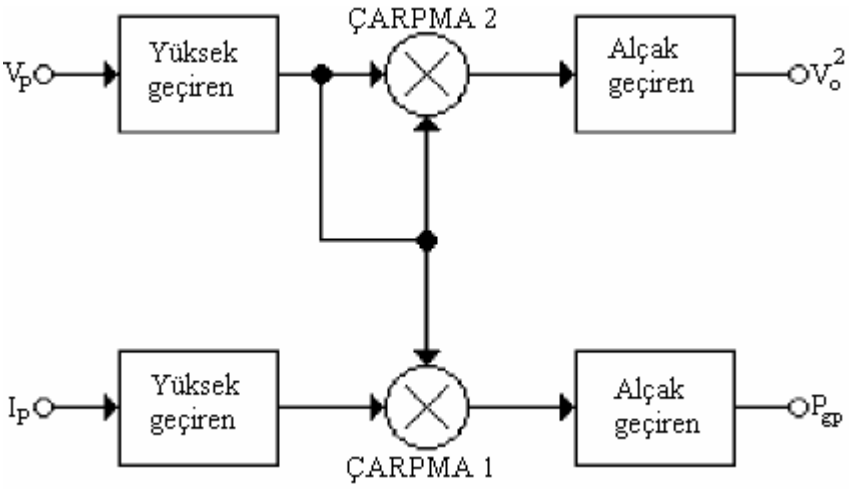
Denklem (5.11) deki üç terim; ani iletkenlik, artan iletkenlik ve parazitik kondansatörün endüklenmiş dalgalanmasıdır. Dizi geriliminin birinci ve ikinci türevleri, parazitik kondansatör tarafından üretilen AA dalgalanma elemanlarını göz önüne alır. C_p değeri sıfır yapılırsa, denklemin artan iletkenlik yönteminde kullanılan denklemle aynı olacağı açıktır. Parazitik kondansatör, her bir güneş hücresine paralel bağlı bir kondansatör olarak modellendiğinden, hücrelerin paralel bağlanması durumunda, parazitik kondansatörün etkin değeri MGN izleyicisi tarafından artmış olarak görülür. Bundan dolayı, birçok paralel modülden oluşan bir yüksek güç güneş dizisinde, parazitik kondansatör ile artan iletkenlik yöntemlerinin MGNİ verimleri arasındaki farkın bir maksimumu olmalıdır.

Dizinin iletkenliği, dizi akımının dizi gerilimine oranı olduğundan, kolay hesaplanabilir. Dizinin türevsel iletkenliğini hesaplamak daha zordur. Bu,

$$g_p=\frac{P_{GP}}{V_o^2}=\frac{\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\left[a_n^i a_n^v+b_n^i b_n^v\right]}{\frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\left(a_n^v\right)^2+\left(b_n^v\right)^2\right]} \tag{5.12}$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada: P_{GP}; ortalama dalgalanma gücü, V_o; gerilim dalgalanması genliği ve a_n^i, a_n^v, b_n^i, b_n^v değerleri PV dizisinin akım ve gerilim dalgalanmalarının Fourier serisi katsayılarıdır. P_{GP} ve V_o^2 değerleri, şekil 5.8'de gösterilen bir devre düzeninden elde edilebilir [46]. Devrenin girişleri ölçülen dizi akımı ve gerilimidir. Yüksek geçiren filtre, V_{PV}' nin DA bileşenini ortadan kaldırır. İki çarpıcı, AA V_o^2 ve AA P g_p değerlerini üretirler. Sonra alçak geçiren filtrelerden geçerek V_o^2 ve P g_p' nin DA bileşenlerinden kurtulurlar. Denklem (5.12)'de bu iki değerin oranının dizi iletkenliğine eşit olduğu görülmektedir. Bu değeri, dizi türevsel

iletkenliğinin dizi iletkenliğine eşit oluncaya kadar denklem (5.7), denklem (5.8) ve denklem (5.9) ile beraber kullanılabilir.



Şekil 5.8: Parazitik kapasite yöntemini uygulama devresi

5. 6. Model Tabanlı MGNİ Yöntemleri

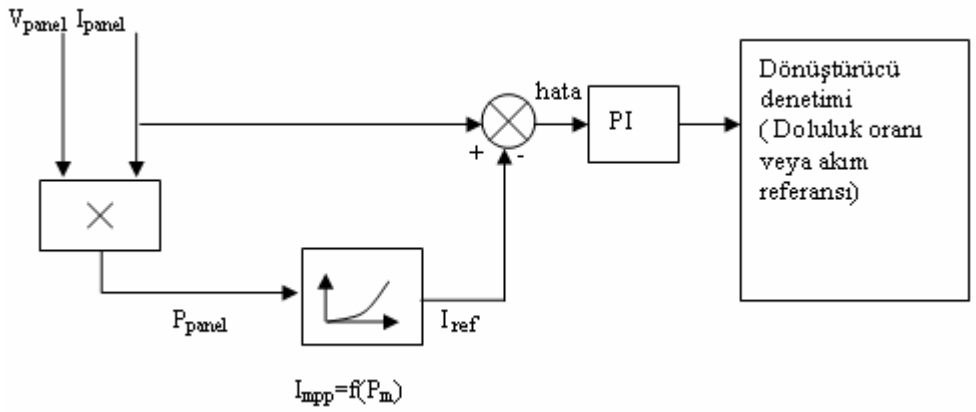
Eğer bir güneş hücresi için (5.2) denklemindeki parametrelerin değeri biliniyorsa, güneş hücresi üzerindeki ışıma ve sıcaklık ölçümleri ile güneş hücresi akım ve gerilimi hesaplanabilir. Sonra, MGN gerilimi doğrudan hesaplanabilir ve PV dizisinin çalışma gerilimi MGN gerilimine kolayca ayarlanabilir. Bu tarz bir yöntem genelde model tabanlı MGNİ yöntemi olarak adlandırılır. Cazip görünmekle beraber, hücrelerin parametrelerinin kesin bilinememesi ve aynı üretim serisindeki hücrelerin parametrelerinin bile farklılık göstermeleri nedeniyle model tabanlı yöntem genellikle kullanışlı değildir. Dahası, hatasız bir ışıma sensörünün (pyranometer) maliyeti bile tek başına MGNİ projesini maliyet açısından anlamsız kılar.

5.7. Önerilen Maksimum Güç Noktası İzleme Yöntemi

Maksimum güç noktası izleme amaçlı olarak farklı bir algoritma da, güneş hücresinin farklı ışıma değerleri için bilinen maksimum güç ve akım değerleri kullanılarak geliştirilebilir. Bu yöntem için gerekli olan maksimum güç ve bu noktalara ait akım değerleri üretici firma tarafından sağlanan karakteristiklerden elde edilebilir. Algoritmanın temeli herhangi bir ışıma ve yük koşulunda çalışan güneş

hücresinin ölçülen akım ve güç değerlerini, önceden belirlenmiş maksimum güç ve akım değerleri ile karşılaştırarak, sistemde kullanılan dönüştürücünün hatayı sıfır yapacak şekilde denetlenmesi esasına dayanmaktadır.

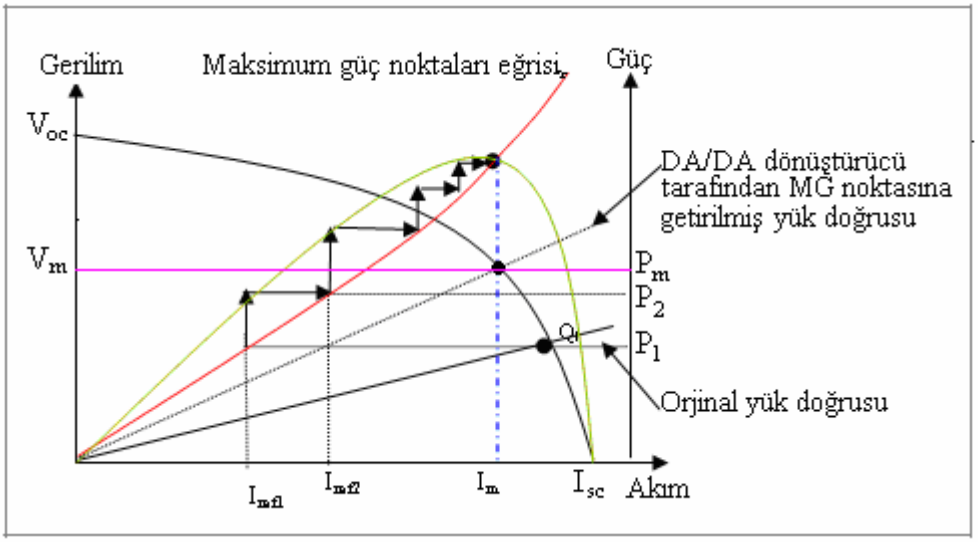
Yöntemin uygulanması için belirli bir güneş paneline ait $(I_m)=P_m$ fonksiyonun (veya veri tablosunun) oluşturulması gereklidir. Üretici firmaların sınırlı sayıda ışıma düzeyi için verdikleri değerler kullanılarak uygun bir eğri uydurma algoritması ile $I_m = f(P_m)$ değişimi yeterince duyarlı bir şekilde elde edilebilir. Bu şekilde elde edilen fonksiyon, herhangi bir çalışma durumu için panelden ölçülen güç değeri için bir I_{ref} değeri üretecektir. Buradan elde edilen I_{ref} değeri ile panelden ölçülen çalışma akımı karşılaştırılarak bir hata elde edilir. Elde edilen hata bir PI denetleyici üzerinden panel çalışma noktasını değiştirecek şekilde, dönüştürücünün temel denetim büyüklüğünü hatanın durumuna göre artırıp azaltacak bir denetim sağlayacaktır. Hatanın tamamen giderilmesi durumunda, sistemin çalışma noktası mutlak bir şekilde $I_m = f(P_m)$ fonksiyonunu sağlayan bir noktada oluşacaktır. Bu yöntemle, bir arama algoritmasından farklı olarak çalışma noktasının oldukça hızlı ve kararlı bir şekilde MG noktasına getirilmesi mümkündür.



Şekil 5.9: Önerilen MGNİ algoritmasının prensip şeması

Şekil 5.10'da düşürücü-yükeltici tip bir dönüştürücü üzerinden beslenen ve başlangıçta Q_1 çalışma noktasında çalışan bir sistemin P_m noktasına getirilmesinin açıklandığı bir grafik verilmiştir. Başlangıçta I_1,V_1 ve P_1 noktalarında çalışan sistemde P_1 değeri $I_m = f(P_m)$ fonksiyonunda yerine koyulursa I_{ref1} değeri elde edilir. $I_{ref1} < I_1$ olduğundan denetleyici akımı azaltıcı şekilde dönüştürücüyü etkiler, akımın

azalması çalışma noktasının aşamalı olarak maksimum güç noktasına doğru değişmesine neden olur. Hatanın sıfır olması ancak çalışma noktasının maksimum güç noktasına ulaşması ile sonuçlanacaktır.



Şekil 5.10: Önerilen MGNİ algoritmasının MG noktasına yakınsaması

Önerilen maksimum güç izleme algoritması oldukça az işlem gerektirmesi ve arama yapmaması nedeniyle kolay gerçekleştirilebilen, kararlı ve hızlı bir çözüm oluşturmaktadır. Yöntemin bu şekli ile en önemli sakıncası sıcaklığa bağlı değişimlerin gözardı edilmesidir. Buna rağmen günümüzde ticari MGİ'lerde en çok kullanılan sabit gerilim yöntemi ile kıyaslandığında ortalama performans olarak daha üstün olduğu söylenebilir. Ayrıca, bu yöntemle ilk aşamada MGN'ye oldukça yakın bir çalışma noktası elde edildiğinden, dar bir aralıkta ek bir arama algoritması eklenerek algoritmanın daha da etkin olarak MGN izlemesi sağlanabilir. Sıcaklığa bağlı değişimlerin dikkate alınabilmesi için bir diğer yaklaşım da farklı sıcaklıklar için farklı fonksiyonlar elde ederek bunların panel sıcaklığına göre yazılım tarafından seçilerek kullanılmasıdır. Önerilen MG izleme algoritmasının uygulaması ile ilgili diğer açıklamalar 6. Bölümde verilecektir.

6. SİMÜLASYONLAR ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR

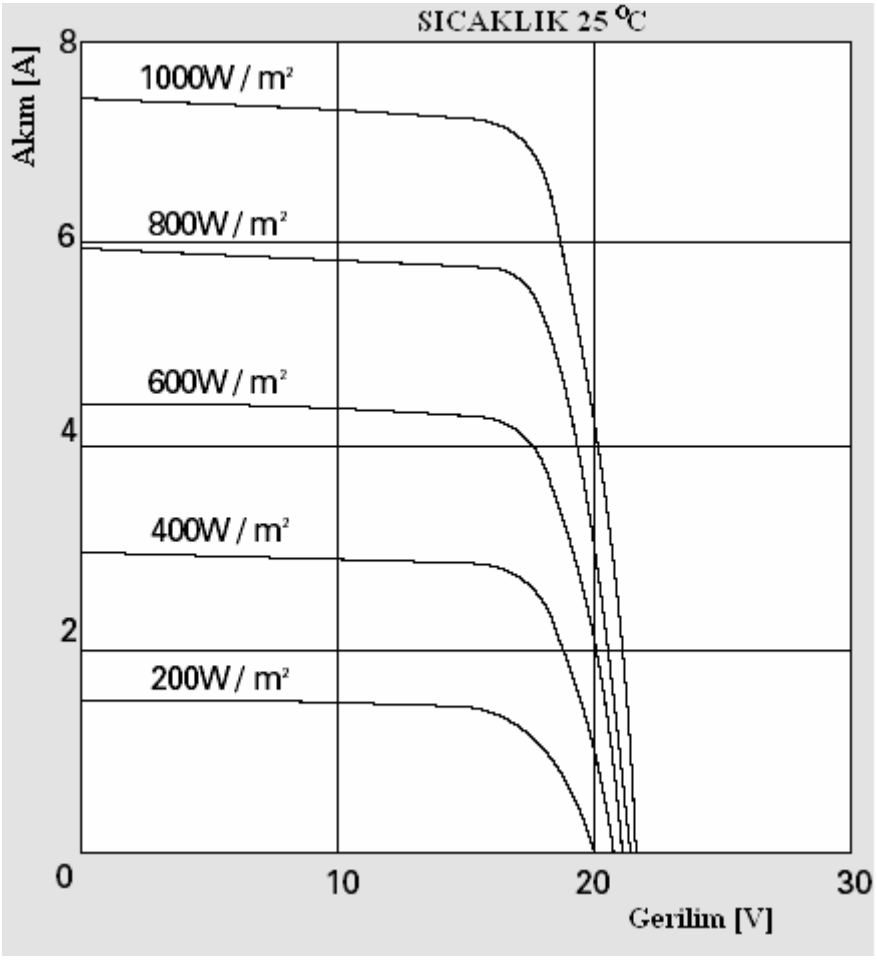
Bu bölümde ilk olarak ticari bir GH panelinin etiket değerleri ve 3. Bölümde incelenen 4 parametreli GH modelinden elde edilen I-V verileri kullanılarak basit bir sistemin modellenmesi ve analizi üzerinde durulmuştur. Bu ön çalışma ile, GH içeren bir sistemin dinamik olarak MATLAB Simulink ortamında modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün ikinci ayrıtında uygulaması yapılacak olan şebeke bağlantılı geridönüşlü dönüştürücünün çalışma prensipleri ve tasarım kriterleri incelenmiş, sistemin DA/DA dönüştürücü olarak ve doğrultulmuş sinüs dalga modülasyonlu DA/DA dönüştürücü olarak çalışması simülasyonlarla incelenmiştir. Bu bölümün son ayrıtında tasarlanan uygulama devresi ile ilgili bilgiler ve deneysel sonuçlar verilmiştir.

6. 1. GH Etiket Değerlerinden Faydalanılarak Modelleme ve Simülasyon

GH içeren bir sistemin MATLAB Simulink ortamında modellenebilmesi için farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Genel olarak Bölüm 3'de incelenen farklı modeller analitik bağıntılar yardımıyla giriş-çıkış fonksiyonları ile modellenebileceği gibi, daha basit olması nedeniyle tablo yardımı ile modelleme yaklaşımı da kullanılabilir. Tablo için gerekli giriş çıkış verileri yine bölüm 3'de verilen modelleme yöntemlerinden herhangi biri ile yapılabilir. İlk yaklaşım olarak, sıcaklığın GH karakteristiği üzerindeki etkileri göz ardı edilerek bir simülasyon modeli oluşturulması amaçlandığından bölüm 3'de verilen 4 parametre modeli kullanılmıştır. Bu model için gerekli olan parametreler, daha sonra pratik uygulamada da kullanılacak olan (Kyocera) KC-120 güneş panelinin etiket ve katalog değerlerinden elde edilmiştir. Şekil 6.1'de KC-120 panelinin üretici firma tarafından verilen ışımaya bağlı akım-gerilim grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen farklı ışımalardaki V_{oc}, V_{mpp}, I_{sc}, ve I_{mpp} değerleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Dikkat edilirse, bölüm 3'de açıklanan 4 parametre modelinin gerektirdiği bu parametreler, üretici firma bilgilerinden doğrudan elde edilebilmektedir.

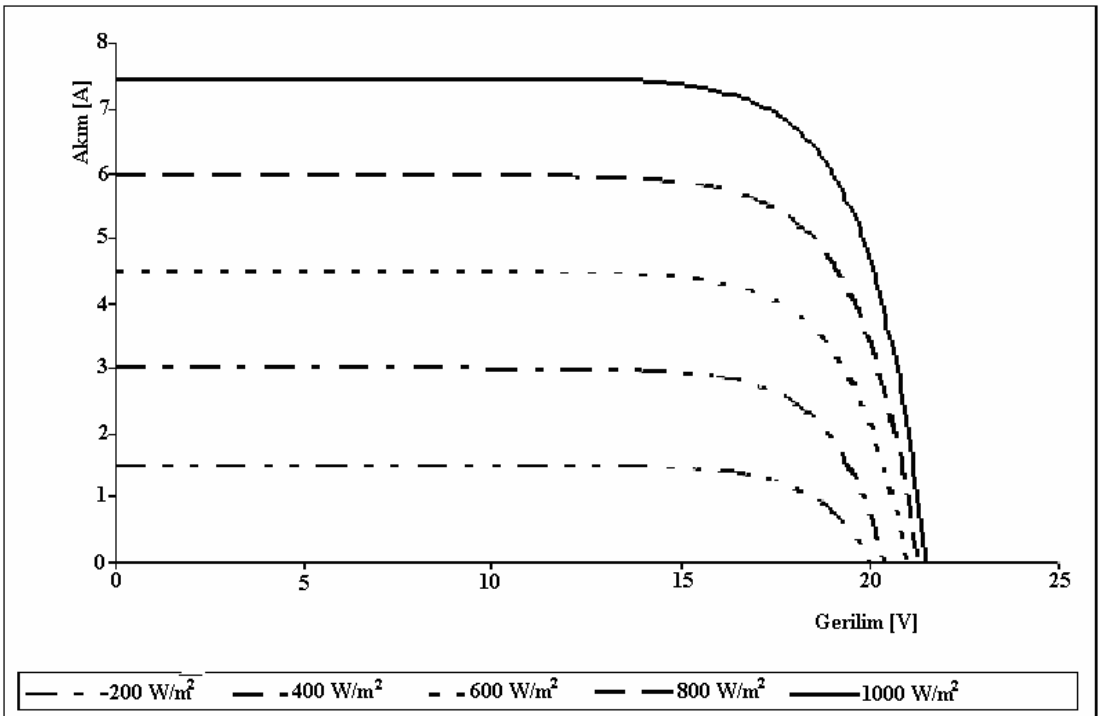
Tablo 6.1: KC-120 güneş panelinin etiket ve katalog bilgilerinden elde edilen değerler

Işıma [W/m^2]	V_{oc} [V]	V_{mpp} [V]	I_{mpp} [Amp]	I_{sc} [Amp]	P_{tip} [W]	P_{max} [W]	FF
1000	21.60	17.83	6.95	7.45	160.175	120	0.749
800	21.35	17.66	5.56	5.90	126.948	98.18	0.744
600	21.14	16.81	4.23	4.42	93.870	71.19	0.745
400	20.7	16.73	2.78	2.96	60.792	46.59	0.758
200	20.00	16.52	1.37	1.47	29.800	22.64	0.757

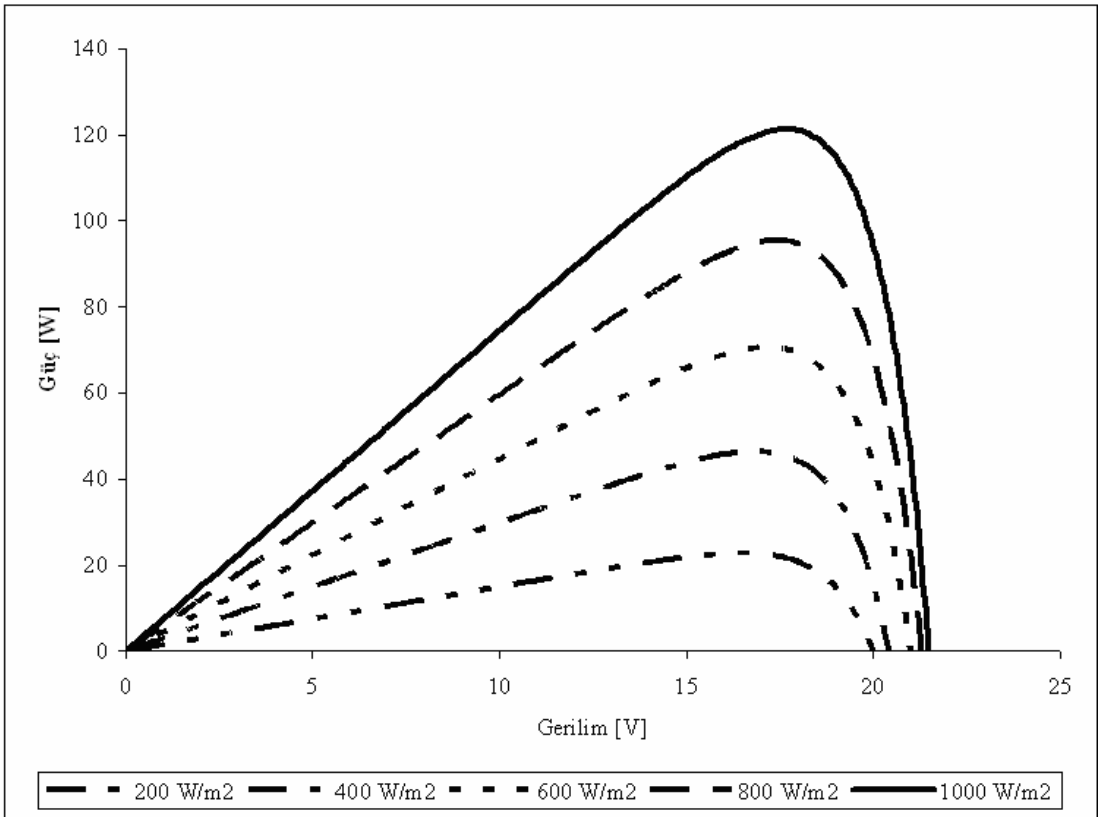


Şekil 6.1: KC-120 güneş paneli akım-gerilim karakteristik eğrileri [Katalogdan]

Bölüm 3'te verilen (3.11)-(3.13) denklemleri ve Tablo 6.1'deki değerler kullanılarak KC-120 paneli için akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri elde edilmiştir. Elde edilen bu karakteristiklerin akım-gerilim grafikleri Şekil 6.2'de ve güç-gerilim grafikleri Şekil 6.3'te verilmiştir.

