

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YAKIT PİLLERİNİN ŞEBEKEDEN BAĞIMSIZ EV
UYGULAMASI**

Elektrik Müh. Ahmet Yiğit ARABUL

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makineleri ve Güç Elektronik Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Hadi SARUL (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI.....	3
2.1 Güneş Enerjisi	3
2.2 Rüzgar Enerjisi	5
2.3 Hidrolik Enerji.....	7
2.4 Jeotermal Enerji.....	8
2.5 Biyokütle Enerjisi	10
2.6 Gel-git Enerjisi	11
2.7 Dalga Enerjisi	12
2.8 Hidrojen Enerjisi.....	13
3. HİDROJEN ENERJİSİ	16
3.1 Hidrojenin Özellikleri	16
3.2 Hidrojenin Üretilmesi	17
3.2.1 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi.....	17
3.2.2 Suyun Elektrolizi İle Hidrojen Üretimi.....	18
3.3 Hidrojenin Depolanması	18
3.4 Hidrojenin Taşınması.....	20
3.5 Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanılması.....	20
4. YAKIT PİLLERİ	23
4.1 Yakıt Pili Teknolojisinin Gelişimi.....	23
4.2 Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi	25
4.3 Yakıt Pili Çeşitleri	27
4.3.1 Alkali Yakıt Pili.....	28
4.3.2 Erimiş Karbonat Yakıt Pili.....	29
4.3.3 Fosforik Asit Yakıt Pili	30
4.3.4 Katı Oksit Yakıt Pili	31
4.3.5 Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili.....	32
4.3.6 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili	34
4.4 Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması	35
4.5 Yakıt Pillerinin Uygulama Alanları.....	39

4.5.1	Uzay Çalışmaları ve Askeri Alanlar	39
4.5.2	Ulaşım ve Taşıma	40
4.5.3	Sabit Güç Santralleri	41
4.5.4	Taşınabilir Uygulamalar	41
4.6	Yakıt Pillerinin Avantaj ve Dezavantajları	43
4.6.1	Yakıt Pilleri'nin Avantajları.....	43
4.6.2	Yakıt Pillerinin Dezavantajları	43
5.	GÜÇ KOŞULLANDIRMA ÜNİTELERİ	45
5.1	Yükseltici Tip DC-DC Dönüştürücü	45
5.2	Eviriciler.....	48
5.2.1	Tek Fazlı Yarım Köprü Evirici.....	49
5.2.2	Tek Fazlı Tam Köprü Evirici	50
6.	SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	54
6.1	Simülasyon Modeli	54
6.2	Simülasyon Sonuçları	60
7.	SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER	68
KAYNAKLAR		71
ÖZGEÇMİŞ.....		74

SİMGE LİSTESİ

ΔI_L	Endüktans akımı üzerindeki tepeden tepeye değişim miktarı
ΔU_C	Kondansatör gerilimi üzerindeki tepeden tepeye değişim miktarı
A	Amper
$BTEP$	Bin ton eşdeğer petrol
C	Kondansatör
D	Çalışma oranı
D	Diyot
DT_S	Bir anahtarlama periyodu esnasında anahtarlama elemanın ne kadar iletimde olacağı
F	Farad
I_i	Akım
I_g	Giriş akımı
$I_{L\ max}$	Endüktans akımının maksimum değeri
$I_{L\ min}$	Endüktans akımının minimum değeri
I_L	Endüktans akımı
J	Joule
K	Kelvin
L	Endüktans
M	Anahtarlama elemanı (MOSFET)
mH	MiliHenry
mol	Mol (Madde miktarı)
$MTEP$	Milyon ton eşdeğer petrol
$^{\circ}C$	Santigrat derece
R	Yük direnci
T	Periyot süresi
t_{on}	Anahtarlama elemanın iletimde tutulduğu süre
T_S	Anahtarlama periyodu
$U_{C\ max}$	Kondansatör geriliminin maksimum değeri
$U_{C\ min}$	Kondansatör geriliminin minimum değeri
U_C	Kondansatör gerilimi
$U_{\check{C}}$	Evirici çıkış gerilimi
U_D	Diyot gerilimi
U_g	Evirici giriş gerilimi
V	Gerilim, Volt
V_i	DC-DC dönüştürücü giriş gerilimi
V_L	Endüktans gerilimi
V_O	DC-DC dönüştürücü çıkış gerilimi