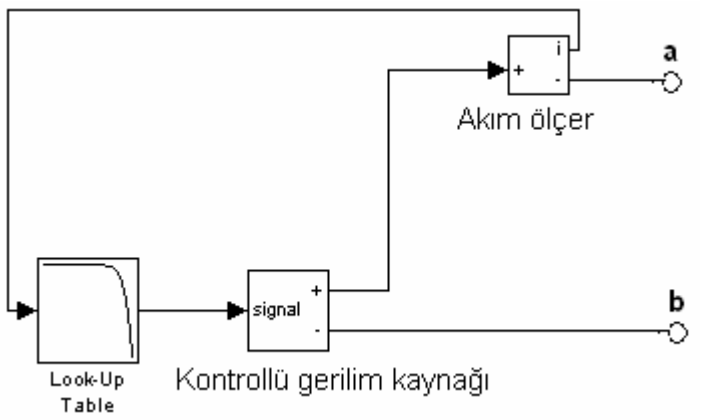


Şekil 6.2: Dört parametre modeli ve Tablo 6.1 bilgilerinin kullanımı sonucunda KC-120 paneli için elde edilen akım-gerilim grafikleri



Şekil 6.3: Dört parametre modeli ve Tablo 6.1 bilgilerinin kullanımı sonucunda KC-120 paneli için elde edilen güç-gerilim grafikleri

Bu değerler Matlab-Simulink içerisinde yer alan ve belirli giriş değerlerine karşılık çıkış üretmek amacıyla kullanılan "Look-Up Table" bloğunun giriş -çıkış değerleri olarak tanımlanmıştır. Bu giriş-çıkış bloğu, yine Matlab-Simulink'te yer alan bağımlı gerilim kaynağı, akım ölçme blokları ile birlikte kullanıldığında, genel olarak güneş paneli sistemlerin modellenmesi için kullanılabilecek ve oldukça pratik bir kaynak modeli elde edilmiş olur. Şekil 6. 4'te bu model gösterilmiştir.



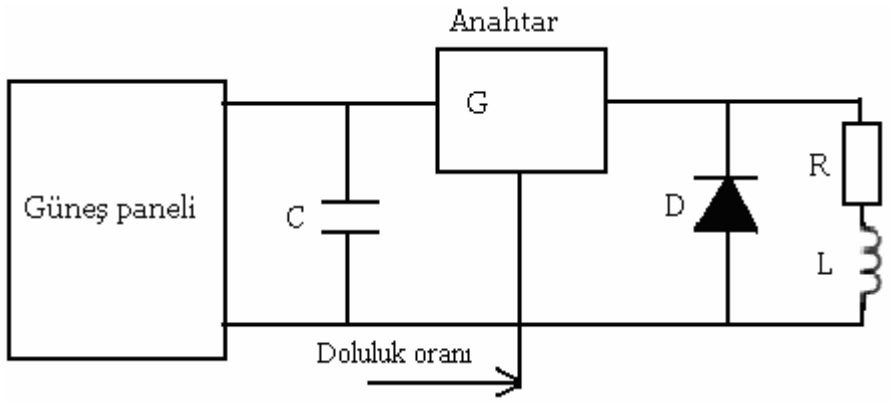
Şekil 6.4: Güneş paneli sistemi için pratik bir kaynak model

Bu model yardımı ile a-b uçları arasına bağlanacak her hangi bir aktif (örneğin d.a. motoru) veya pasif alıcının, güneş paneli ile birlikte çalıştığı durumdaki performans analizi yapılabilmektedir. Ayrıca, Simulink-(Power Systems Toolbox) güç sistemleri araç blokları kullanılarak, daha karmaşık sistemlerin (örneğin maksimum güç noktası izleyicilerin) modellenmesi mümkün olmaktadır.

İlk simülasyon çalışmasında 1000W/m^2 ışımada modellenen güneş paneli, basit bir düşürücü DA/DA dönüştürücü üzerinden, paneli maksimum güç noktasından farklı bir noktada yükleyen bir direnç bağlı şekilde modellenmiştir. Bu çalışmanın devre modeli şekil 6.5'de verilmiştir.

İlk çalışmada doluluk oranı 1 yapılarak, panelin doğrudan yüke bağlı olduğu durum modellenmiş ve daha sonra doluluk oranı teorik olarak hesaplanan maksimum güç noktasında çalışmasına olanak veren değere ayarlanmıştır. Tablo 6.1'den yararlanarak panelin optimum direnci Denklem (6.1) ile bulunur.

$$R_{opt} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} = \frac{17.83[V]}{6.95[Amp]} \cong 2.57\Omega \tag{6.1}$$



Şekil 6.5: Düşürücü DA/DA dönüştürücülü MGN dışında yüklenmiş basit bir sistem

Yük direnci 1.5Ω alınırsa, yükü maksimum güç noktasında çalıştıracak görev oranı,

$$R_{yük}' = \frac{R_{yük}}{D^2} \tag{6.2}$$

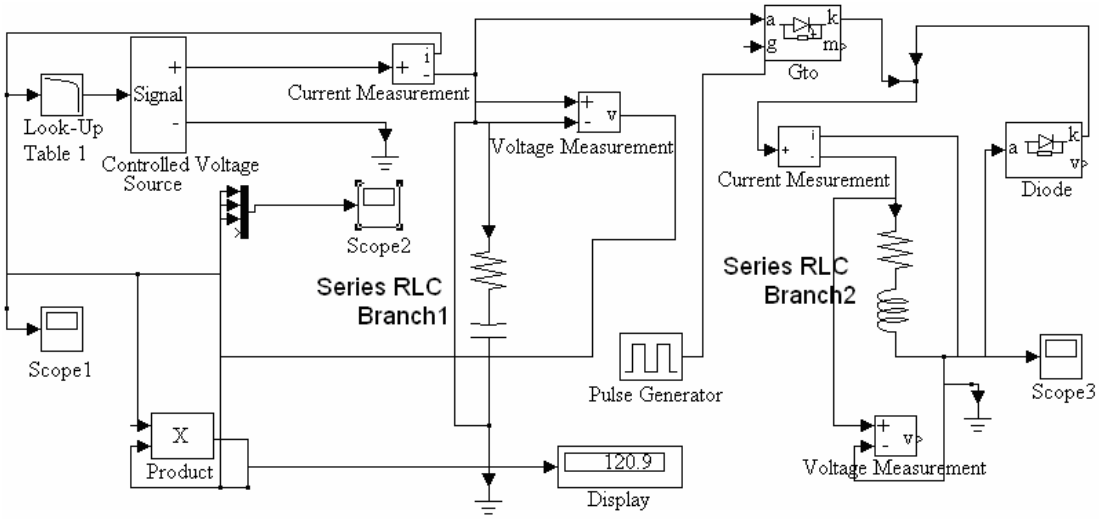
denkleminden yararlanarak ve eşitliğin sağ tarafını optimum yüke eşitleyen değer Denklem (6.3)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$R_{yük}' = R_{opt} \Rightarrow \frac{1}{D^2} = 2.57 \Rightarrow D \cong 0.62 \tag{6.3}$$

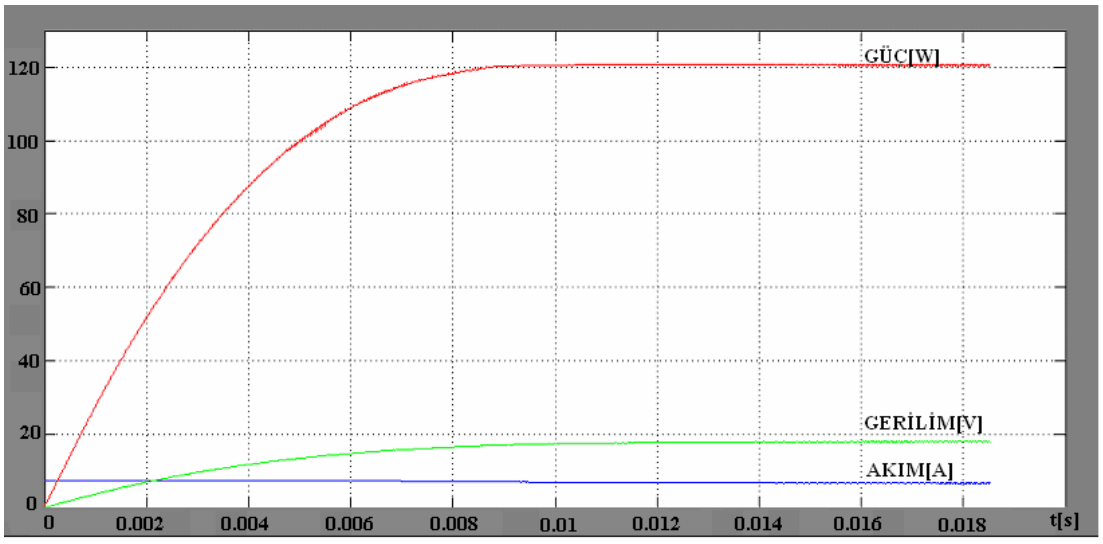
Panel geriliminin anahtarlamadan dolayı oluşan dalgalanmasını en aza indirmek için bir tampon kondansatör kullanılmıştır. Tampon kondansatörün kapasitesi yükseldikçe, dalgalanma azalmakta ve çalışma noktasındaki değişimler en aza indirilebilmektedir. Bununla birlikte, kondansatör kapasitesinin büyümesi, simülasyon süresini önemli ölçüde arttırmaktadır.

Şekil 6.6'da düşürücü DA/DA dönüştürücü ve GH içeren sistemin MATLAB Simulink modeli verilmiştir. Devrede kullanılan darbe üreticinin doluluk oranı 0.65, genliği 1 ve periyodu 0.5 ms alınmıştır. RLC (series branch 1) elemanlarından R=0.1 Ohm , L=0 ve C= 2000 μF alınmıştır. Diğer RLC (series branch 2) elemanları R=1.5 Ohm, L=1mH ve C=inf alınmıştır. Bu devrenin akım, gerilim ve güç

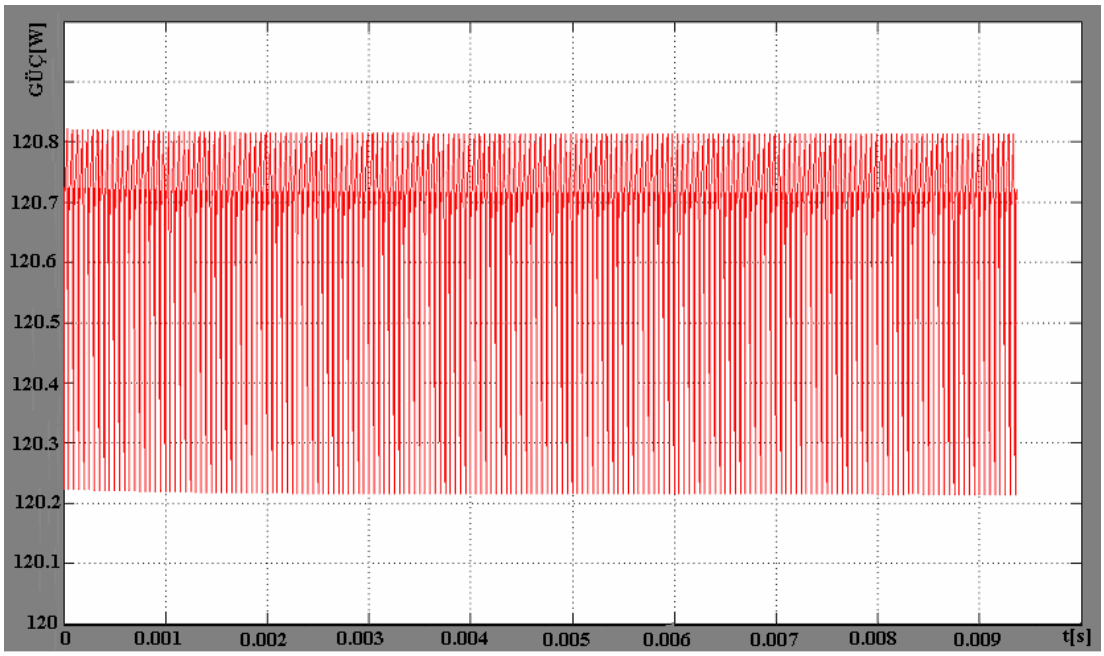
değişimlerine ait simülasyon sonuçları Şekil 6.7'den Şekil 6.10'a kadar olan şekillerle verilmiştir. Şekil 6. 7 incelendiğinde akım gerilim ve güç değişiminin beklenen şekilde olduğu, gücün üstel olarak artarak maksimum güç noktasını yakaladığı ve bu nokta etrafında sabitlendiği açıkça görülmektedir. Şekil 6. 8'den de gücün maksimum güç noktası etrafındaki salınımı açıkça görülmektedir. Salınım oldukça küçük (yaklaşık 0.6 W) bir değerde kalmaktadır. Şekil 6.9'da sistem MG noktasında çalışırken akımdaki salınımın makul bir değerde (yaklaşık 0.07 A) olduğu gözlenebilir. Şekil 6.10'da ise sistem MG noktasında çalışırken gerilimdeki salınımın oldukça küçük (yaklaşık 0.1 V) olduğu görülmektedir.



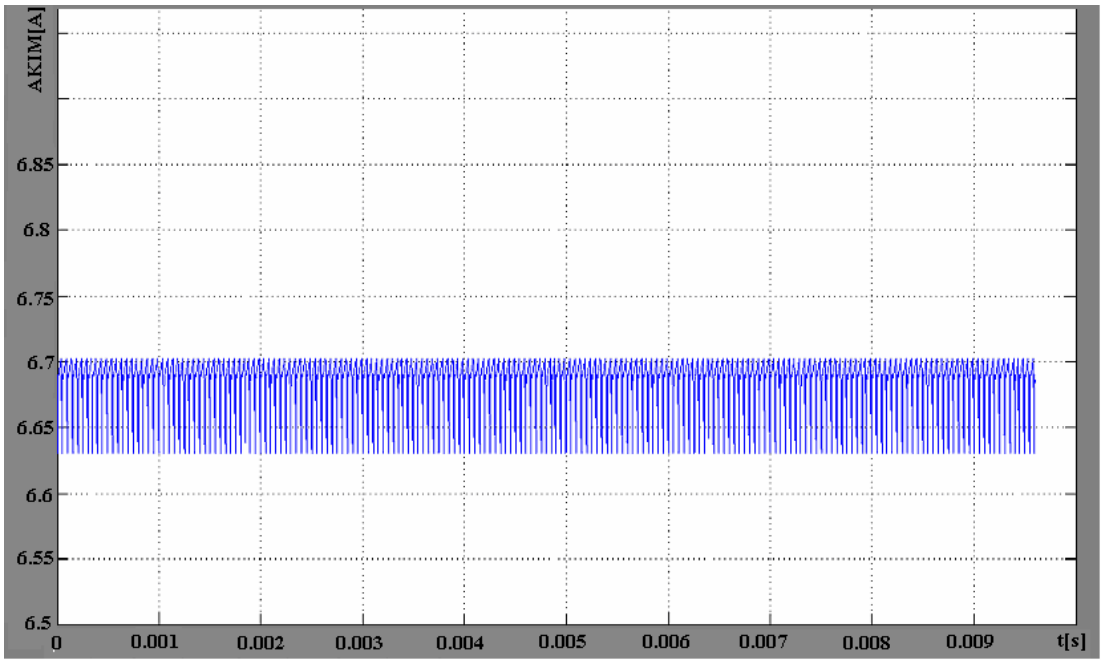
Şekil 6.6: Düşürücü DA/DA dönüştürücü ve GH içeren sistemin MATLAB Simulink Modeli



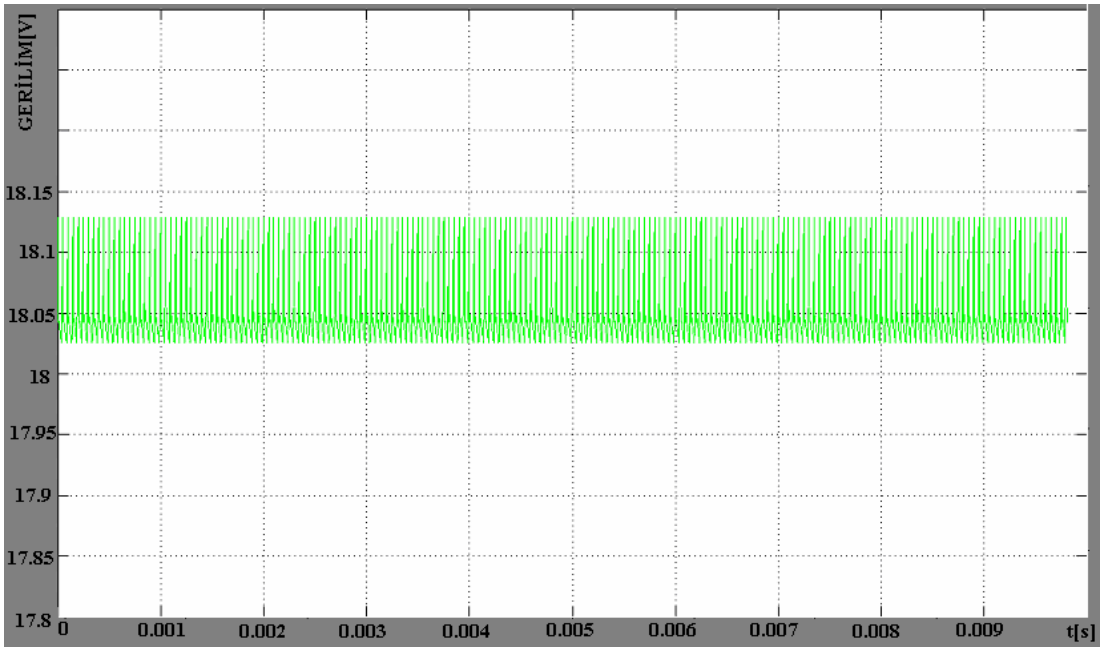
Şekil 6.7: Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin akım, gerilim ve güç değişimleri



Şekil 6.8: Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin MG noktasındaki güç salınımı



Şekil 6.9: Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin MG noktasındaki akım salınımı



Şekil 6.10: Çalışma noktası MG Noktasına getirilmiş GH sisteminin MG noktasındaki gerilim salınımı

6.2. Geridönüşlü Dönüştürücünün DA/DA Dönüştürücü Olarak Çalışması

Ayrıt 4.2.4'te incelenen geridönüşlü dönüştürücü, kaynak ile çıkış arasında elektriksel yalıtım sağlaması ve modülasyona uygun olması nedeni ile şebeke bağlantılı güneş enerjisi sistemlerinde son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. [48,49]. Basit yapısı ve özellikle az sayıda anahtarlama elemanı içermesi geridönüşlü dönüştürücünün tercih edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Temel geridönüşlü dönüştürücü yapısı ve dalga şekilleri Şekil 6.11 (a), (b) ve (c)'de görülmektedir. Şebeke bağlantılı sistemlerde genellikle kesintili akım veya sürekli-süreksiz akım sınır bölgesinde çalışma tercih edilmektedir [48,49]. Dönüştürücüde kullanılan transformatör, enerjinin kaynaktan yüke transferinde bir depolama elemanı olarak görev yapar. En basit analiz enerji aktarımını iki evreye ayırarak yapılabilir. Birinci evrede primer sargıya bağlı anahtar elemanı iletime sürülerek akımın doğrusal olarak yükselmesi sağlanır. Bu esnada sekonder diyotu kesime kutuplandığı için sekonderden akım geçmez. Yükselen akım nedeni ile transformatörde bir enerji depo edilmektedir. Depo edilen enerji Denklem (6.4) ile verilir.

$$E = \frac{1}{2} I_{\max}^2 L \tag{6.4}$$

Primer anahtarı kesime sokulduğunda primer sargı polaritesi tersine döneceğinden sekonder diyodu iletime geçer ve biriken enerji yüke aktarılır. R tipi yük için sekonder akımı ve gerilimi kısa süreli ve yüksek değerli darbeler şeklindedir. Bu gerilim darbelerinin önlenmesi için yüke paralel bir kondansatör bağlanır. Bu kondansatör yük geriliminin ortalama bir değerde sabitlenmesine ve akımın doğrusal olarak azalan bir şekle getirilmesine olanak sağlar. Sekonder akımının doğrusal olarak azalan bu değişimi primerdeki artışın tersi olarak yorumlanabilir. Enerji aktarımı açısından primerde depo edilen enerjinin ikinci evrede kondansatör ve yüke aktarıldığı görülmektedir. Bu incelemeden primer ve sekonder arasındaki magnetik kuplajın son derece önemli olduğu görülmektedir. Sargılar arasındaki kuplajın zayıf olması (kaçak akıların yüksek olması) durumunda depo edilen enerjinin sekondere aktarılamadan anahtar üzerinde gerilim yükselmesine yol açarak kayıplar oluşturacağı görülmektedir. Bu bakımdan geridönüşlü dönüştürücünün yüksek verimle çalıştırılabilmesi için en önemli koşullardan biri transformatörün kaçak akılarının olabildiğince düşük olmasıdır. Çıkış gerilimi ve akımının denetimi için primer anahtarlama elemanının görev oranı değiştirilir. Primer anahtarının bağıl olarak devrede kalma oranı yükseltildikçe, primer akımı daha yüksek değerlere çıkarak biriktirilen enerjinin artmasına ve çıkış geriliminin yükselmesine neden olur. Burada önemli olan, artan akım değerlerine karşılık primer bobinin doğrusallığını kaybedecek doyma bölgesine geçmesinin önlenmesidir. Bu nedenle tasarımda, kullanılan çekirdeğin doyma sınırı ve akımın en büyük değeri dikkate alınmalıdır. Doyma sınırının aşılmaması, belirli indüktans değerinin tutturulması ve yeterli enerjinin depo edilebilmesi için geridönüşlü dönüştürücü transformatörler hava aralığı içerecek şekilde tasarlanırlar.

İstenilen özelliklerde bir geridönüşlü dönüştürücü tasarımı için en önemli parametre primer bobinin indüktansının belirlenmesidir. Belirli bir giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve çıkış gücü için seçilmiş bir çalışma frekansında, görev oranının %50 olması

durumunda sürekli–süreksiz akım sınırında çalışacak geri dönüşlü dönüştürücü transformatörünün indüktansı aşağıdaki denklem (6. 5) ile verilir.

$$L_1 = \frac{V_i^2}{8V_o I_{oav} f} \tag{6.5}$$

Transformatörün dönüştürme oranı,

$N1/N2 = V_i/V_o$

şeklinde seçilir. Buradan verim %100 kabul edilirse,

$I_{iav}\ N1 = I_{oav}\ N2$

yazılabilir. D=0.5 için

$I_{max} = 4I_{iav}$

elde edilir.

Örnek olarak:

V_i=30 V

V_o=300 V

I_{oav}= 0.5 A

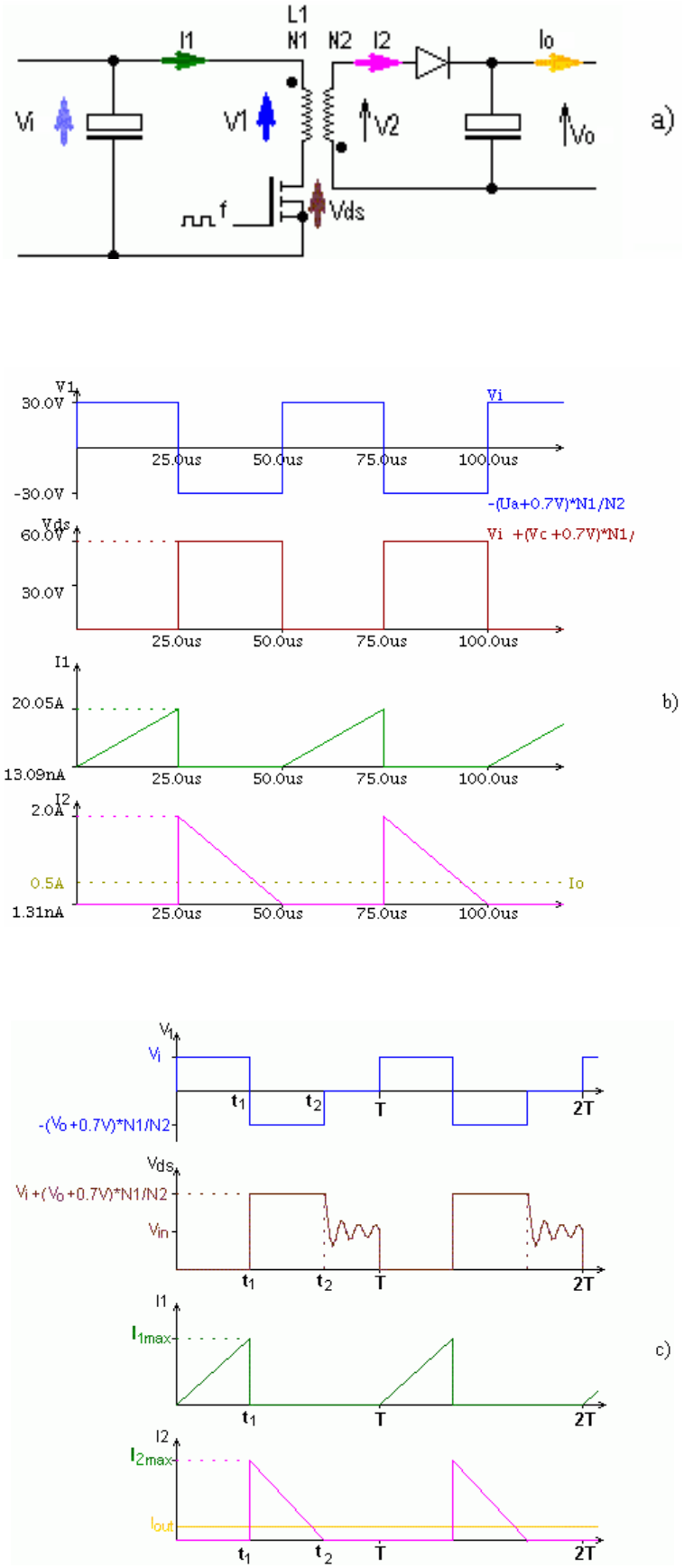
P=150 W

f=20 kHz olan bir geri dönüşlü dönüştürücü için,

L1 = 37.41 μH

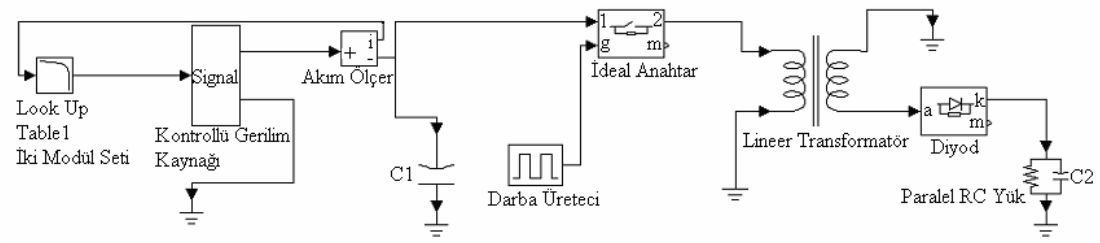
N1/N2 = 0.1

olarak hesaplanabilir. Sürekli çalışmada çıkış akımının 0.5 A ortalama değerde oluşması için giriş akımının 5 A'lik bir ortalama değere sahip olması gerekeceğinden, giriş akımının maksimum değeri 20 A olacaktır. Görev oranının %50 den düşük olması durumunda dönüştürücü süreksiz akımla çalışma bölgesine, büyük olması durumunda da sürekli akımla çalışma bölgesine geçecektir. Benzer şekilde çalışma frekansı, bobin indüktansı gibi parametrelerde oluşacak değişimler dönüştürücünün çalışma modunu etkileyecektir.

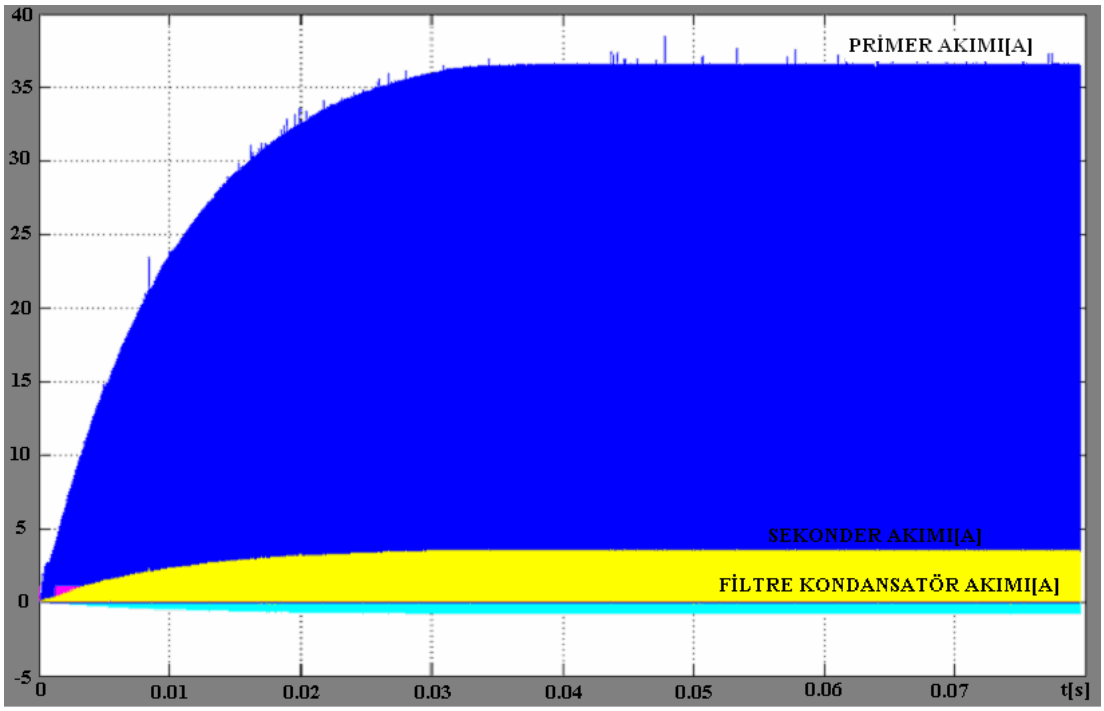


Şekil 6.11: Temel geridönüşlü dönüştürücü; a) devre şeması, b) örnek (sürekli mod) çalışma şekilleri, c) süreksiz mod çalışma şekilleri

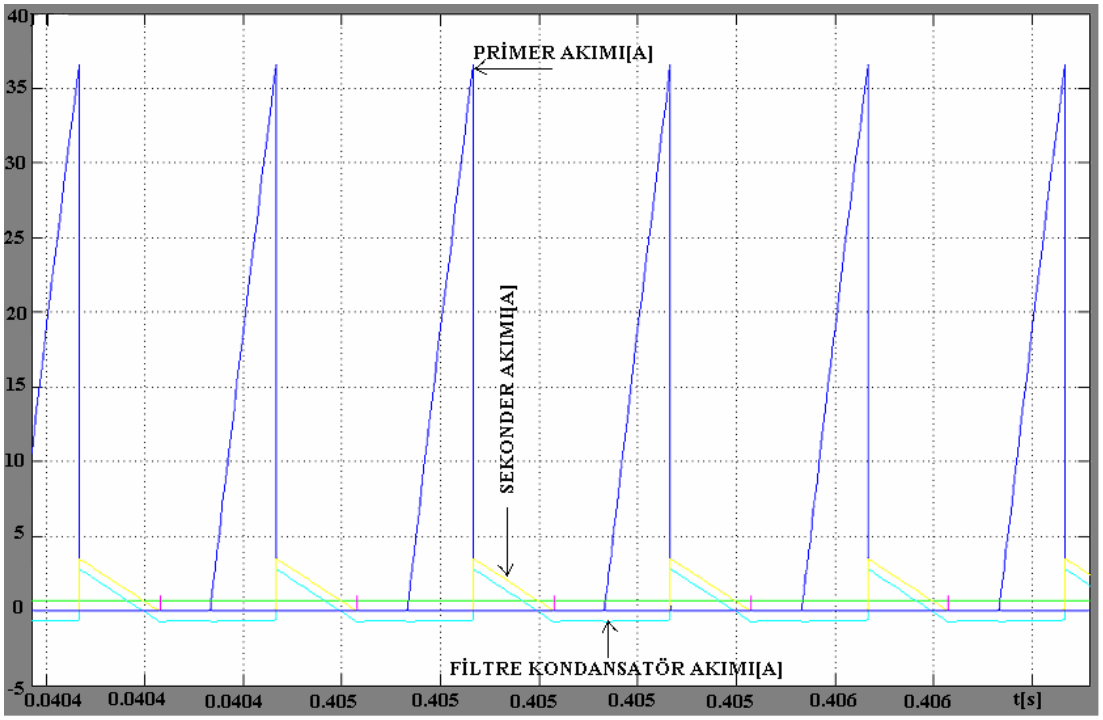
Geridönüşlü dönüştürücünün ideal doğru gerilim kaynağı yerine bir güneş panelinden beslenmesi durumunda, çalışma şeklinde bazı değişikler olur. Bu değişikliklerden en önemlisi güneş panelinin akım-gerilim karakteristiğinin ideal doğru gerilim kaynağından farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Akımdaki artışa bağlı olarak gerilimin düşmesi ve en önemlisi akımın kısa devre akımının üzerine çıkmaması, panelin geri dönüşlü dönüştürücünün performansını etkiler. Pratikte, daha önce de belirtildiği gibi, güneş panelinin çıkışına yüksek değerli bir elektrolitik kondansatör bağlanarak bu etkilerin giderilmesine çalışılır. Konunun daha iyi açıklanabilmesi için, güneş paneli ve düşürücü tip DA/DA dönüştürücünün incelendiği simülasyon çalışmasına benzer olarak, güneş panelinden beslenen geridönüşlü dönüştürücünün incelendiği bir başka simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu incelemede yukarıdaki panellerden iki tanesi seri bağlı olararak modellenmiştir. Panellere bağlı 2000µF'lık bir tampon kondansatörü kullanılmış, yük olarak 235 Ohm'luk bir direnç ve buna paralel 5µF 'lık bir filtre kondansatörü kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan devre modeli ve simülasyonda elde edilen grafikler sırası ile Şekil 6.12'den Şekil 6.19'a kadar olan şekillerle verilmiştir.



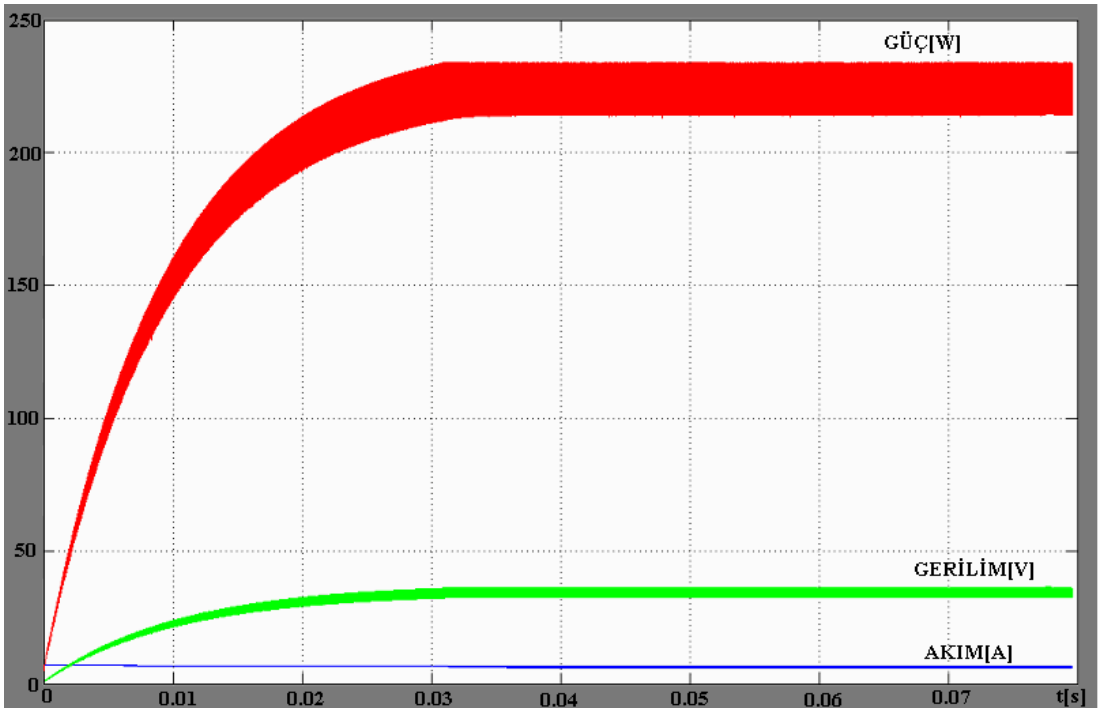
Şekil 6.12: Simülasyonda kullanılan devre modeli



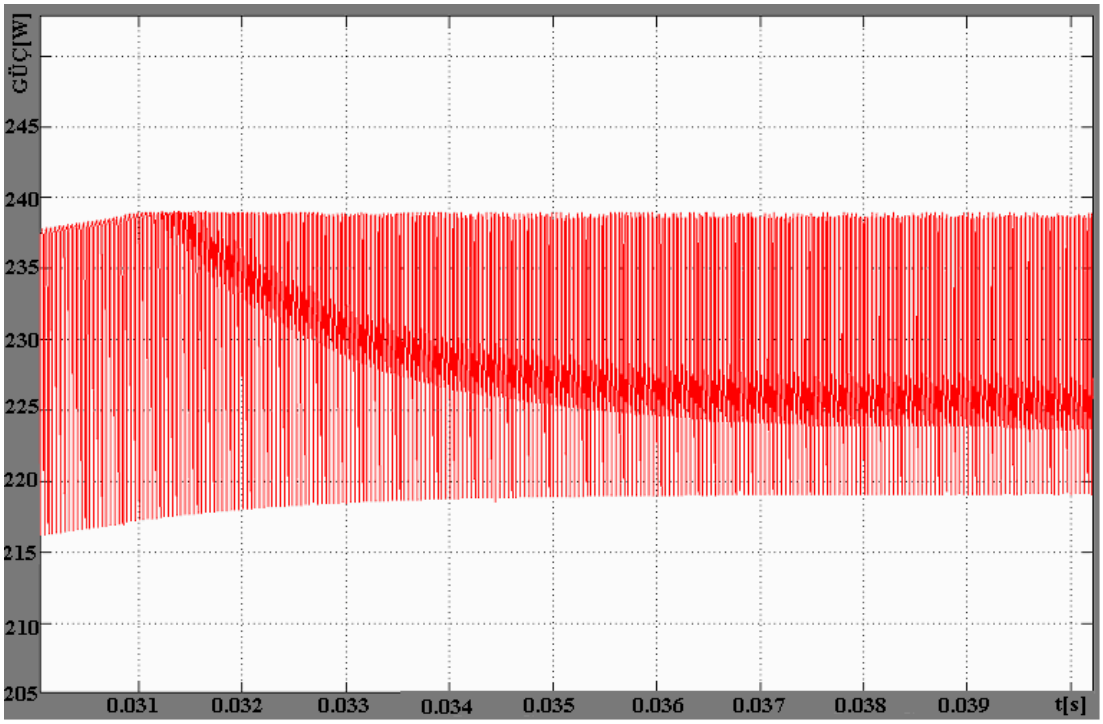
Şekil 6.13: Primer akımı, sekonder akımı ve filtre kondansatör akımının değişimi (C1=2000μF, C2=5μF ve R=375Ω)



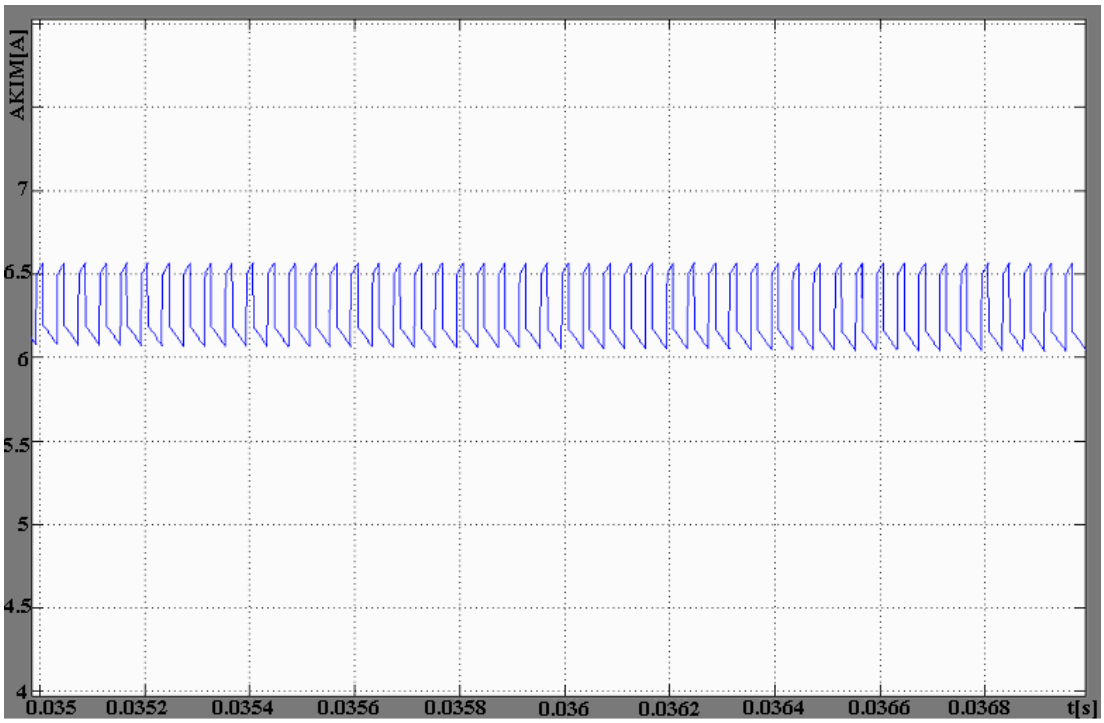
Şekil 6.14: Akımların detayı (primer akımı maksimum 36 amper)



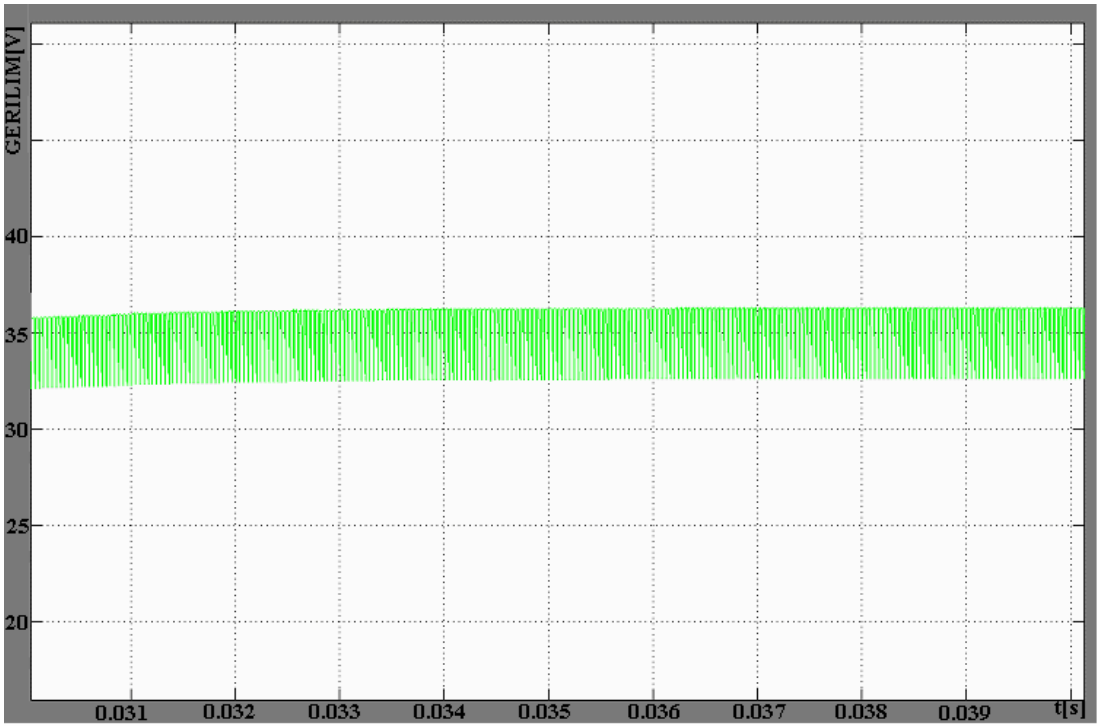
Şekil 6.15: İki panel seri bağlı durumda akım, gerilim ve güç (maksimum noktaya çok yakın bir çalışma)