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletkenli Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
MPPT	Maksimum Güç Noktası Takibi (Maximum Power Point Tracker)
PEM	Proton Geçirgen Zar (Proton Exchange Membrane)
PEMYP	Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
PI	Orantılı İntegral (Proportional Integral)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
YP	Yakıt Pili (Fuel Cell)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Güneş pili enerji sisteminin şeması.....	5
Şekil 2.1	Rüzgar türbininde enerji dönüşümü	6
Şekil 2.2	İki türbinli bir gel-git barajının temsili gösterimi [1]	12
Şekil 2.3	Hidrojen enerji sistemi	15
Şekil 4.1	William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt pili [2]	23
Şekil 4.2	Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili (Yıldızbilir, 2006).....	24
Şekil 4.3	Yakıt pilinin çalışma prensibi	26
Şekil 4.4	Alkali yakıt pilinin çalışma biçimi	28
Şekil 4.5	Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma biçimi	29
Şekil 4.6	Fosforik asit yakıt pilinin çalışma biçimi	30
Şekil 4.7	Katı oksit yakıt pilinin çalışma biçimi	32
Şekil 4.8	PEMYP'nin çalışma biçimi	33
Şekil 4.9	Doğrudan metanol kullanılan yakıt pilinin çalışma biçimi	34
Şekil 4.10	Bütün yakıt pili çeşitlerinin çalışma biçimleri	36
Şekil 5.1	Yükseltici tip DC-DC dönüştürücü devre şeması	45
Şekil 5.2	Anahtar iletim konumunda iken yükseltici dönüştürücü eşdeğer devresi	46
Şekil 5.3	Anahtar kesim konumunda iken yükseltici dönüştürücü eşdeğer devresi	47
Şekil 5.4	Yükseltici dönüştürücü temel dalga şekilleri	48
Şekil 5.5	Yarım köprü evirici devre şeması	49
Şekil 5.6	Yarım köprü evirici temel dalga şekilleri	50
Şekil 5.7	Tam köprü evirici devre şeması	51
Şekil 5.8	Tam köprü evirici temel dalga şekilleri.....	52
Şekil 6.1	Simülasyon modeli	54
Şekil 6.2	DC-DC dönüştürücü modeli	55
Şekil 6.3	PI kontrolör	56
Şekil 6.4	PWM üretici	57
Şekil 6.5	Tam köprü evirici modeli	57
Şekil 6.6	Bir evin günlük yük talebi	58
Şekil 6.7	Simülasyonda kullanılan yük talebi	59
Şekil 6.8	Yük modeli	60
Şekil 6.9	Yakıt pili gerilimi	60
Şekil 6.10	Yakıt pili akımı	61
Şekil 6.11	Batarya akımı	62
Şekil 6.12	Batarya şarj durumu	62
Şekil 6.13	DC-DC dönüştürücü giriş akımı	63
Şekil 6.14	DC-DC dönüştürücü çıkış gerilimi	63
Şekil 6.15	Çıkış gerilimi	64
Şekil 6.16	Çıkış gerilimi dalga şekli.....	65
Şekil 6.17	Çıkış akımı dalga şekli	65
Şekil 6.18	Çıkış akımı ortalama değeri.....	66
Şekil 6.19	Sistem tarafından yüke aktarılan aktif güç	67
Şekil 6.20	Sistemde oluşan reaktif güç	67

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Hidrojen elementinin özellikleri (Doğan, 2008).....	16
Çizelge 3.2	Değişik ortamlarda depolanabilecek hidrojen miktarı ve yoğunlukları	19
Çizelge 4.1	Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri (Vural, 2010).....	35
Çizelge 4.2	Yakıt pillerinin kimyasal tepkimeleri.....	37
Çizelge 4.3	Yakıt pili çeşitlerinin karşılaştırılması	38
Çizelge 5.1	Tam köprü eviriciye ait anahtarlama durumları.....	53
Çizelge 6.1	DC-DC dönüştürücü parametre değerleri.....	55
Çizelge 6.2	Evirici modelinin parametreleri	58

ÖNSÖZ

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren ve bu tezi hazırlayabilecek aşamaya gelmemde en büyük katkı sahibi olan Sayın danışman hocam Prof. Dr. M. Hadi SARUL'a, çalışmamın birçok aşamasında bana yol gösterici olup değerli vakitlerini ayıran Sayın Öğr. Gör. Dr. Mustafa Gürkan AYDENİZ'e, hiçbir zaman değerli yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Celal Fadıl KUMRU ve Arş. Gör. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ'ye, dostlukları ve sonsuz destekleri için Elk. Müh. Batuhan YAVUZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca her günümde olduğu gibi bu çalışma boyunca da bana verdikleri destek ve gösterdikleri anlayış için aileme, arkadaşlarıma ve Y.T.Ü. Elektrik Makinaları Laboratuvarı'ndaki tüm çalışma arkadaşlarımla hocalarıma şükran ve sevgilerimi sunarım.

ÖZET

Günümüzde fosil yakıt rezervlerinin tükenmeye başlaması ve aynı zamanda bu yakıtların olumsuz çevresel etkilerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı önem kazanmıştır. Artan yük talebi doğrultusunda kullanılacak olan enerjinin de düşük maliyetli, yenilenebilir ve kaliteli olması aranmaktadır. Bu kriterleri sağlayan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidrojen enerjisinin kullanım alanları da hızlı bir şekilde artmaktadır.