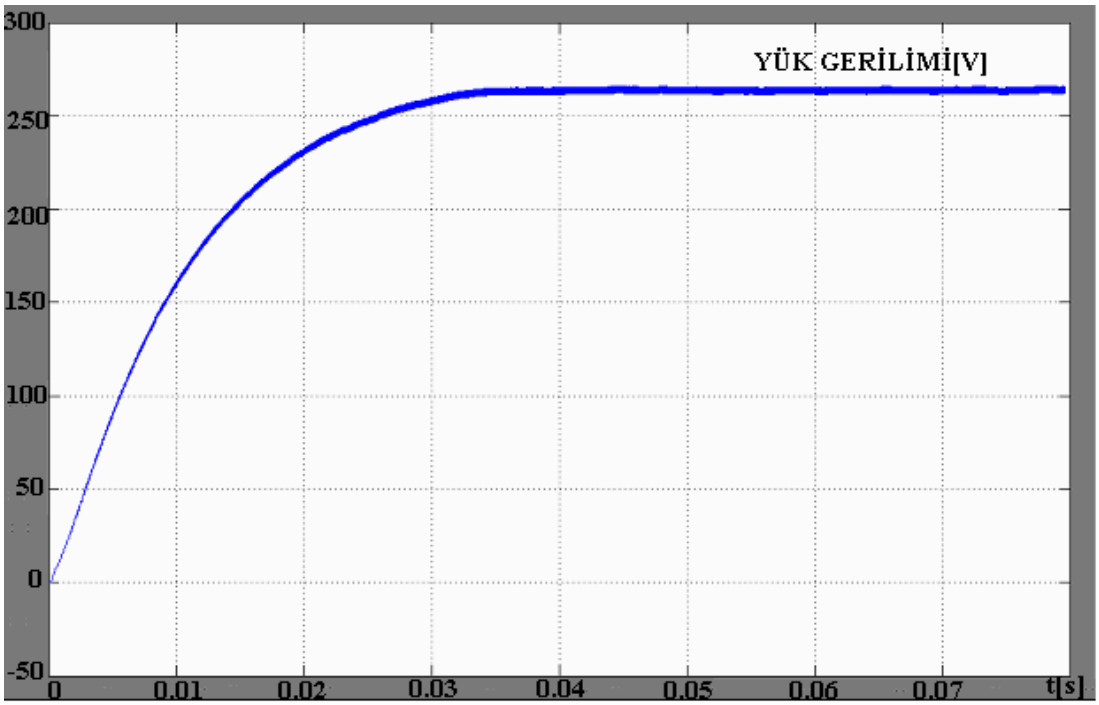
Şekil 6.16: Güç değişimi



Şekil 6.17: Akım değişimi



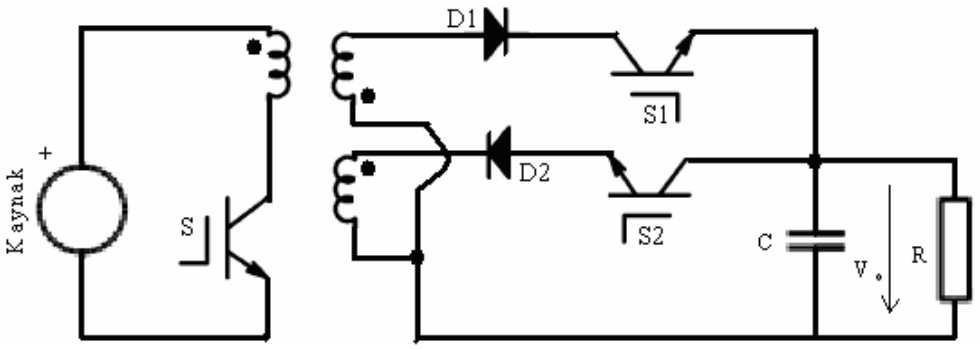
Şekil 6.18: Gerilim değişimi



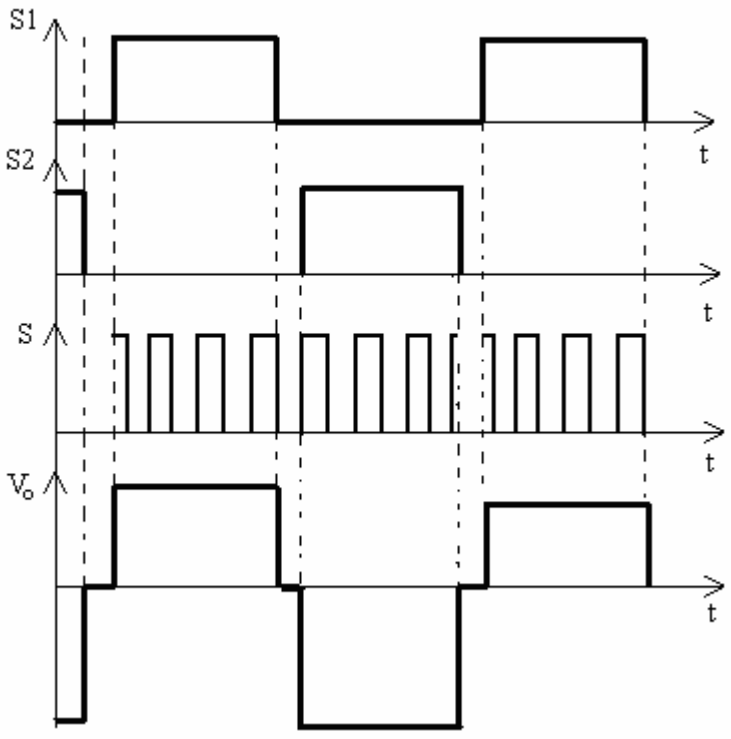
Şekil 6.19: Yük gerilimi değişimi

6. 3. Geridönüşlü Dönüştürücünün DA/AA Dönüştürücü Olarak Çalışması

Geridönüşlü dönüştürücünün simetrik orta uçlu sekonder sargılı bir transformatör ile tasarlanması durumunda, çıkışta zıt kutuplu iki eş gerilim seviyesi elde etme imkanı doğar. Sekonder sargılarına bağlanacak ek anahtar elemanları yardımıyla yük uçlarına belirli bir zamanlama ile alternatif bir gerilim oluşturmak mümkün olacaktır. Bu şekildeki bir geridönüşlü dönüştürücü devresi ve dalga şekilleri sırasıyla şekil 6.20 ve şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6.20: Simetrik sekonder sargılı geridönüşlü DA/AA dönüştürücü (evirici) devre şeması [48]

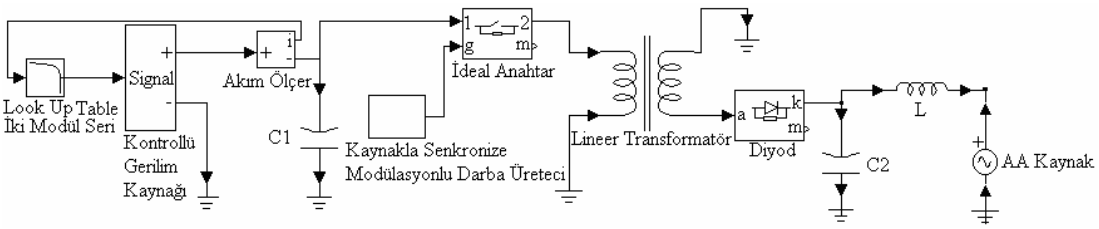


Şekil 6.21: Simetrik sekonder sargılı geridönüşlü DA/AA dönüştürücü (evirici) anahtarlama işareti ve çıkış dalga şekli

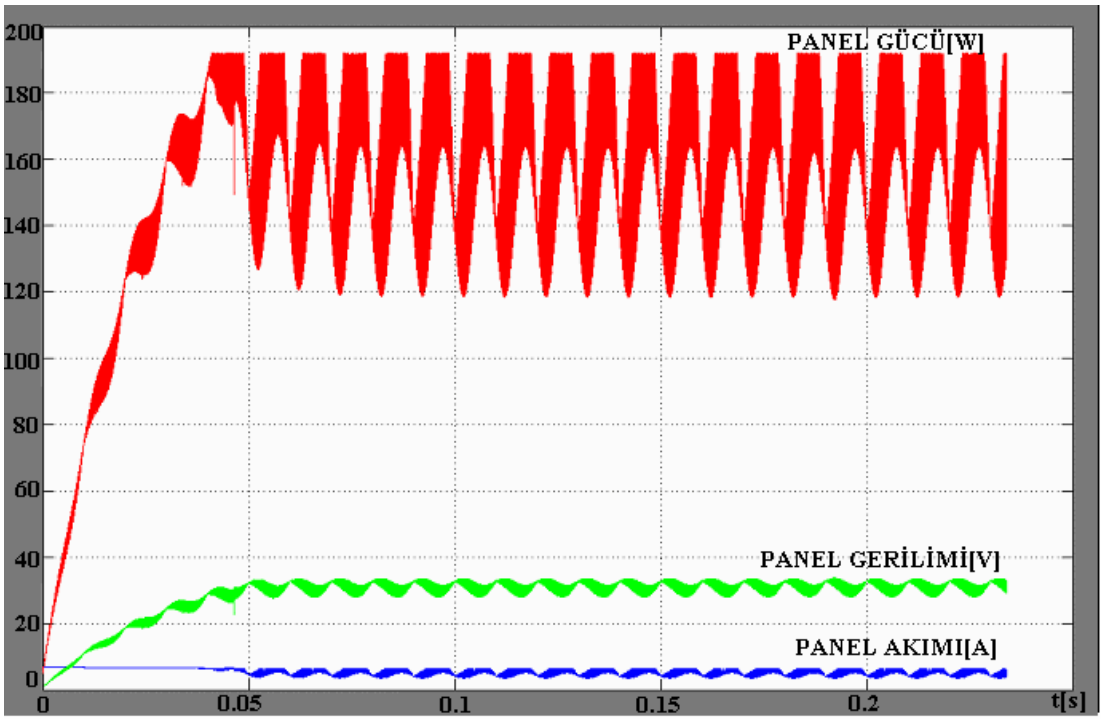
Bu şekildeki bir çalışmada çıkış geriliminin kutuplaşması S1 veya S2 anahtarlarının iletime sürülmesi ile sağlanmakta, çıkış geriliminin anlık değeri de S anahtarının görev oranı ile ayarlanabilmektedir. Daha da ilginç olarak, S anahtarının görev oranı veya primer akımının maksimum değeri (veya zarfı) zamana bağlı olarak tam dalga doğrultulmuş sinüs bir şekilde değiştirilirse, uygun alternanslarda S1 ve S2 anahtarları iletime sürülerek yük uçlarında yaklaşık olarak sinüs biçimli bir gerilim oluşturulabilir. Bu şekilde denetlenen geliştirilmiş geridönüşlü dönüştürücü, Pasif R yükü yerine, uygun bir filtre devresi üzerinden mevcut bir alternatif gerilim kaynağına (veya şebekeye) paralel bağlanma yeteneğine de sahiptir. S1 ve S2 anahtarları mevcut alternatif gerilim şebekesi ile senkronize olarak iletime sürüldüğünde, pozitif ve negatif alternanslarda, pasif yük yerine alternatif gerilim kaynağı uygun kutuplama ile sekondere bağlanmış olacağından, enerji aktarımına olanak verecektir.

Güneş paneli üzerinden beslenen geridönüşlü dönüştürücünün bir alternatif gerilim kaynağına paralel olarak çalışmasının incelenmesi için bir simülasyon çalışması

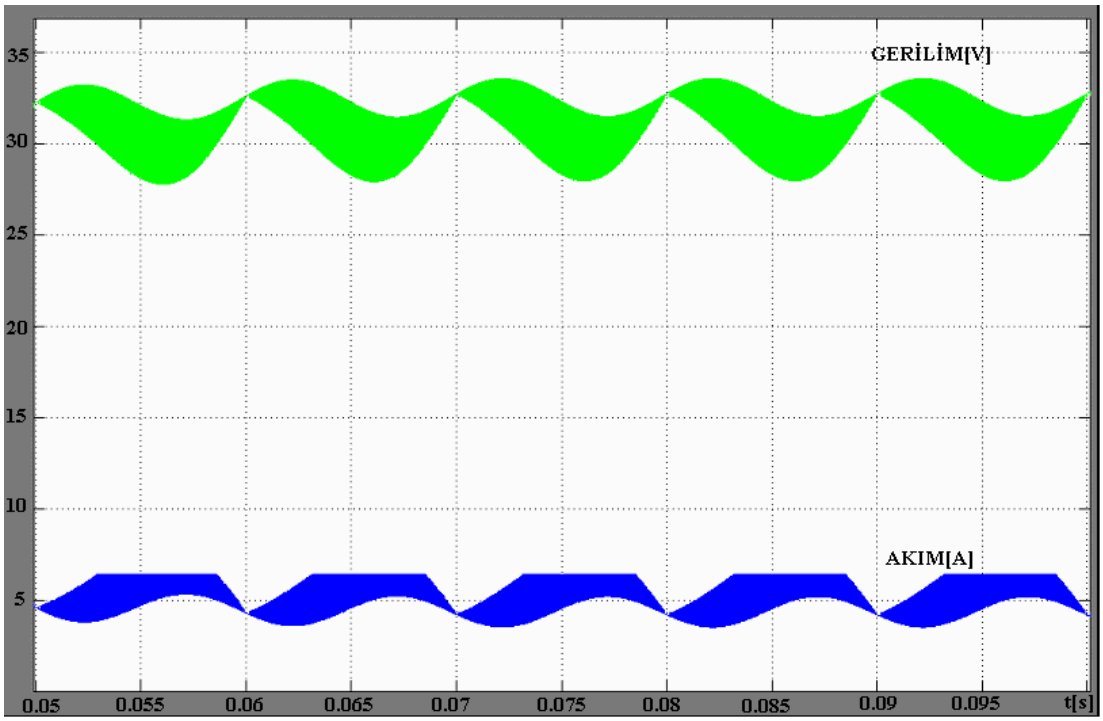
yapılmıştır. Burada kolaylık sağlaması amacıyla alternatif gerilim kaynağı tam dalga doğrultulmuş bir şekilde modellenmiştir. Bu sayede sekonderdeki anahtarların kullanılmasına gerek kalmadan sistemin çalışması incelenmiştir. Simülasyonda kullanılan devre şeması ve simülasyonda elde edilen grafikler sırası ile Şekil 6.22'den Şekil 6.30'a kadar olan şekillerle verilmiştir.



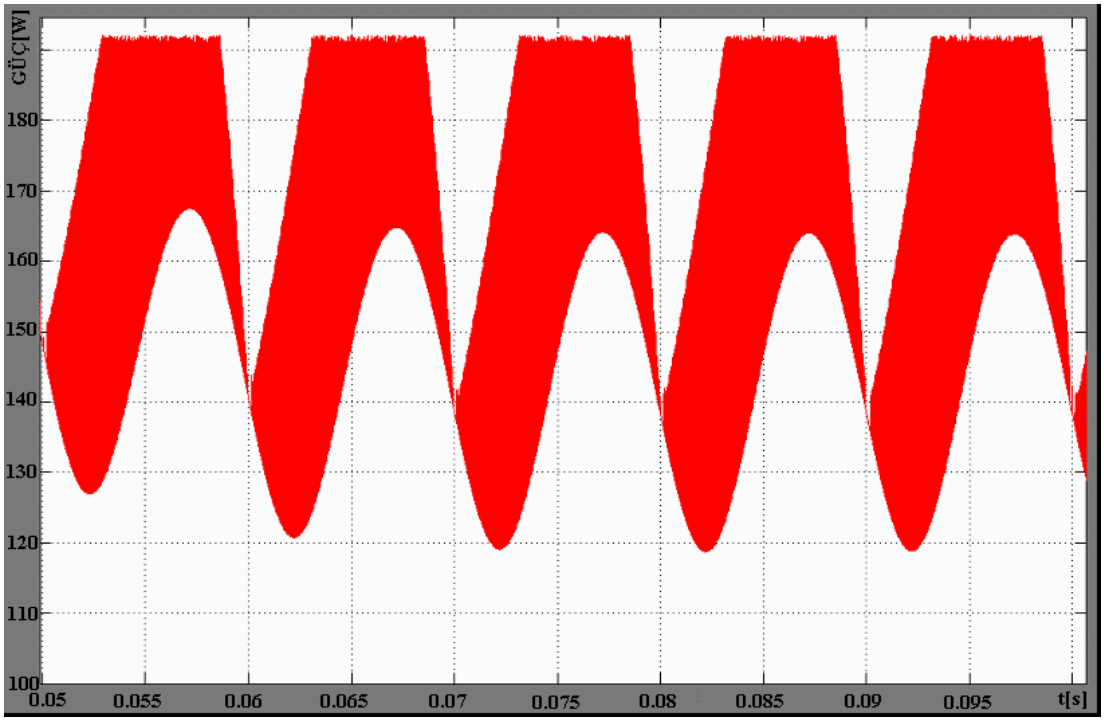
Şekil 6.22: Simülasyonda kullanılan devre şeması



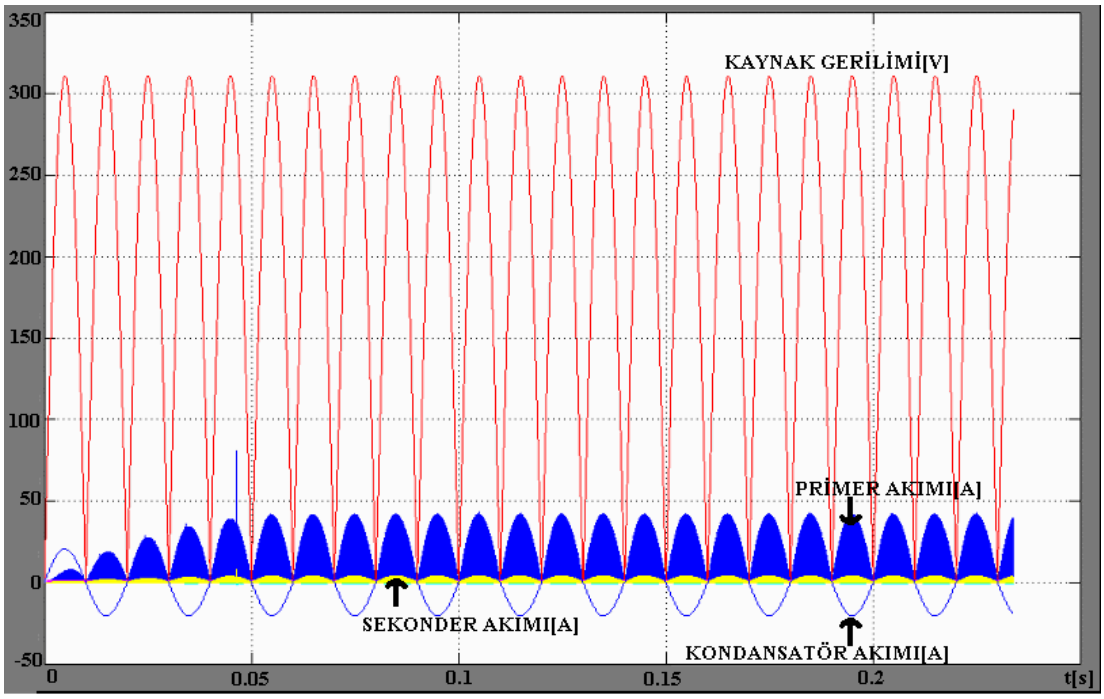
Şekil 6.23: Panel akım, gerilim ve güç değişimleri



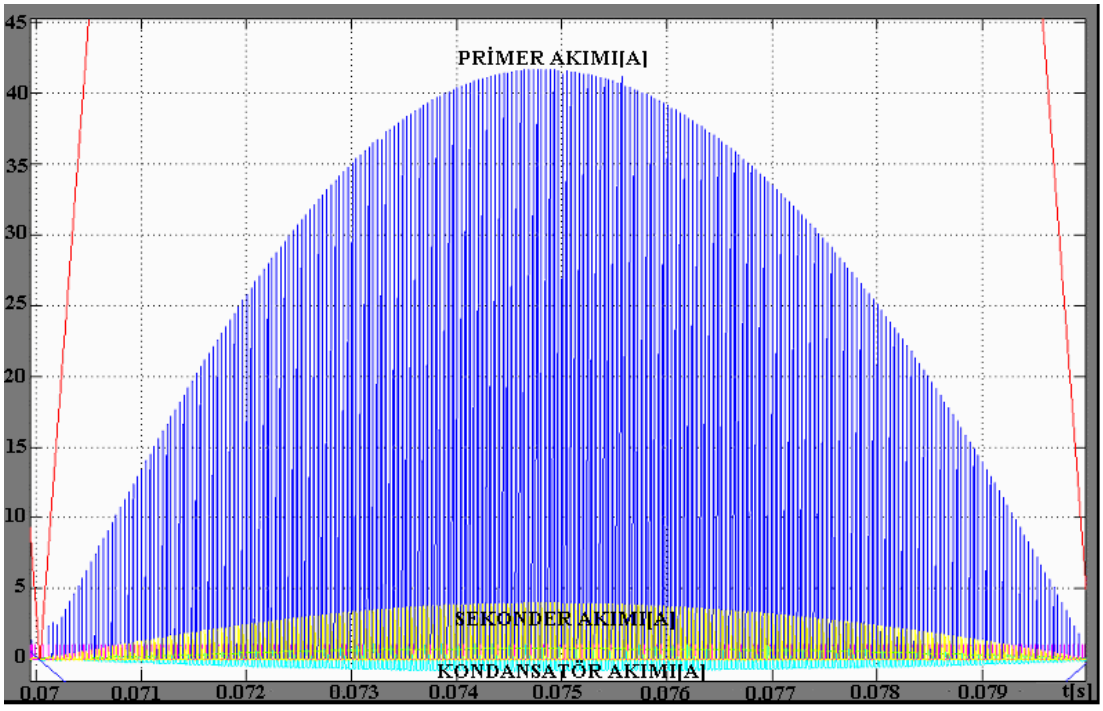
Şekil 6.24: Akım, gerilim değişimleri detay



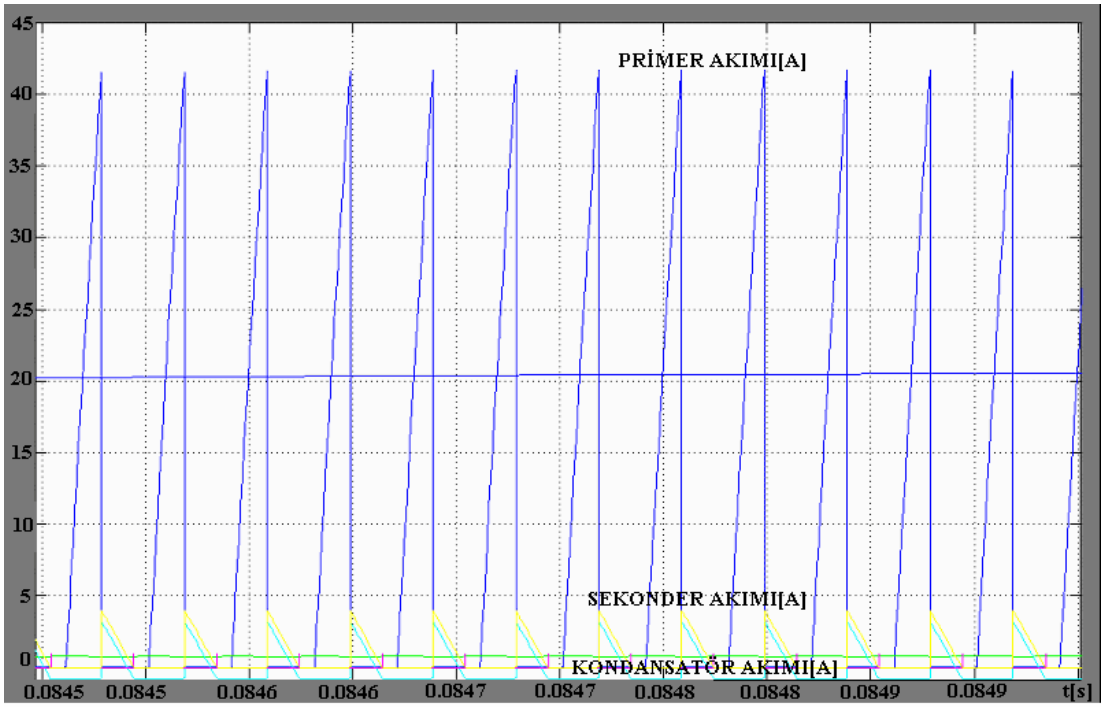
Şekil 6.25: Güç değişiminin detayı



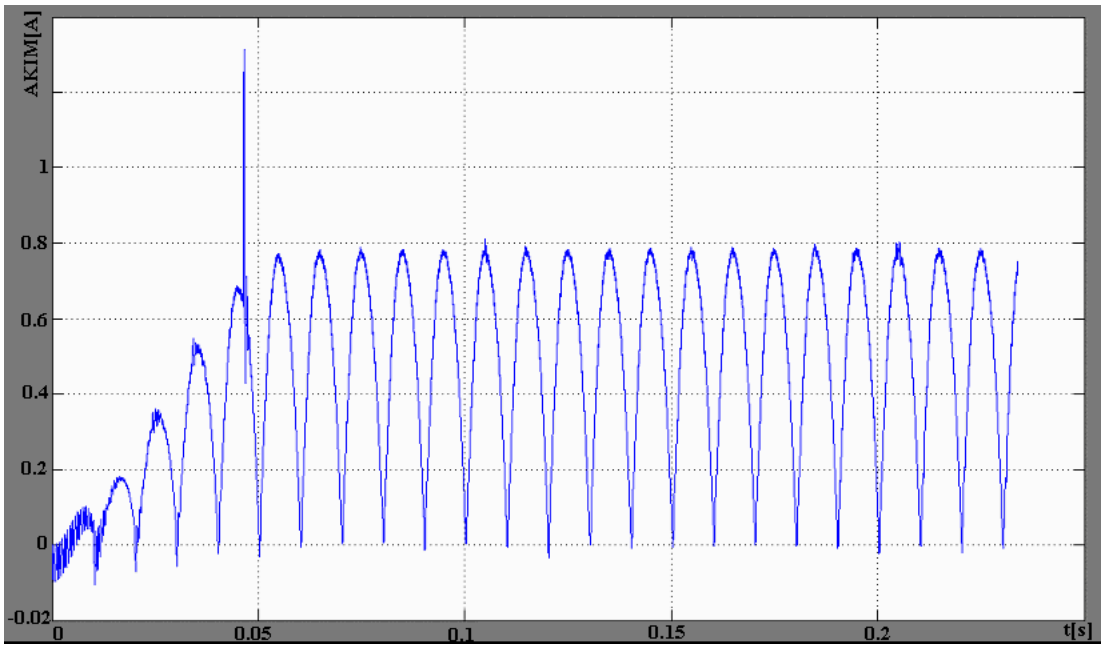
Şekil 6.26: Primer akımı, sekonder akımı, kondansatör akımı ve kaynak gerilimi değişimleri



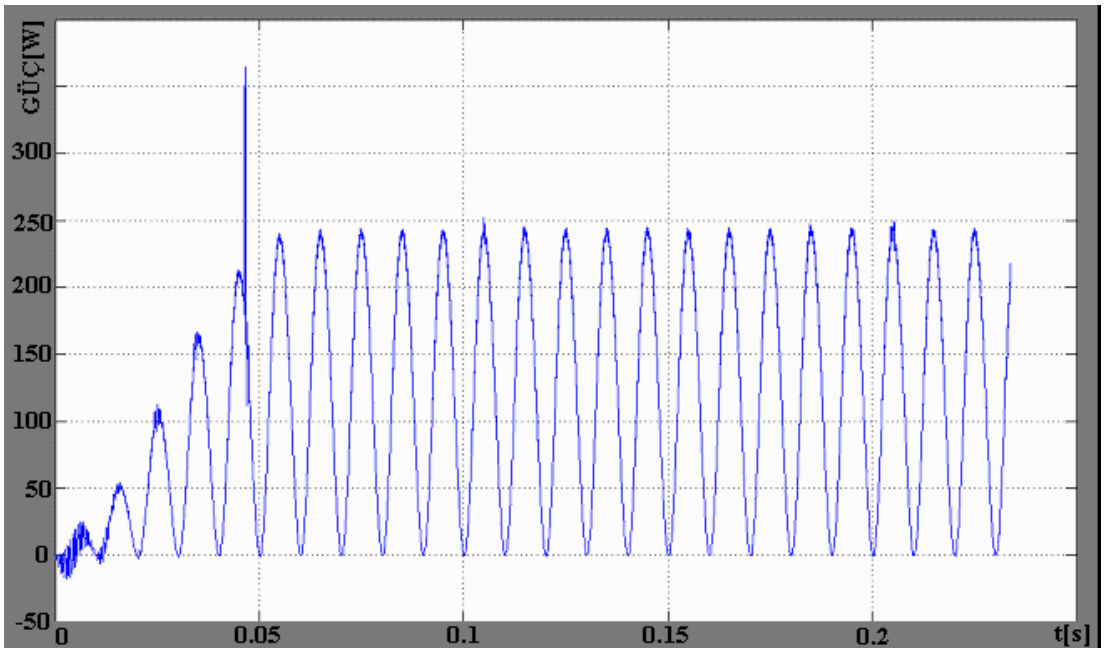
Şekil 6.27: Akım değişiminin detayı



Şekil 6.28: Akımların daha detaylı görünüşü



Şekil 6.29: Kaynağa aktarılan akımın değişimi



Şekil 6.30: Kaynağa aktarılan gücün değişimi

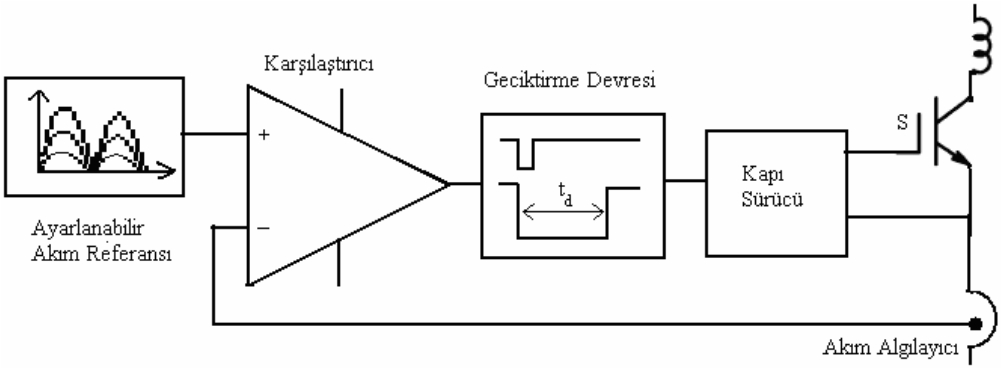
Simülasyon sonuçlarından, özellikle panele ait akım, gerilim ve güç değişimleri açısından literatürde henüz vurgulanmamış olan bazı önemli bulgular çıkartılabilir. Bir güneş panelini sabit gerilimli bir kaynaktan ayıran en önemli özellik maksimum güç noktası civarında akıma bağlı gerilim değişimlerinin oldukça yüksek düzeyde olmasıdır. Giriş gerilimi, kullanılan tampon kondansatörüne rağmen primer akımının modülasyonuna bağlı bir şekilde bir ortalama değer üzerine bindirilmiş sinüs biçimli bir değişim göstermektedir. Benzer şekilde panel akımı tampon kondansatör gerilimi düştüğü anlarda kısa devre akımına yükselmekte, gerilim yükseldiği halde ise daha düşük değerler almaktadır. Akım ve gerilimdeki bu dalgalanma doğal olarak panelden çekilen gücün ciddi oranda dalgalanmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda sabit çıkışlı DA/DA dönüştürücüden farklı olarak panelin maksimum güç noktasına çok yakın bir noktada çalıştırmak mümkün olamamaktadır. Bu durum şekil 6.24 ve 6.25'te açıkça görülmektedir. Bu anlamda böyle bir sistemde, uygulanacak maksimum güç izleme algoritmasının da maksimum güce en yakın güçte çalıştırılması şeklinde yorumlanması uygun olacaktır.

Literatürde yukarıda tanımlanan çalışma prensibine benzer ve yakın tarihlerde yayınlanmış bazı çalışmalar bulunmaktadır [48,49]. Bu çalışmalarda iki faklı denetim şekli benimsenmiştir. Bu çalışmalardan birinde geliştirilen sistemde, yüksek

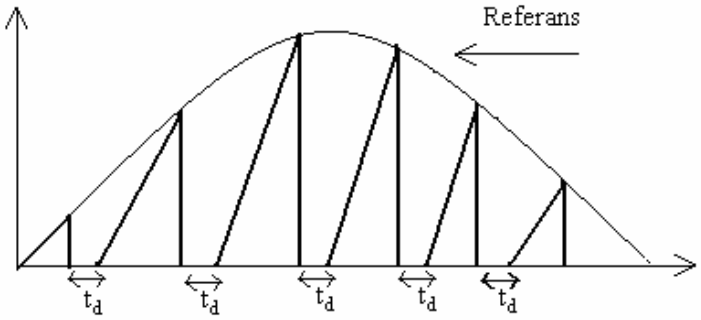
hesaplama yeteneğine sahip bir DSP ile düşük frekanslı (9.6 kHz) süreksiz akımla çalışma modunda, primer anahtarının darbe sürelerin sinüzoidal olarak denetlendiği bir çalışma şekli önerilmiştir [48]. Diğer yaklaşımda ise dönüştürücünün mutlak olarak sürekli-süreksiz çalışma sınırında tutulduğu, analog denetimli bir sistem önerilmiştir [49]. İki çalışma incelendiğinde birbirlerine göre bazı üstünlük ve sakıncalar içerdikleri görülmüştür. Kasa [48] tarafından önerilen düşük ve sabit frekanslı çalışma, ortalama akım ile maksimum akım arasındaki oranın aşırı yükselmesine ve çıkış akımının filtre edilmesinin güçleşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bu tip bir sistem dönüştürme oranının 1:1 olduğu bir transformatör ile uygulanmıştır. Japonya'da kullanılan ve nispeten düşük düzeyli 110 V alternatif gerilim şebekesi bu açıdan önemli bir avantaj sağlamıştır. Diğer yaklaşımda ise primer ve sekonder akımlarının sürekli olarak denetimi ile dönüştürücünün sınır modda çalışması sağlanmıştır. Bu sistemde, primer akımı istenilen değere yükselene kadar primer anahtarı iletimde tutulmakta, kesime sokulduktan sonra da sekonder akımının sıfıra düşmesi beklenmektedir. Bu şekilde, dönüştürücünün her koşulda sınır modda çalışması garanti edilmiş olmaktadır. Ancak referans akımın düşük değerleri için anahtarlama frekansının aşırı yükselmesi ve düşük referans değerlerinde çıkış akım dalga şeklinin bozulması bu yöntemin önemli bir sakıncasını oluşturmaktadır. Ayrıca yapılan simülasyon çalışmalarında, sürekli olarak sınır koşulda tutulan bir sistemde altenatif akım kaynağına verilen akımın dalga şeklinin sinüs biçiminden farklı bir şekil aldığı gözlenmiştir. Elde edilen bu bulgu [49] ile çelişmektedir.

Bu tez çalışması için önerilen yöntemde ise, yukarıda sözü edilen iki yöntemden farklı olarak, geridönüşlü dönüştürücü primer akımının bir akım algılayıcısı üzerinden ölçülerek maksimum değerinin referans olarak verilen doğrultulmuş sinüs formunu izlemesi sağlanmış ayrıca primer akımı maksimum değere ulaştığı anda kesime sokulan primer anahtarının sabit bir süre kesimde tutularak sekonder akımının sıfıra inmesi sağlanmıştır. Bu şekilde hem primer akımının mutlak olarak sinüzoidal bir zarfı izlemesi sağlanmış, hem de düşük akım referansının oluştuğu durumlardaki anahtarlama frekansındaki kontrolsüz artış önlenmiştir. Primer akımının zarfını oluşturacak referans akım, dönüştürücünün paralel çalışacağı şebeke geriliminin düşürülüp daha sonra tam dalga doğrultulması ile elde edilmiştir. Bu

referans akım, sürekli olarak akım sensöründen ölçülen primer akımı ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma bir işlemsel kuvvetlendirici ile yapılmıştır. Primer akımı o an için geçerli olan referans değerin altında kaldığı sürece primer anahtarı iletimde tutulmaktadır. Primer akımı referans değere ulaştığında, anahtar kesime sokulmakta ve belirli bir süre kesimde tutulmaktadır. Gecikme için basit bir tek kararlı multivibratör devresi kullanılmıştır. Bu şekilde dönüştürücünün yaklaşık olarak sabit bir frekansta çalışması sağlanmıştır Önerilen çalışma yönteminin prensip şeması ve referans dalga şekli sırası ile şekil 6.31 ve şekil 6.32'de verilmiştir.



Şekil 6.31: Önerilen sabit gecikmeli çalışma için denetim devresi prensip şeması

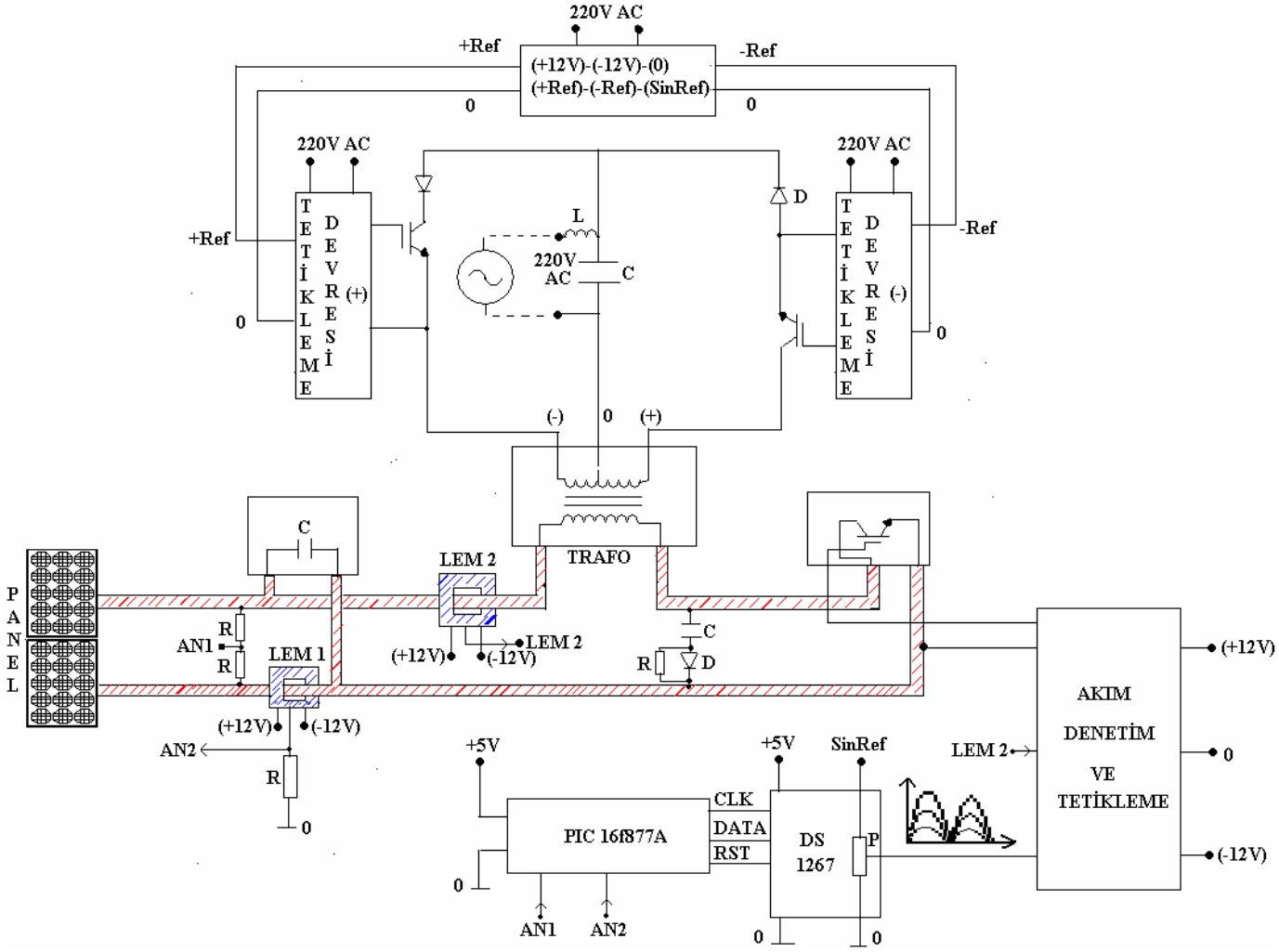


Şekil 6.32: Önerilen sabit gecikmeli çalışma için referans dalga şekli

6. 4. Deneysel Çalışmalar

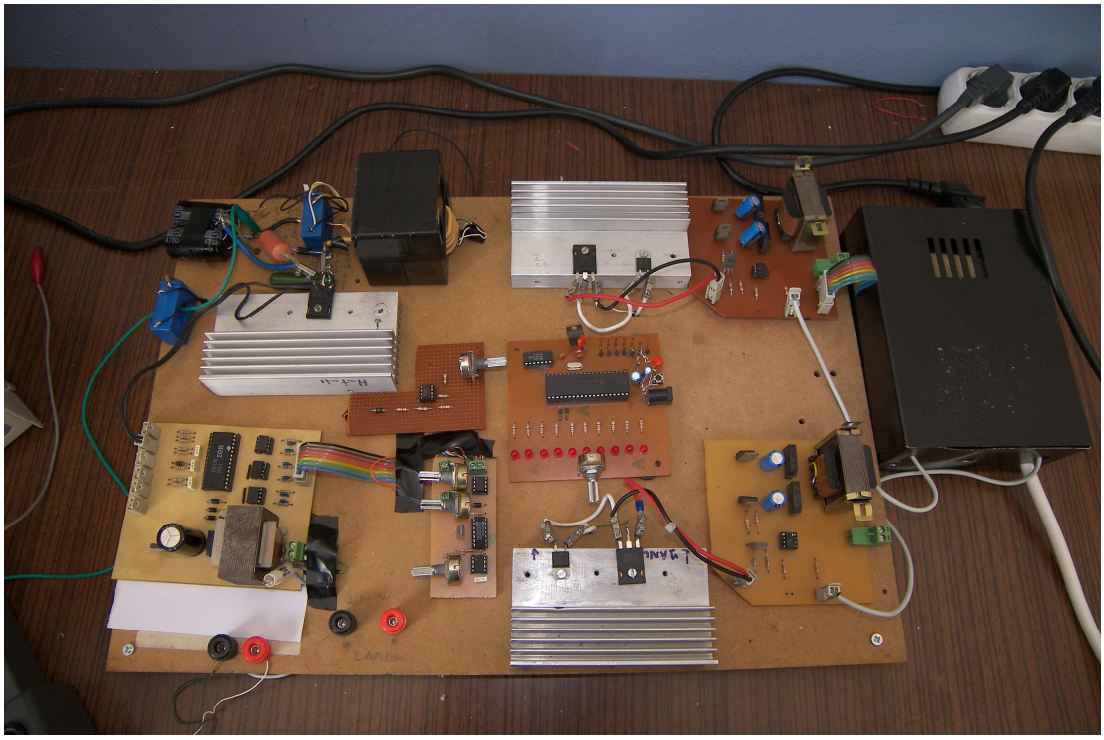
6.4.1. Uygulama devresi

Tez çalışması için geliştirilen uygulama devresinin prensip şeması Şekil 6.33.'de, gerçeklenmiş uygulama devresinin fotografı da Şekil 6.34'te verilmiştir.



Şekil 6.33: Tez çalışması için geliştirilen uygulama devresinin prensip devre şeması

Uygulama devresi; temel olarak simetrik sekonder sargılı orta uçlu bir transformatör, primer anahtarı ve sekonder anahtarları, sekonder diyotları, bu anahtarlara ait sürme ve bastırma devreleri, akım referansına göre primer anahtarını iletime – kesime götürme denetimi ve gecikme süresini ayarlayan denetim devresi, akım ve gerilim algılama elemanları, maksimum güç izleme amaçlı olarak kullanılan PIC 16F877A mikro denetleyici, akım referansını maksimum güç izleme algoritmasına göre ayarlama işlevini gerçekleştiren sayısal potansiyometre (DS1267) ve devrenin çalışması için gerekli olan gerilim kaynaklarından oluşmaktadır.



Şekil 6.34: Uygulama devresinin fotoğrafı

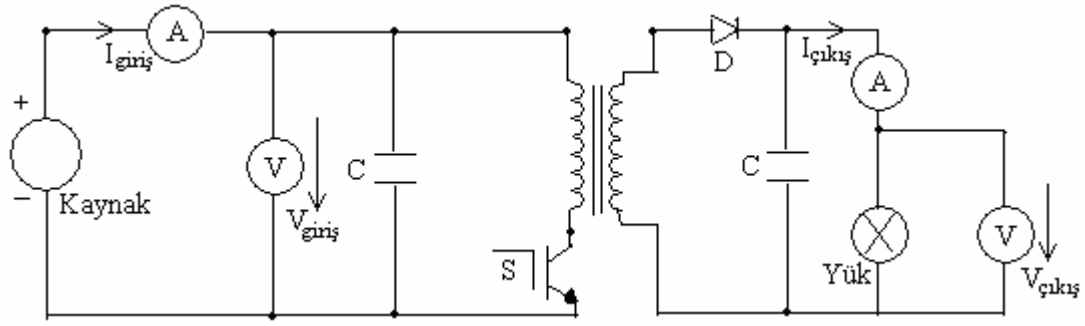
Geridönüşlü dönüştürücü transformatörde iki adet E tipi ferrit çekirdekten oluşmuş bir magnetik devre kullanılmıştır. Primer 4 sarım, sekonder 2x40 sarım olarak tasarlanmıştır. Çekirdeğin doyma bölgesine girmemesi için 0.5 mm'lik bir hava aralığı oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda primer akımının 30 A'e kadar lineer bir değişim gösterdiği ve doyma bölgesine girmediği belirlenmiştir. Primer indüktansı hava aralığına bağlı olarak 30 µH ile 60 µH arasında değişebilmektedir. 0.5 mm'lik hava aralığı için yaklaşık 40 µH'lik bir değer elde edilmiştir. Primer

akımı LEM LA55P tipi bir akım algılama elemanı ile ölçülmüştür. Yukarda açıklandığı gibi çalışma frekansı akım referansına bağlı olarak 15-25 kHz aralığındadır. Primer anahtarı olarak 1200 V , 35 A ve sekonder anahtarları olarak 600 V, 30 A'lik IGBT anahtarlardan faydalanılmıştır. Tüm anahtarlar optik izoleli olarak bağımsız kaynaklar yardımıyla sürülmüştür. Primer anahtarının sürülmesinde IRF 2130 tümleşik devresinden faydalanılmıştır. Sekonder anahtarların sürülmesi için daha önceki bir uygulama için tasarlanan sürme devrelerinden yararlanılmıştır. Deneysel çalışmaların bir bölümü laboratuar tipi 30 V 6 A'lik güç kaynağı ile bir bölümü de 120 W'lık KYOCERA güneş panelleri kullanlarak gerçekleştirilmiştir. Her iki durum da da kaynak ile geridönüşlü dönüştürücü arasına 2x4700 μF'lık tampon kondansatörler kullanılmıştır. Kaynak ile tampon kondansatörleri arasına ikinci bir akım algılayıcısı yerleştirilmiş ve kaynaktan çekilen ortalama akımın ölçülmesi sağlanmıştır. Gerilimin algılanması için kaynak uçlarında basit bir gerilim bölücü kullanılmıştır. Maksimum güç izleyici algoritmasının çalıştırıldığı PIC 16F877A mikrodenetleyicinin analog-sayısal dönüştürücü özelliği bulunduğundan, kaynak akımı ve gerilimi uygun filtre devreleri üzerinden mikrodenetleyicinin analog giriş kanallarına bağlanmıştır. Şebekenin doğrultulması ile elde edilen işaret, DS1267 sayısal denetimli potansiyometre ve referans şekillendirici olarak tasarlanan bir işlemsel kuvvetlendirici devresi üzerinden primer anahtarını denetleyen devreye verilmiştir. DS1267 ile PIC mikrodenetleyici arasındaki haberleşme 3 telli seri veri iletişimi ile sağlanmıştır. DS1267, içerisinde iki adet her biri 255 kademeden oluşan 10 kΩ'luk potansiyometre içeren bir tümleşik devredir. Denetimi DQ, CLK, RST pinleri üzerinden sağlanmaktadır. RST aktif "1" yapılarak CLK ile senkronize bir şekilde 17 Bit'lik bir veri paketinin DQ pinlerine gönderilmesi ile yapılmaktadır. 17 bitlik bilginin 16 biti 1. ve 2. potansiyometrelerin set değerleri, 1 bit ise kaskad çalışmaya ilişkin bir veri içermektedir. Uygulama devresinde DS1267'deki iki potansiyometreden bir tanesi kullanılmıştır. PIC mikrodenetleyici yazılımı PIC BASIC PRO programlama dili ile yazılmıştır.

6. 4. 2. DA/DA dönüştürücü olarak çalışma deneyi

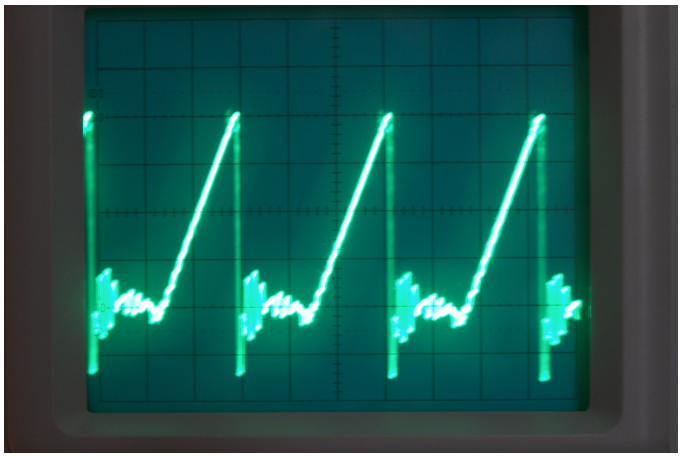
İlk deneysel çalışma sistemin sabit giriş gerilimli bir DA kaynak üzerinden beslenmesi durumunda DA/DA dönüştürücü olarak çalıştırılması ile

gerçekleştirilmiştir. Kaynak olarak 30 V 6 A kapasiteli bir laboratuar güç kaynağı yük olarak da 125 W'lık akkor flamanlı lamba kullanılmıştır. Bu çalışma şekli için devrede sekonder anahtarları iptal edilerek, sadece bir diyod kullanılmış ve temel geridönüşlü dönüştürücü topolojisi elde edilmiştir. Bu çalışma için ayarlanabilir değerli bir doğru akım akım referansı kullanılarak devrenin temel çalışma büyüklükleri incelenmiştir. Giriş gücü ortalama giriş akımı ve geriliminden çıkış gücü de yük üzerindeki doğru gerilim ve yük akımından hesaplanmıştır. DA/DA dönüştürücü olarak çalıştırılması deneyi ile ilgili devrenin prensip şeması şekil 6.35'de verilmiştir.



Şekil 6.35: DA/DA çalışma deneyi prensip şeması

Örnek bir durum için primer akımının dalga şekli şekil 6.36'da verilmiştir.



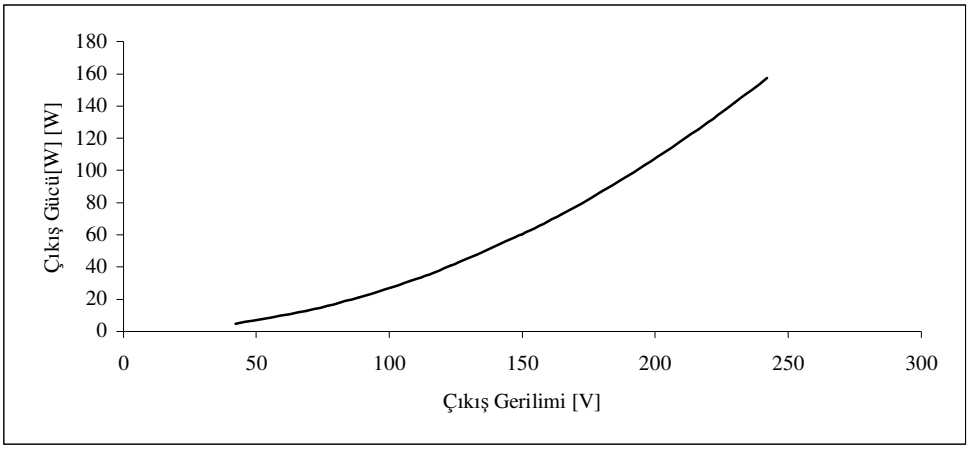
Şekil 6.36: Primer akımı değişimi (5A/kare, 25μs/kare)

Bu çalışma sonucunda gerçekleştirilen sistemin DA-DA dönüştürücü olarak literatürdeki örneklere yakın bir performansta çalıştığı gözlenmiştir. Giriş akımına bağlı olarak çıkış gerilimi, gücü ve verim değerleri Tablo 6.2 de verilmiştir.

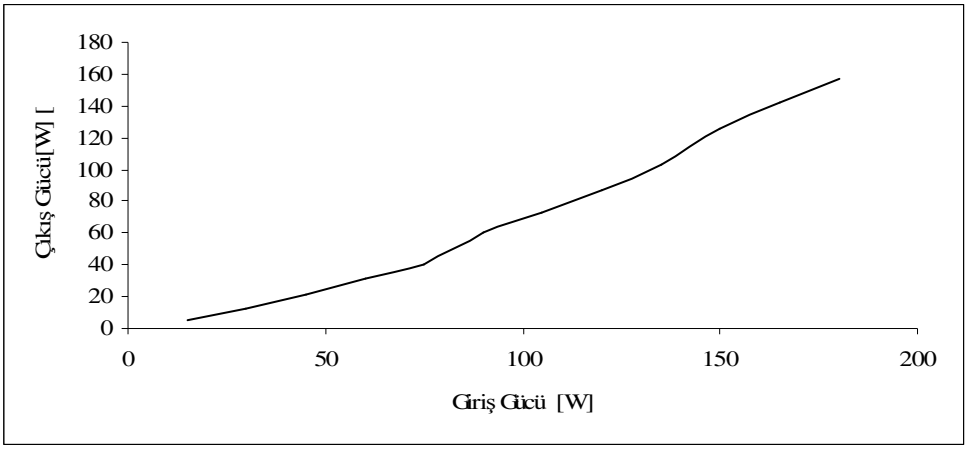
Tablo 6.2: Giriş gerilimi sabit (30V) iken giriş akımının değişimine bağlı olarak giriş gücü, çıkış gerilimi, çıkış gücü ve verimin değişim değerleri

Giriş Akımı [A]	Giriş Gücü [W]	Çıkış Gerilimi [V]	Çıkış Gücü [W]	Verim %
0.5	15	42.2	4.78	31.87
1	30	68.8	12.71	42.37
1.5	45	88.4	21	47.7
2	60	108	31.33	52.22
2.5	75	123.2	40.77	54.36
3	90	150	60.43	67.14
3.5	105	164.8	72.95	69.48
4	120	180	87.02	72.52
4.5	135	196	103.18	76.43
5	150	216	125.32	83.55
5.5	165	230	142.09	86.12
6	180	242	157.3	87.39

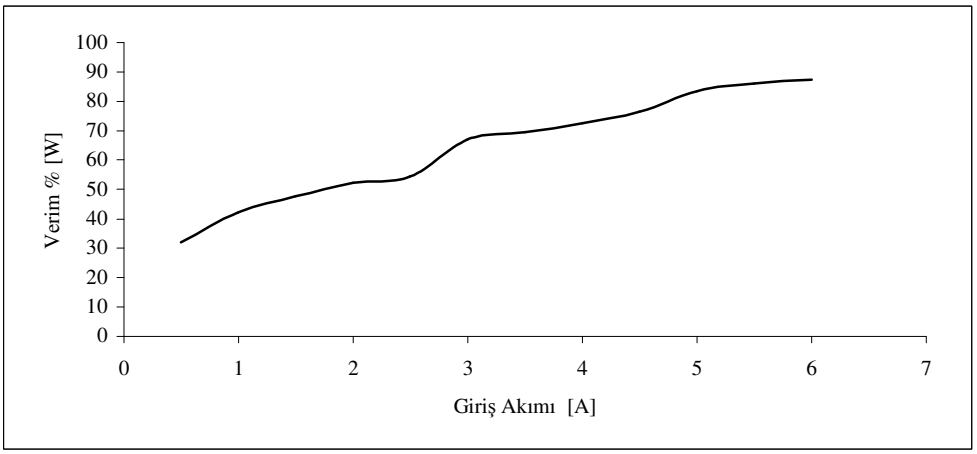
Bu çalışma ile ilgili değerlerin grafikleri şekil 6.37, 6.38 ve 6.39'de verilmiştir.



Şekil 6.37: Giriş akımına bağlı olarak çıkış gerilimi ve çıkış gücünün değişimi



Şekil 6.38: Giriş akımına bağlı olarak giriş gücü ve çıkış gücünün değişimi

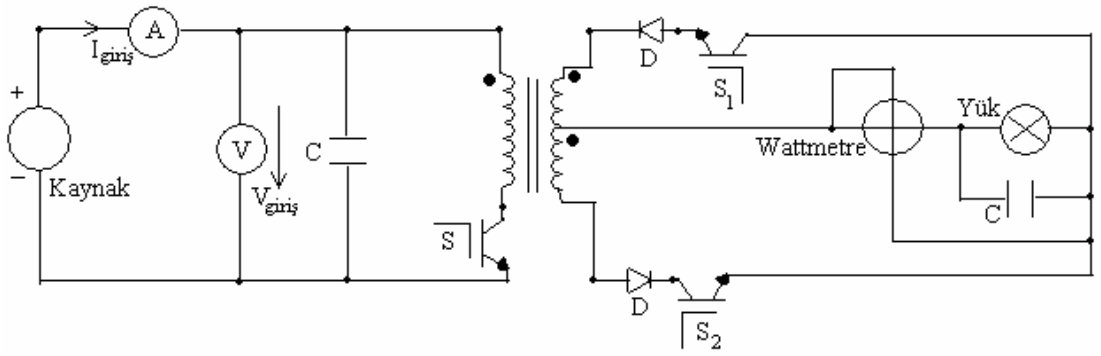


Şekil 6.39: Giriş akımına bağlı olarak güçteki verimin (çıkış gücü/giriş gücü) değişimi

6. 4. 3. Doğrultulmuş sinüs dalga referansı ile DA/AA dönüştürücü (evirici) olarak çalışma deneyi

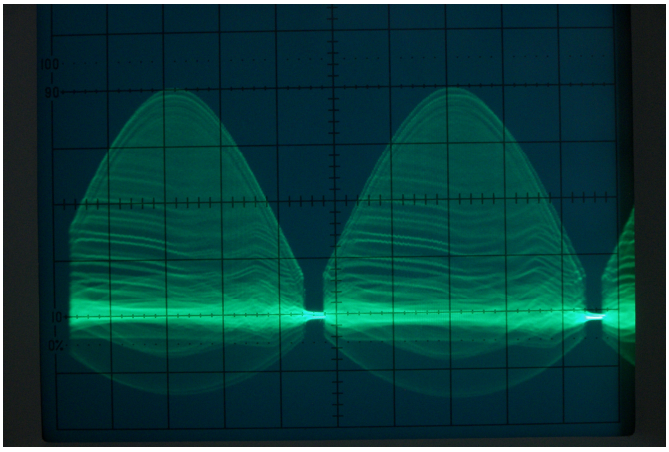
Şekil 6.40'da prensip devre şeması verilen ikinci deneysel çalışma 6.3. ayrıtında anlatılan şekilde primer akım referansının ayarlanabilir bir genlikteki doğrultulmuş sinüs dalga olarak uygulanması ve sekonder anahtarların 50 Hz' lik şebeke ile senkronize olarak uygun sürelerle iletime sürülerek çalışması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada da giriş, 30 V 6 A'lik güç kaynağından elde edilmiş ve yük olarak akkor Flamanlı lamba kullanılmıştır. Yük uçlarında 1 μF 250V ve 0.47μF'lık 630V'luk iki adet paralel bağlı filtre kondansatörleri kullanılmıştır. Bu

çalışma için giriş akımı laboratuar kaynağının akım göstergesinden ve devreye bağlanan multimetre yardımıyla okunmuştur.

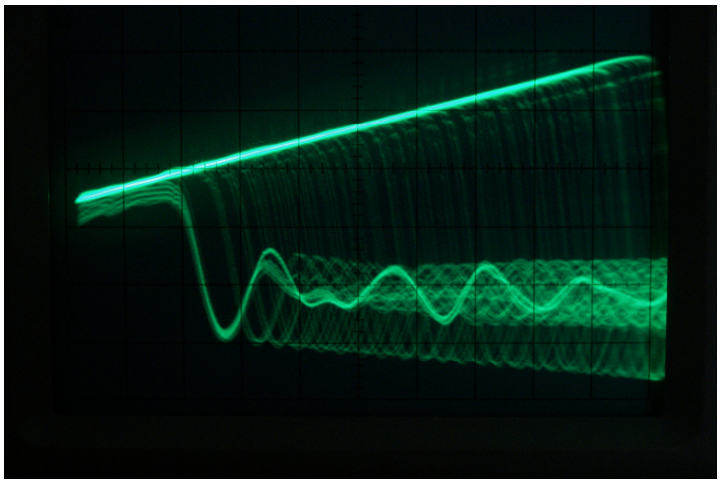


Şekil 6.40: Doğrultulmuş sinüs modüleli DA/AA çalışma deneyi prensip şeması

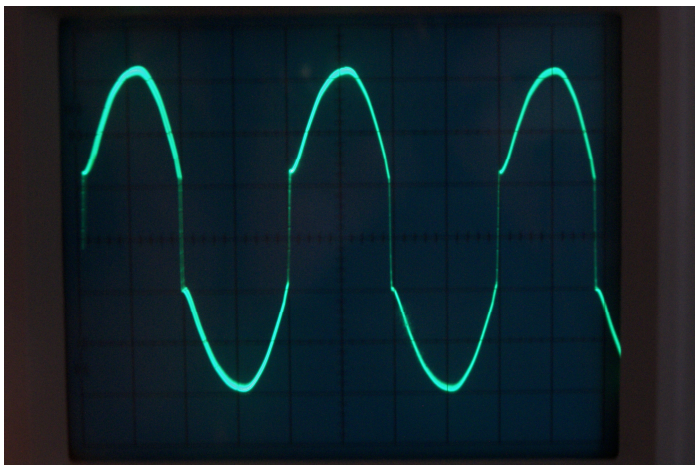
Devrede kullanılan tampon kondansatörler nedeniyle kaynaktan çekilen akımın düşük düzeyde dalgalılık içeren bir doğru akım formundan olması sağlanmıştır. Bu nedenle giriş akımının ortalama değerinin makul bir duyarlılıkla ölçülmesi sağlanmıştır. Yük uçlarındaki gerilim gerçek etkin değer ölçen bir multimetre ile ve yüke aktarılan güç analog bir Wattmete ile ölçülmüştür. Primer akımının ve yük geriliminin tipik değişimleri sırayla şekil 6.41, şekil 6.42 ve şekil 6.43'de verilmiştir.



Şekil 6.41: Primer akımının değişimi (5A/kare,2ms/kare)



Şekil 6.42: Primer akımının bir alternans boyunca değişimi

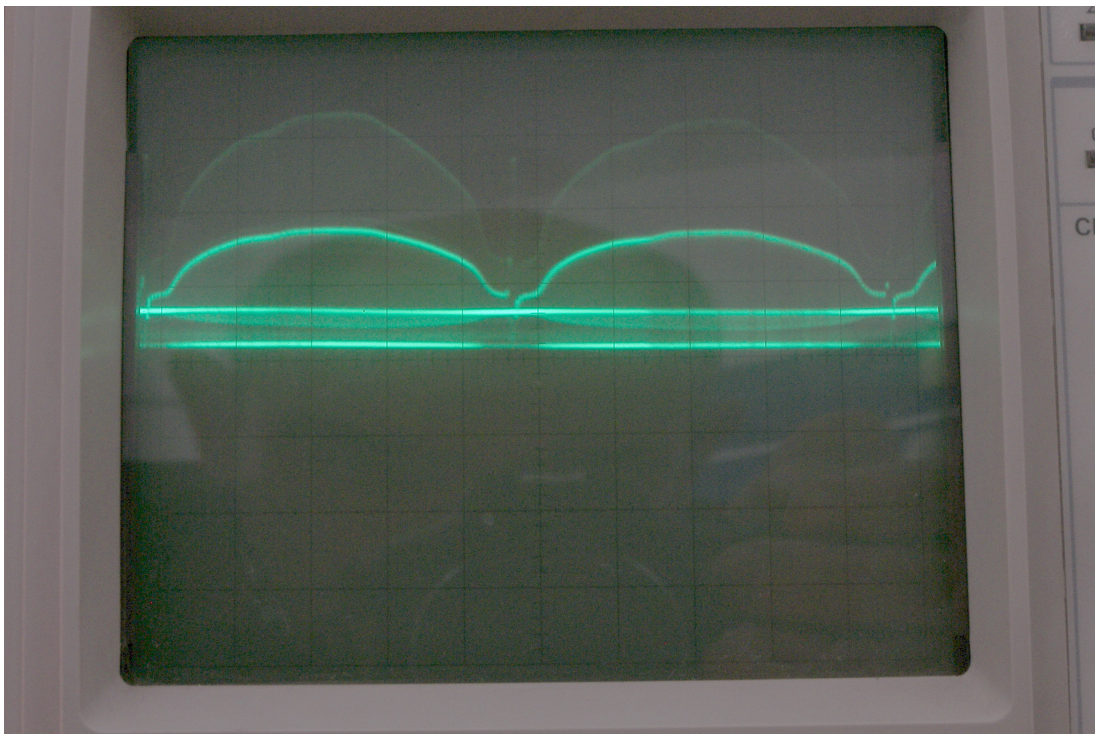


Şekil 6. 43:Yük uçlarındaki gerilimin değişimi (50V /kare)

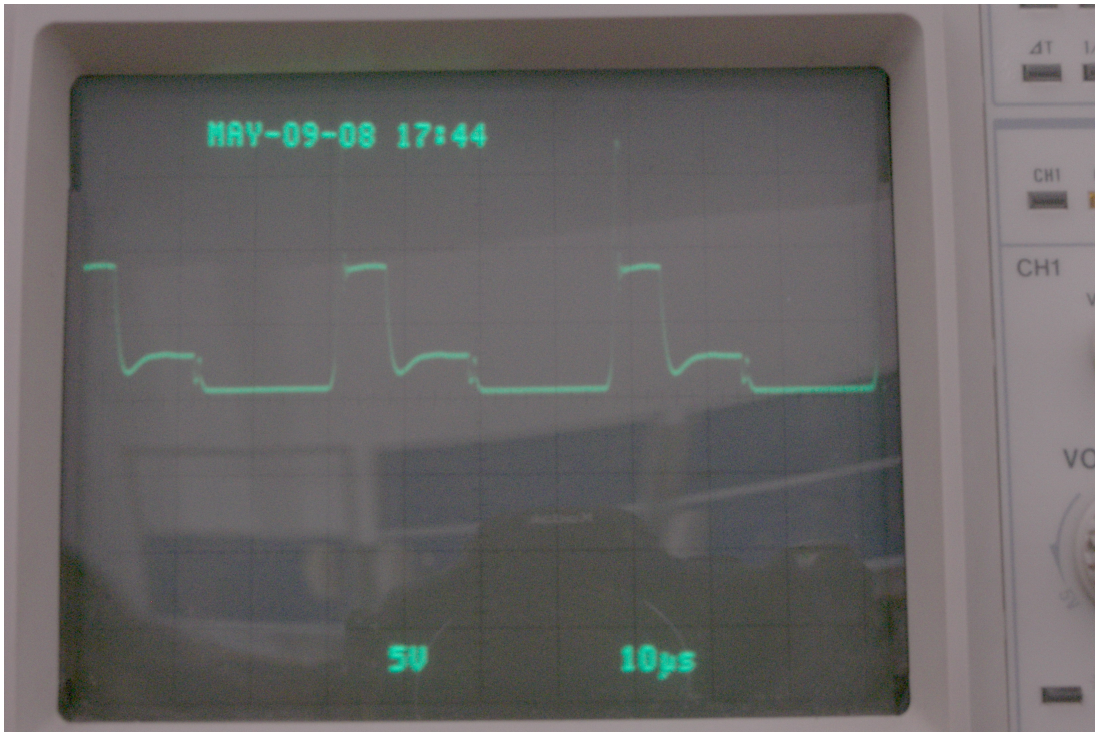
Bu çalışmaya ilişkin akım, gerilim ve güç değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Şekil 6.44'de primer anahtarının bir peryodluk süre için üzerinde düşen gerilim, 6.45'de bu gerilimin daha küçük bir zaman aralığındaki değişimi verilmiştir. Şekil 6.46'da kaynak akımı, 6.47'de de kaynak geriliminin değişimleri görülmektedir. Özellikle akım ve gerilim değişimleri, modüleli çalışmada he iki büyüklüğünde sabit kalmadığını göstermesi açısından önem taşımaktadır. Bu deneysel bulgular şekil 6.24'deki simülasyon sonuçları ile de uyumludur.

Tablo 6.3: Giriş gerilimi sabit (30V) iken giriş akımı değişimine bağlı olarak giriş gücü, çıkış gerilimi, çıkış gücü ve verimin aldığı değerler.

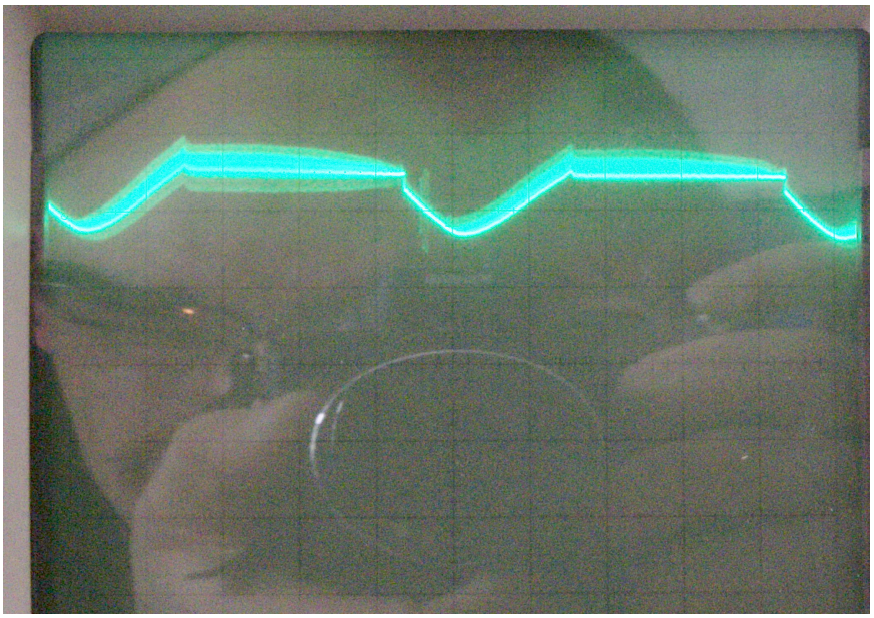
Giriş Akımı [A]	Giriş Gücü [W]	Çıkış Gerilimi [V]	Çıkış Gücü [W]	Verim %
0.5	15	45.1	5.46	36.4
1	30	74	14.71	49.03
1.5	45	96	24.75	55.01
2	60	119	38.04	63.4
2.5	75	140	52.64	70.19
3	90	156	65.37	72.63
3.5	105	173	80.39	76.56
4	120	188.2	95.13	79.28
4.5	135	205.2	113.1	83.78
5	150	216.6	126.01	84.01
5.5	165	234.4	147.58	89.44
6	180	245.3	161.62	89.79



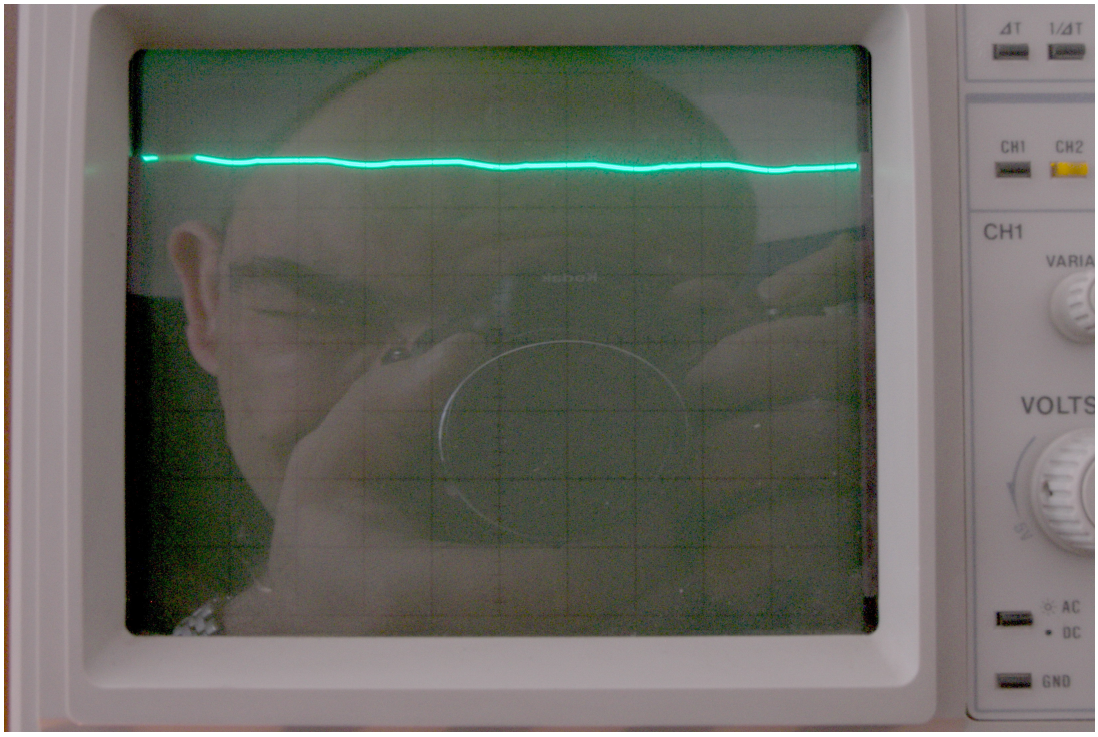
Şekil 6.44: Primer anahtarı üzerinde düşen gerilim (50V /kare)



Şekil 6.45: Primer anahtarı üzerine düşen gerilimin detayı (50V /kare)

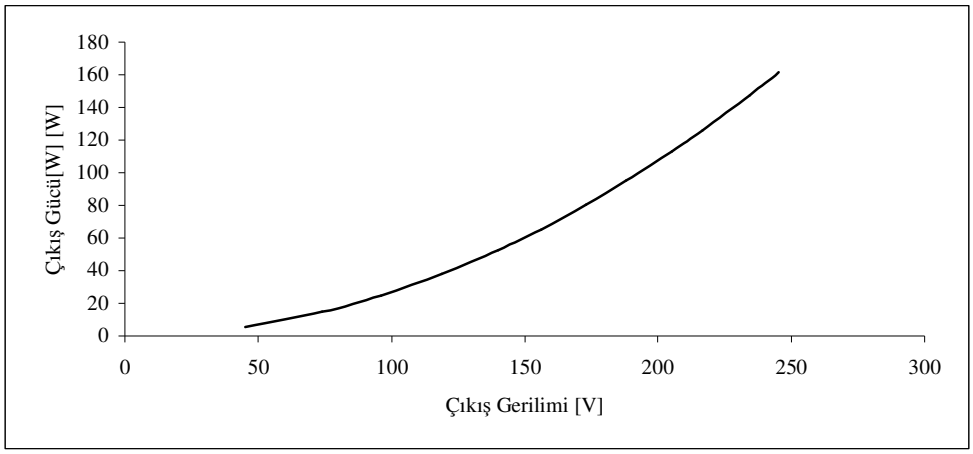


Şekil 6.46: Kaynak akımı (2A /kare)

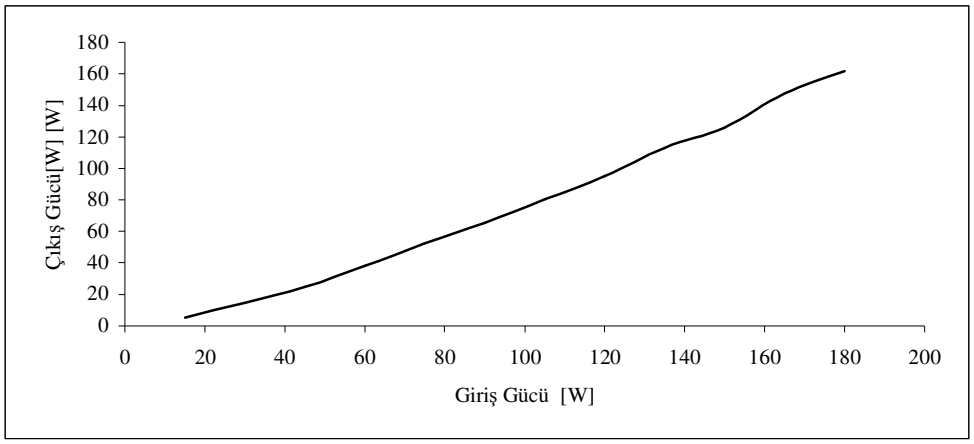


Şekil 6.47: Kaynak gerilimi (10V /kare)

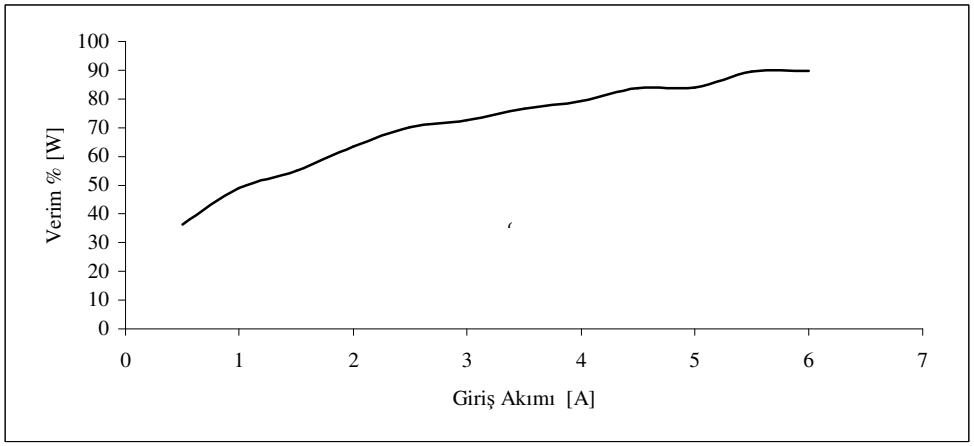
Şekil 6.48'de giriş akımına bağlı olarak çıkış gerilimi ve çıkış gücünün değişimi, şekil 6.49'da giriş akımına bağlı olarak giriş gücü ve çıkış gücünün değişimi ve şekil 6.50'de de Giriş akımına bağlı olarak güçteki verimin (çıkış gücü/giriş gücü) değişimi gösterilmiştir.



Şekil 6.48: Giriş akımına bağlı olarak çıkış gerilimi ve çıkış gücünün değişimi



Şekil 6.49: Giriş akımına bağlı olarak giriş gücü ve çıkış gücünün değişimi



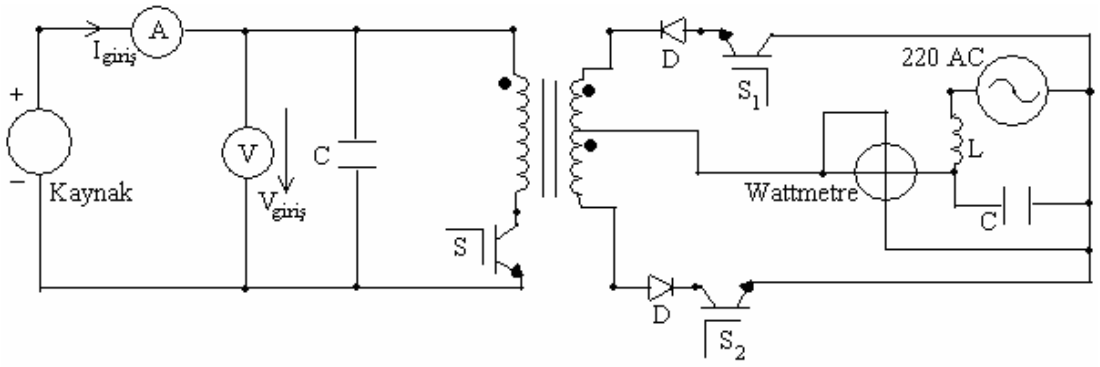
Şekil 6.50: Giriş akımına bağlı olarak güçteki verimin (çıkış gücü/giriş gücü) değişimi

Bu deneysel çalışmaya ek olarak, MG izleme algoritmasının denenmesi için sistemin akım referansının otomatik olarak PIC mikrodenetleyici ve DS1267 sayısal potansiyometresi üzerinden ayarladığı bir başka çalışma da gerçekleştirilmiştir. Prensip olarak akım sınırlamalı çalışan bir laboratuar güç kaynağı ile bir güneş panelinin karakteristikleri birbirlerine oldukça yakındır. Kaynağın manuel olarak ayarlanabilen akım sınırlama değerine kadar gerilimi sabit kalmakta, akım sınırı geçildiğinde ise gerilimini otomatik olarak azaltmaktadır. Bu nedenle maksimum güç izleme algoritmasının yazılımla gerçeklenmesi aşaması, ilk olarak bu sistem üzerinde denenmiştir. Çıkış gerilimi akım sınırına kadar sabit kalan bir kaynağın "maksimum güç- akım" değişimi doğrusal bir fonksiyondur. Bu açıdan güneş panelinin laboratuar kaynağına göre tek farkı ışımaya bağlı olarak maksimum güç noktasındaki gerilimin

de bir miktar değişmesi ve "maksimum güç- akım" değişiminin doğrusal bir fonksiyondan az da olsa farklı olmasıdır. EK A'da kullanılan güneş panelleri için Maksimum güç- akım değişimi değerleri ve 8 bit çözünürlük için geliştirilen tablolar verilmiştir. Bu tablolar PIC BASIC PRO yazılımındaki Look Up komutu ile birlikte kullanılarak, örneklenen kaynak akımı ve geriliminin çarpımından elde edilen güç değeri yardımıyla referans akım elde edilmiştir. Yazılım açısından önemli bir husus şudur. Akımı ve gerilimi 8 bitlik bir çözünürlükle örneklenmesi durumunda bunların çarpımları 16 bitlik bir değer üretecektir eğer bu şekilde kullanılırsa güç tablosunun 16 bitlik (64 K'lık) bir şekilde olması gerekir. PIC mikrodenetleyici ve PIC BASIC PRO yazılımının sınırlamaları nedeniyle güç değeri öncelikle 255'e bölünerek 8 bitlik bir değişkene atanmıştır. Bu şekilde yeterli bir duyarlılıkla maksimum güç-akım fonksiyonu mikrodenetleyicide oluşturulmuştur. PI denetleyici de basitlik sağlaması için hataya göre DS1267 sayısal potansiyometresinin 255 kademelik değerinin sürgü değerini birer adımlık değerlerle arttırıp azaltacak şeklinde gerçekleştirilmiştir.

6. 4. 4. Şebekeye paralel çalışma deneyi

Uygulama devresinin alternatif akım şebekesi ile paralel olarak çalışmasının incelenmesi için bir önceki deneyden farklı olarak yük uçları 20 mH'lik bir filtre bobini üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Giriş akımı, çıkış gücü bir önceki deneyde kullanılan yöntemle ölçülmüştür. Şebekeye paralel çalışmaya ilişkin değerler Tablo 6. 4'de ve bu deneyin prensip devre şeması şekil 6.51'de verilmiştir.



Şekil 6.51: Şebekeye paralel çalışma deneyi prensip şeması

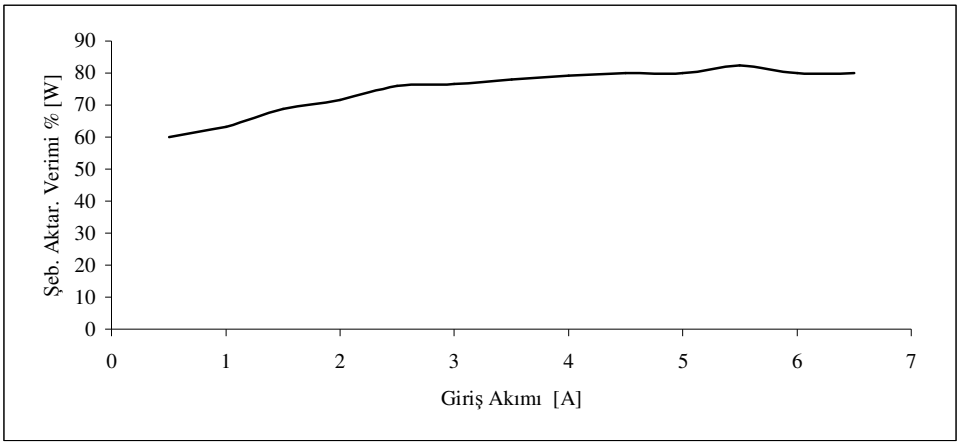
Tablo 6.4: Giriş gerilimi sabit (30V) iken giriş akımı değişimine bağlı olarak giriş gücü, çıkış gücü ve verimin aldığı değerler.

Giriş Akımı [A]	Giriş Gücü [W]	Şebekeye Aktar. Güç [W]	Şebekeye Aktar. Verimi%
0.5	15	9	60
1	30	19	63.33
1.5	45	31	68.89
2	60	43	71.67
2.5	75	57	76
3	90	69	76.67
3.5	105	82	78.1
4	120	95	79.17
4.5	135	108	80
5	150	120	80
5.5	165	136	82.42
6	180	144	80
6.5	195	156	80

Bu çalışma ile ilgili değerlerin grafikleri şekil 6.52 ve 6.53'de verilmiştir.



Şekil 6.52: Giriş akımına bağlı olarak giriş gücü ve şebekeye aktarılan güç değişimi



Şekil 6.53: Giriş akımına bağlı olarak verimin (Şebekeye aktarılan güç/giriş gücü) değişimi

6. 4. 5. Sistemin güneş paneli üzerinden beslenmesi deneyi

Yukarıda incelenen üç durum için geliştirilen sistem iki adet 120W'lık Kyocera (KC120-1 modeli) güneş panelinin seri bağlanmasından oluşturulan dizi üzerinden beslenmiştir. Genel olarak güneş panelleri üzerinden beslenmesi durumunda sistemin performansı (verimi) sabit gerilimli kaynak üzerinden beslendiği duruma göre bağıl olarak düşük gerçekleşmiştir. Bu durum esas olarak ısınmaya bağlı açık devre ve maksimum güç noktası gerilimlerinin düşmesi ve akım-gerilim dalgalanmalarından kaynaklanmaktadır. DA/DA dönüştürücü durumunda panellerden yüke aktarılabilen maksimum güç 130 W civarında, şebeke bağlantılı durumda ise maksimum güç 120 W civarında gerçekleşmiştir. Isınmış durumda panellerden teorik olarak alınabilecek en büyük güç 175 W civarında olmasına karşın akım ve gerilimdeki dalgalanmalardan dolayı yukarıda belirtilen değerlerin üzerine çıkmak mümkün olamamıştır. Şebekeye aktarılan gücün yükseltilmesi için daha önce 2 panelin seri bağlanması ile elde edilen giriş geriliminin yükseltilebilmesi için sisteme üçüncü bir panel daha eklenmiştir. Bu şekilde en yüksek ışıma koşullarında yaklaşık 48 V, 6.5 A değerinde bir giriş sağlanmıştır, bu şekildeki sistem ile şebekeye aktarılan gücün 225 W – 230 W civarına yükseltilmesi mümkün olmuştur. Genel olarak giriş geriliminin yükselmesi sistemin verimini yükseltici bir etki göstermektedir. Bu durum yukarıda verilen diğer çalışma durumları için de geçerlidir. Sistemin genelindeki verim iyileştirmesinin bu değerleri bir miktar daha yükselteceği öngörülmekle birlikte,

panel sisteminin etiket gücüne göre %60-65'lik bir faydalanma oranı elde edilebilmektedir.

Şebekeye paralel çalışma durumunda MGİ algoritmasının makul bir performansla çalıştığı ve paneli maksimum akım koşullarına yakın noktalarda çalıştırdığı gözlenmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Fotovoltaik enerji üretim sistemlerinde önemli bir yer tutan MGN izleme, eviriciler ve şebekeye paralel çalışma konularının incelenmesi üzerine yapılan bu çalışmanın evreleri aşağıda verilmiştir.

2. Bölümde GH. Temelli enerji sistemlerinin temel elemanı olan Güneş hücresinin bir yarı iletken p-n eklemi özelliği gösterdiği, ışımaya maruz kaldığında aldığı enerji ile değeri hücrenin fiziksel yapısına, ışıma şiddetine (Q), ışımanın hücreye geliş açısına (Θ) ve hücre sıcaklığına (T_c) göre değişen bir DA enerji kaynağı gibi davrandığı, akım gerilim karakteristiğini belirleyen temel iç (R_s, R_{sh}, ve I_s) ve dış (Q ve T_c) parametrelere sahip olduğu, üç parametre (I_{sc}, V_{oc} ve P_m) ile karakterize edilebileceği, bu parametrelerin matematiksel ifadeleri ve elde edilişleri, hücrenin akım gerilim karakteristiğini tanımlayan matematiksel ifadeleri, uçlarına bağlanacak yük değerine göre aldığı gücün bir kısmını yüke aktarabildiği, yüke aktarılan maksimum gücün $V_{oc}I_{sc}$ çarpımına oranının dolgu faktörü (FF) olarak adlandırıldığı, bu faktörün sıcaklıkla değişmediği ve değerinin %70 ile %80 arasında olduğu, hücre çıkışından alınan elektriksel gücün ışıma açısına bağlı olarak hücreye gelen güneş gücüne oranının hücre verimi (η) olarak ifade edildiği ve bu değerin %10 ile % 25 arasında değiştiği, bir hücrede alınabilecek maksimum verimin (η_m) ise hücre çıkışından alınan maksimum gücün (P_m) hücreye gelen toplam güce (P_{in}) oranı olarak tanımlandığı incelenmiştir

3. Bölümde güneş hücresinin 2. Bölümde verilen akım gerilim karakteristik denklemleri kullanılarak bir hücre, hücrelerin birleşiminden oluşan bir panel veya panellerin birleşiminden oluşan bir dizi için geliştirilen modellemeler incelenmiştir. En basit modelin denklem (2. 1) ve en kapsamlı modelin denklem (2. 4.) temel alınarak geliştirildiği, modellemelerin analitik çözüm kullanan basitleştirilmiş modeller, nümerik çözüme dayalı modeller (çoğunlukla) ve elektriksel eşdeğerlerle tanımlanıp simülasyon programları ile analiz edilen modeller olarak gruplandığı,

modellemelerde en az üç parametrenin (V_{oc}, I_{sc} ve P_m) kullanıldığı, kullanılan parametre sayısı arttıkça modellemenin daha kapsamlı olduğu ancak paralel olarak model analizlerinin karmaşıklaştığı incelenmiştir. Literatürdeki modellemelerden üç parametre modeli, dört parametre modeli, beş parametre modeli ve A. Hadj Arab ve diğerlerinin denklemi modeli incelenmiştir. Sıcaklık ve ışımanın dört parametreye etkisinin modele dahil edilmesi durumunda dört parametre modeli birçok hücre yapısı için kullanılabilir bir modeldir. Tez çalışmasında dört parametre modeli kullanılmıştır. Bu model kullanılarak yapılan çözümlerle tablo (Look-Up Table) oluşturulmuş ve bu da simulasyon devrelerinde kullanılmıştır.

4. Bölümde bir enerji kaynağı olarak güneş. hücresi paneli veya dizisinin kullanımı ve enerjisinin denetimi incelenmiştir. GH temelli sistemlerin tek başına, şebekeye paralel ve başka enerji kaynakları ile birlikte kullanılabileceği, tek başına kullanımda enerjinin sürekliliği için akü gerektiği ve bununda sistem maliyetine önemli bir artış getirdiği, şebekeye paralel sistemin çok daha makul olduğu incelenmiştir.

Ayrıt 4. 1'de sistemin bir yükü doğrudan beslemesi durumunda çalışma noktasının yükteki veya sistem giriş parametrelerindeki değişime bağlı olarak çoğu zaman maksimum güç noktasından uzak olabileceği, bu nedenle çalışma noktasını ayarlayabilmek için sisteme bir DA/DA dönüştürücü eklenmesi gerektiği incelenmiştir.

Ayrıt 4. 2.'de PV sistemlerinde yaygın kullanılan dönüştürücülerden düşürücü, yükseltici ve düşürücü yükseltici dönüştürücü yapıları, sürekli mod, süreksiz mod ve bu iki mod arasındaki limit durumunda çalışmaları, bir anahtarlama elemanı ile görev oranı değiştirilerek dönüştürücülerin çıkış gerilimlerinin nasıl ayarlanabildiği incelenmiştir. Yine aynı ayrıtta tez çalışmasında da kullanılan geridönüşlü (flyback) dönüştürücünün yapısı ve çalışması prensipleri itibarı ile incelenmiştir (6. Bölümde detaylandırılmıştır).

Ayrıt 4. 3'de sistem bir AA akım özellikli yükü besleyecek ise DA formundaki sistemin enerjisini AA formuna dönüştürecek bir eviricinin kullanılması gereği, eviricilerin devre yapısı ve çalışma şekli açısından, denetim ve dalga şekli açısından

ve anahtarlama şekli açısından gruplanabileceği ve en temel evirici yapısı incelenmiştir. Ayrıt 4. 3. 1'de tek fazlı köprü eviricinin köprü kare dalga ve üç seviyeli kare dalga çalışması, DGM çalışması ve çok seviyeli çalışması incelenmiştir.

Ayrıt 4. 4'de tez çalışmasının esas konularından olan şebekeye paralel çalışan sistemler incelenmiştir. Ayrıt 4. 4. 1'de şebekeye paralel çalışan PV eviricili sistemlerin merkezi eviricili sistem olarak, dizi eviricili sistem olarak ve modül ile tümleşik eviricili sistem olarak çalışmaları incelenmiştir. Ayrıt 4. 4. 2'de PV eviricilerinin DA/DA dönüştürücülü ve yalıtımlı olarak, yalıtımsız DA/DA dönüştürücülü olarak, yalıtımlı DA/DA dönüştürücüsüz olarak ve yalıtımsız DA/DA dönüştürücüsüz olarak güç düzenleme topolojileri incelenmiştir.

5. Bölümde sistemden maksimum güç çekebilmek için en sık başvurulan yöntemin bir MGNİ kullanmak olduğu, DA/DA dönüştürücünün sadece çıkış gerilimini girişteki değişime rağmen sabit tuttuğu, yükteki değişmelerde maksimum güç noktasında kalabilmenin MGNİ tarafından sağlandığı incelenmiştir. Literatürdeki MGN izleme algoritmalarından değiştir-gözle yöntemi, sabit gerilim/ sabit akım yöntemi, Örnek hücre yöntemi, artan iletkenlik yöntemi, parazitik kondansatör yöntemi ve model tabanlı yöntem incelenmiştir. Bu bölümün son ayrıtında oldukça pratik ve etkin bir maksimum güç noktası izleme sağlayan yeni bir MGNİ algoritması sunulmuştur. Önerilen algoritma, belirli bir güneş paneli sistemi için önceden belirlenen Maksimum güç- maksimum güç noktası akımları fonksiyonu kullanılarak panel sistemini sürekli olarak maksimum güç noktasında çalıştırmaya olanak sağlamaktadır. Önerilen algoritma PIC 16F877A mikro denetleyici ve DS1267 sayısal potansiyometresi kullanılarak pratik olarak da gerçekleştirilen geri dönüşlü dönüştürücüye eklenmiştir.

6. Bölümde tez çalışması kapsamında yapılan uygulama devrelerinin analizleri yapılmıştır. Çalışmanın uygulamasında kullanılan KC120 PV panelinin etiket değerleri ve 3. Bölümde verilen dört parametre modeli kullanılarak örnek bir sistemin MATLAB Simulink ortamında modellenmesi verilmiştir. Bu şekildeki bir MATLAB modeli literatürde ilk kez bu çalışmada sunulmuştur. İstenirse ısınmaya bağlı ve farklı ışımalar için geliştirilebilir. Hızlı simülasyona olanak sağlamaktadır.

Evirici olarak çalışan geridönüşlü dönüştürücünün literatürdeki örnekleri irdelenmiş ve farklı bir çalışma yöntemi önerilmiştir. Geliştirilen yöntem sadece darbe genişliklerinin modüle edildiği sabit frekanslı çalışma [48] yöntemine göre kesintili-kesintisiz akım sınırına daha yakın bir çalışma sergilemekte, bu sayede belirli bir ortalama akım için tepe değeri nispeten düşük bir akımla çalışma sağlamaktadır. [49]'da verilen ve primer ve sekonder akımlarının ölçülerek, tüm çalışma bölgesinde sınır durumunda tutulan çalışma şekli ile kıyaslandığında ise önerilen yöntemin, kontrolsüz frekans yükselmelerine neden olmaması nedeniyle daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca [49]'da önerilen yöntem kullanılarak gerçekleştirilen bilgisayar simülasyonlarında şebekeye aktarılan akımın dalga şeklinin söz konusu çalışmada verilen sinüs biçimli değişimden farklı olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle yöntemin etkinliği konusunda bir belirsizlik görülmüştür. Bu bakımdan önerilen denetim yönteminin simülasyonlarla doğrulanabilen tek yöntem olan ve [48]'de verilen yöntemden farklı olarak bir yenilik oluşturduğu söylenebilir.

Uygulamada kullanılmak üzere geliştirilen geridönüşlü dönüştürücünün DA/DA ve DA/AA dönüştürücü olarak çalışması incelenmiştir. Dönüştürücünün tasarımı, simülasyon devre modelleri ve çalışma sonuçları verilmiştir.

Sistemin DA/DA dönüştürücü olarak çalışma deneyi ve sonuçları, tam dalga doğrultulmuş sinüs akım referanslı DA/AA dönüştürücü olarak çalışma deneyi ve sonuçları ile sistemin seri bağlı iki KC120 PV panelinden beslenmesi durumundaki deneysel çalışma ve sonuçları da 6. bölüm de verilmiştir. Bu çalışmalarda geliştirilen MGNİ algoritması da deneysel olarak incelenmiştir. Genel olarak önerilen MGNİ izleme algoritmasının sabit ve değişen ışıma koşullarında doğru tepkiler verdiği ve sistemi kısa devre koşullarına sokmadan, maksimum güç koşullarına yakın noktalarda çalıştırdığı gözlenmiştir. 8 bitlik örnekleme ve işlem sınırlamalarının algoritmanın tam anlamıyla uygulanmasını sınırlayacağı açık olmakla birlikte, akım ve gerilim dalgalanmalarından dolayı tasarlanan sistemin teorik maksimum güç noktasında tutulmasının mümkün olmaması da dikkate alındığında, elde edilen performansın makul düzeyde olduğu gözlenmiştir. MGNİ algoritmasının bağımsız yükü besleme ve şebekeye paralel çalışma durumlarında elde edilen performanslar birbirlerine yakın olarak gerçekleşmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışma esas olarak, sonraki çalışmalar için bir zemin oluşturmuştur. Geri dönüşlü dönüştürücünün transformatör, anahtarlama elemanı ve bastırma devresi ile ilgili tasarım geliştirmeleri, sistemin enerji dönüşümü açısından daha verimli olmasını sağlayacaktır. Denetim ve primer anahtarı sürme devresinin geliştirilerek anahtarlama kayıplarının bir miktar daha düşürülmesi de sistem verimini yükseltecektir. MGNİ algoritmasının işlem kapasitesi daha yüksek 16 Bitlik bir mikro denetleyici ile gerçekleştirilmesi, sıcaklığa bağlı değişimlere göre adaptasyonu ve PI denetleyicinin daha etkin gerçeklenmesi sistemin performansını yükseltecektir. Şebeke bağlantısının otomatik olarak sağlanması, gerilim kesintilerinde sistemin korunması gibi bazı hususlar da tasarlanan sistemin laboratuar ortamı yerine, gerçek işletme şartlarında çalışmasına olanak sağlayacaktır. Sözü edilen iyileştirmelerle birlikte tasarlanan sistem sayesinde güneş enerjisinden elde edilen elektriksel enerji etkin ve sürekli bir şekilde varolan alternatif akım şebekesine aktarılabilecek ve toplam enerji tüketiminde bir azalma yaratacaktır. Günümüzdeki panel fiyatları ile böyle bir sistemin ilk yatırım maliyetinin, üretilecek enerji ile kendisini amorti ederek net bir fayda sağlamasının oldukça uzun vadeli bir süreç olacağı açıktır. Ancak yakın bir gelecekte hammaddesi silisyum olan güneş panellerinin önemli ölçüde ucuzlayacağı öngörülürse, bu ve benzeri bilimsel çalışmaların ileriye dönük olarak önemli bir altyapı hazırlayacağı söylenebilir.

Bu tez çalışmasının özgün noktaları üç noktada özetlenebilir. İlk olarak genel olarak güneş paneli sistemlerinin modellenmesi için kullanılabilecek basit, pratik, hızlı ve geliştirilebilir bir Matlab Simulink modeli sunulmuş ve simulasyonlarda kullanılmıştır. İkinci olarak hem primer akımının mutlak olarak sinüzoidal bir zarfı izlemesini sağlayan hem de düşük akım referansının oluşturduğu anahtarlama frekansındaki kontrolsuz artışı engelleyen sürekli süreksiz akımla çalışma sınırında kısa süreli gecikme ile çalışan bir geridönüşlü dönüştürücü önerilmiş ve uygulamada kullanılmıştır. Son olarak güneş paneli etiket değerlerini kullanarak GH temelli sistemlerin maksimum güç noktasına oldukça yakın çalışmasını bir şekilde sağlayan hızlı, basit ve geliştirilebilir bir maksimum güç noktasını izleme algoritması önerilmiş ve uygulamada kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Parmaksız, S., "Ulusal Şebekeye Bağlı Güneş Pili Sistemlerinin Modellenmesi ve Gerçeklenmesi"**,** Yüksek Lisans Tezi, ***İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul (1997).

[2] Boztepe, M., "İzmir (Bornova) Koşullarında Şebekeye Bağlı Bir Fotavoltaik Enerji Sisteminin Tasarımı ve Denenmesi**",** Doktora Tezi, ***Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Bornova-İzmir. (2002).

[3] Karatepe, E., "Fotovoltaik Jeneratörlerin Kısmi Gölgelenme ve Uyumsuzluk Koşullarında Bulanık Mantık Kontrolör İle Maksimum Güç Noktası Kontrolü ve Farklı Sistem Konfigürasyonlarının Karşılaştırılması**"**, Doktora Tezi, ***Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Bornova-İzmir. (2006).

[4] Çetin, E.,"Sıfır Akım Anahtarlama Tekniğinin AC Besleme Yapan Bir Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemine Uygulanması"**,** Yüksek Lisans Tezi., ***Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Denizli, (2002).

[5] Başaran, Ö., "Güneş Pillerinin Matematiksel Modellenmesi**"**, Yüksek Lisans Tezi, ***Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Bornova-İzmir. (1995).

[6] Fitzpatrick, S., "A Method For Predicting PV Module and Array Performance At Other Than Standard Reportıng Condıtıons**"**, ***SOLAR2000 Conferance*** ,American Solar Energy Society, Madison, Wisconsin,U. S. A. (2000).

[7] Rauschenbach, H. S. ,"Solar Cell Array Design Handbook", ***Van Nostrand , Reinhold*** , NY, U. S. A., (1980).

[8] Lasnier France, A., Gan, T., "Photovoltaik Engineering Handbook", ***Adam Hilger***, NY, U. S. A. ,(1990).

[9] King, D. L. , Kratochvil, J. A. , Boyson, W. A., "Temperature Coefficients for PV Modules and Arrays: Measurement Methods, Difficulties and Results", ***26. IEEE Photovoltaics Specialists Conference***, Anaheim, CA, (1997).

[10] Duffie, J. , Backman, W. , "Solar Engineering of Thermal Processes", 2. Edition, ***John Wiley & Sons, Inc.,*** NY, U. S. A. , (1991).

[11] De Soto, Widalys. , "Improvement and Valıdatıon Of A Model For Photovoltaic Array Performance**"**, Master of Science Thesis, ***University of Wisconsin***-Madison, U. S. A. , (2004)

[12] Hadj Arab,A., Chenlo, F. ,Benghanem, M. , "Lost-of-load probability of photovoltaic water pumping systems", ***Solar Energy***, 76, 713-723, (2004).

[13] Mellit, A. , Benghanem, M. , Kalogirou, S. A. , "Modelling and simulation of a stand-alone photovoltaic system using an adaptive artificial neural network: Proposition for a new sizing procedure", ***Renewable Energy***, 32, 285-312, (2006).

[14] Kaushika, N. D. , Gautam, N. K. , Kaushik, K. , "Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array", ***Solar Energy, Materials & Solar Cells*****,** 85, 499-519, (2004).

[15] Munoz, F. J. , Almonacid, G. , Nofuentes, G. , Almonacid, F. , "A new method based on charge parameters ta analyse the performance of stand- alone photovoltaic systems", ***Solar Energy, Materials & Solar Cells*****,** 90, 1750-1763, (2006).

[16] Nafeh, A. E. S. A. , Fahmy, F. H. , Abu El –Zahab, E. M. , "Evaluation of a proper controller performance for maximum-power point tracking of a stand-alone PV system" ***Solar Energy, Materials & Solar Cells*****,** 75, 723-728, (2003).

[17] Salas, V. , Olias, E. , Lazoro, A. , Barrado, A. , "Evaluation of a new maximum power point tracker (MPPT) applied to the photovoltaic stand-alone systems", ***Solar Energy, Materials & Solar Cells*****,** 87, 807-815, (2005).

[18] Celik, A. N. , "Effect of different load profiles on the loss-of load probability of stan-alone photovoltaic systems" ***Renewable Energy***, 32, 2096-2115, (2007).

[19] Celik, A. N. , "Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid-connected photovoltaic-house", ***Renewable & Sustainable Energy Reviews***, 10, 370-387, (2006).

[20] James, P. A. B. , Bahaj, A. S. , Braid, R. M. , "PV array <5 kW_p+single inverter = grid connected PV system: Are multiple inverter alternatives economic?", ***Solar Energy***, 80, 1179-1188, (2006).

[21] Bahtiyar, B., "Fotovoltaik Sistemler İçin Gerçek Zamanlı Bir İzleme Merkezi Tasarım ve Uygulaması**"**, Yüksek Lisans Tezi, ***Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Muğla, (2006).

[22] Duru, H. T. , "A Maximum Power Tracking Algorithm Based On $I_{mpp} = f(p_{max})$ Functıon For Matching Passive and Active Loads To A Photovoltaic Generator**"**, ***Solar Energy*** 80 (2006) 812-822, (2005).

[23] http://en.wikipedia.org/wiki/DC_to_DCconverter, **10. 04. 2007. saat 17.00**

[24] Xue, Y. , Chang, L, Kjaer, S. B. , Bordorau, J. , Shimizu, J. , "Topologies of Single- Phase İnverters for Small Distributed power Generators: An overwiew", ***Transaction on PowerElectronics***, 19, 5, 1305-1314, (2004).

[25] Mohan, N. , "Power Electronics"3.Edition, ***Wiley İnternational***, 374-442, (2003).

[26] Hart, D. W. , "Introduction to Power Electronics", ***Prentice-Hall Inc***. , (1994).

[27] Kang, F-S. , Park, S-J. , Cho, S. U. , Kim, C-U. , "Multilevel PWM Inverters suitable for the Use of Stand –alone Photovoltaic Power Systems", ***Transactions on Energy Conversion***, 20, 4, 906-915, (2005).

[28] Blaabjerg, F. , Teodorescu, R. , Chen, Z. , Liserre, M. , "Power Converters and Control of Renewable Energy Systems", ***ICPE 2004***, (2004).

[29] Heier, S. , Grid integration of wind energy conversion systems", ***John Wiley***, (1998).

[30] Burton, T. , Sharpe, D. , Jenkins, N. , Bossanyi, E. , "Wind Energy Handbook", ***John Wiley***, (2000).

[31] Thoegersen, P. , Blaabjerg, F. , "Adjustable Speed Drives in the Next Decade. Future Steps in Industry and academia", ***Journal of Electric Power Components and systems***, 32, 1, 13-32, (2004).

[32] Baliga, B. J. , "Power IC's in the sadle", ***IEEE Spectrum***, 34-49, (1995).

[33] Ohnishi, T, "Three phase PWM converter/inverter by means of instantaneus active and reactive power control", ***inProc of IECON***, 819-824, (1991).

[34] Noguchi, T. , Tomiki, H. , Kondo, S. , Takahashi, I. , "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors", ***IEEE Trans. On Ind. App***. , 34, 473-479, (1998).

[35] Blaabjerg, F. , Chen, Z. , "Power electronics as an enabling technology for renewable Energy Integration", ***Journal of Power Elektronics***, 3, 2, 81-89, (2003).

[36] Blaabjerg, F. , Chen, Z. , Kjaer, S. B. , "Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems", ***IEEE Trans. On PE***, 19, 4, (2004).

[37] Hohm, P. D. , Ropp, M. E. , "Comparative Study of Maximum Power point Tracking Algorithms", ***Progres in Photovoltaics: Reserch and Aplications***, 11, 1, 47-62, (2002).

[38] Kim, Y. , Jo, H, Kim, D. , "A new peak power tracker for cost-effective photovoltaic power systems", ***IEEE Prceding***, 3, 1, 1673-1678, (1996).

[39] Kawamura, T. et al, "Analaysis of MPPT characteristics in photovoltaic power systems", SoLar ***Energy Materials and Solar cells***, Proceeding of the 1996 9th INternational Photovoltaic Science and Engineering Conference, PVSEC-9; 47, 14, 155-165, (1997).

[40] Enslin, J. H. R. , Wolf, M. , Swiegers, W. , "Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter", ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 44, 6, 769-773, (1997).

[41] Andersen, M. , Alvsten, B. , "200W low cost module integrated utility interface form odular photovoltaic energy systems", ***IECON:Proceedings of the 1995 IEEE 21st International Conferance on Industrial Electronics, Control and Instrumentation***, 1, 1, 572-577, (1995).

[42] Van Der Merwe, L. , Van Der Merwe, G. , "Maximum power point tracking-implementation strategies", Proceedings of the ***IEEE International Symposium on Industrial Electronics***, 1, 1, 214-217, (1998).

[43] Abou El Ala, M. , Roger, J. , "Optimization of the function of a photovoltaic array using a feedback control system", ***Solar Cells: Their Science, Technology, Applications and Economics***, 13, 2, 185-195, (1984).

[44] Salameh, Z. , Dagher, F. , Lynch, W. , "Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems", ***Solar Energy***, 46, 5, 279-282, (1991).

[45] Hussein, KH. , Zhago, G. , "Maximum power point tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions", ***IEE Proceedings of Generation, Transmission, Distribution***, 142, 1, 59-64, (1995).

[46] Brambilla, A. et al., "New approach to photovoltaic arrays maximum power point tracking",***Proceeding of the 30th IEEE Power Electronics Conference***, 632-637, (1998).

[47] Atlam, Ö. , "Alternatif bir Fotovoltaik Panel (PV) Modelinin Santrifüj Su Pompa Sistemlerine Uygulanması ve Performans Gelişimine Yönelik Yaklaşımlar", Doktora Tezi, ***Koceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İzmit, (2004).

[48] Kasa, N. , Takahiko, L. , Chen, L. , "Flyback Inverter Controlled by Sensorless Current MPPT for Photovoltaic Power System", ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 52, 4, 1145-1152, (2005).

[49] Kyritsis, A. C. , Papanikolaou, N. P. , Tatakis, E. C. , Kobougias, J. C. , "Design and control of a current source flyback inverter for decentralized grid-connected photovoltaic systems", ***Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on***, 1-10, (2005).

[50] KYOCERA KATALOGLARI, **Kyocera Solar, Inc**. , www.kyocerasolar.com

EKLER

EK-A: ÖNERİLEN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME ALGORİTMASININ GERÇEKLENMESİ

Maksimum güç izleme algoritmasının 8 bitlik bir mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmesi durumunda en sınırlayıcı özellik, $I_m=f(P_m)$ fonksiyonunun tanımlanacağı tablonun boyutudur. Yazılım için kullanılan PIC BASIC PRO dilinde, 16F877A için en çok her biri 8 bitlik bir değer içeren 255 elemanlı bir tablo tanımlanabilmektedir. Oluşturulan 255 elemanlık tablonun indeksi giriş, tablonun o indeksindeki eleman da çıkış verisini oluşturmaktadır. Bu şekilde herhangi bir çalışma durumunda hesaplanan güç değeri en çok 255 ile gösterilebilecek bir büyüklük olmak zorundadır. Akım ve gerilim 8 bit çözünürlüğünde örneklenirse, çarpma sonucu elde edilen sayı 255'e bölünerek bu sınırda kalması sağlanmalıdır.

Algoritmanın gerçekleştirilmesinde öncelikle kullanılacak panele ait bilinen I_m- P_m değer çiftleri kullanılarak bir uygun fonksiyon elde edilmelidir. Bu işlem herhangi bir eğri uydurma yazılımı ile gerçekleştirilebilir. Bu amaçla MATLAB "Curve Fitting Tool" yazlımından faydalanılmıştır. Tablo 6.1'de verilen

V_m=[16.52,16.73,16.81,17.66,17.83]
I_m =[1.37,2.78,4.23,5.56,6.95]
P_m =[22.64,46.59,71.19,98.18,120]

değerleri kullanılarak elde edilen 2. derece polinom

$$I = -2.31\ 10^{-5}\ P^2 + 0.06002\ P + \ 0.01615 \qquad (A.1)$$

şeklindedir. Bu polinom sayesinde herhangi bir güç değeri için, bu gücün maksimum güç olmasını sağlayacak akım değeri elde edilebilir. Örneklenen Akım ve gerilim için analog – sayısal dönüştürücüde kullanılacak sınır değerler, örnekleme çözünürlüğünü doğrudan etkileyecektir. PIC mikro denetleyicinin analog girişleri 5 V sınırına sahip olduğundan, güneş panelinin tüm işletme koşullarında bu sınırlarda kalması ve işletmede karşılaşılacak en büyük akım (kısa devre akımı) ve gerilim (açık devre gerilimi) değerlerinin en yüksek ışıma koşullarında dahi aşılmaması gereklidir. Açık devre gerilimi ve kısa devre akımının ışımanın 1000 W/m^2 'yi aşabileceği durumlarda bile bu sınırlarda kalabilmesi için 1000 W/m^2 ışımada panel akımından akım – gerilim dönüştürücü ile alınan örneğin, gerilime dönüştürülmüş değeri ve panel geriliminden gerilim bölücü üzerinden alınan gerilim örneğinin 1000 W/m^2 koşulu için 4 V ile sınırlanmasına karar verilmiştir. 8 bitlik analog-sayısal en yüksek kısa devre akımı dönüşümde 5 V 255 ile gösterilirse, 4 V'luk değer 204'e karşılık gelir. İşletmede oluşacak maksimum akım 1200 W/m^2 ışınım için 1000 W/m^2'deki akımın %20 'si olduğunda ise 244 ile temsil edilecektir. KC 120 paneli için değerler düzenlenirse, 1000 W / m^2 için açık devre gerilimi V_{oc} = 21.6 V, örnekleme girişi 4 V, 8 bitlik analog sayısal dönüştürücüde örneklenmiş değeri 204,

1000 W / m^2 için kısa devre akımı I_{sc} = 7.45 A, örnekleme girişi 4 V, örneklenmiş değeri 204 elde edilir. Maksimum güç noktasında ise, I_m = 6.95 A, örnekleme girişi 3.73 V, örneklenmiş değeri 190 olarak ve Vm= 17.36 V, örnekleme girişi 3.21 V, örneklenmiş değeri 163 elde edilir. Maksimum güç için örneklenmiş değerlerden P_m = 190 x 163 = 30970 ve 255'e bölünmesinden 121.45 (121) elde edilir. Bu şekilde 121 farklı güç değeri için 121 farklı akım referansı oluşturulabilir. Diğer güç değerleri için akım referansları da A.1 bağıntısı ve yukarıda açıklanan şekilde elde edilir ve 8 bitlik ölçekleme sonucunda PIC mikro denetleyiciye aktarılmaya hazır hale gelir.

ÖZGEÇMİŞ

Özgür YAKIŞAN, 1960 yılında Darende/ MALATYA' da doğdu. İlkokul ve ortaokulu Malatya'da bitirdi. Liseyi 1978 yılında Kadirli/ADANA' da bitirdi. 1980-1984 yılları arasında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde okudu ve mezun oldu. 1990 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim dalında Yüksek Mühendis ünvanı aldı. 1985-1992 Yılları arasında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak, 1992/1993 Eğitim Öğretim yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde ve Kocaeli Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak çalıştı. 1993/1994 eğitim öğretim yılında Dünya Bankası Endüstriyel Eğitim Proje II kapsamında DTCC Dover/Delaware-USA okulunda öğretim görevlisi yetiştirme programına katıldı. Halen Kocaeli Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve iki çocuk babasıdır.