Yakıt pilleri, ihtiyaç olunan yerde, iklim şartlarından bağımsız ve kesintisiz bir şekilde enerjiyi sağlayabilen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojilerini kullanabilen bir yapıya sahip olduğu için yenilenebilir enerji kaynakları içinde önemli bir yere sahiptir.

Son zamanlarda konutların elektriğe olan ihtiyacının artması nedeniyle, yakıt pillerinin bu alanda kullanılması da gündeme gelmiştir. Yakıt pilleri, evsel yük ihtiyacını karşılayabilecek kadar küçük güçlerde üretilebilmesi ve aynı zamanda bu yüklerin de çok dinamik bir yapıya sahip olmaması nedeniyle konut uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışmada, bir evin yük ihtiyacını karşılayabilmek için yakıt pili kullanılarak simülasyon çalışması yapılmıştır. Yakıt pilinin ve sistem performansının, gün içerisindeki değişken yük talebine karşı gösterdiği performansın görülmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yakıt pili, hidrojen enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları, evsel yük

ABSTRACT

The use of renewable energy resources has recently gained importance due to a start in the running out of fossil fuel reserves and also their negative impact on the environment. Along with the increasing demand for load, it is looked for that the energy to be used should also be renewable of high quality and low cost. The usage areas of hydrogen energy which provide us with these criteria have been rapidly increasing.

As they have the ability to use highly efficient energy transformation technologies which provide a non-stop energy by being independent from climate conditions whenever needed, fuel cells have an important place among the energy resources.

Due to the recent increasing demand of houses for electricity, the use of fuel cells in these areas have come into discussion. As they can be produced in low powers which can meet the need for residential loads and as these loads do not have a very dynamic structure, fuel cells have begun to be used in the housing applications.

In the present study, a simulation is done by using a fuel cell in order to meet the load need of a house. The performance of fuel cell and system performance in reaction to changing demand for load throughout a day is intended to be seen.

Keywords: Fuel cell, hydrogen energy, renewable energy sources, residential load

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun ve yaşam standartlarının artması, enerjiye olan gereksinimleri arttırmaktadır. Günümüzde enerji ihtiyacının oldukça büyük bir kısmını karşılamak için kullanılan petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıtlarının rezervleri sınırlı olmakla beraber gün geçtikçe azalmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların, çevreye ve dolayısıyla insan sağlığına vermiş oldukları zararlar göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynakları, üzerinde önemle durulması gereken bir konu haline gelmiştir.

Fosil yakıtlarının sınırlı rezervleri ve hızla tüketilen kaynakları, petrol bazlı yakıtların fiyatlarında artmaya sebep olmaktadır. Kullanıldıkları takdirde çevreye yaydıkları zararlı gazlar küresel ısınmaya sebep olmakta, bununla birlikte buzulların erimelerine, deniz seviyelerinin yükselmesine ve sera etkisi gibi gezegenimizi günden güne yok edecek etkilere sebep olmaktadır. Tüm bunlar düşünüldüğünde, gelecek için önerilen çözümlerin başında yenilebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve kullanılması gelmektedir.

Dünya enerji talebinin büyük bir kısmını petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil yakıtlar karşılamaktadır. Hızla tükenmekte olan bu yakıtların yanmaları sonucunda oluşan sera etkisi, ozon delikleri, asit yağmurları ve kirlilik, dünyadaki yaşam için büyük sorunlar oluşturmaktadır. Birçok bilim adamı bu tür küresel sorunların giderilmesi için gerekli olan çözüm yollarından biri de, var olan fosil yakıt sistemini Hidrojen Enerji Sistemi ile değiştirmek olduğu kanaatindedir. Oldukça verimli ve temiz bir enerji kaynağı olan hidrojenin yakıt olarak kullanılması, sera gazları, ozon delikleri, asit yağmurları ve kirlilik gibi sorunların çözülmesine yardımcı olacaktır. Enerji üretiminde kullanılan hidrojen, yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak üretilir ise oluşturulacak olan sistem fosil yakıtlarda olduğu gibi çevreye zarar vermeyecektir. Su döngüsüne tabi olarak kendi kendini yenileyeceğinden dolayı fosil yakıtlarda günümüzde meydana gelen sorunların gelecekte hidrojen sistemlerinde yaşanmaması beklenmektedir. Bununla birlikte, sentetik fosil yakıt üretimi gibi petrol bazlı enerji sistemleri de bulunmaktadır. Mevcut kömür rezervleri kullanılarak, sentetik benzin ve doğal gaz üretecek olan bu sistemler, üretimleri ile günümüz fosil sisteminin devamını garanti edecektir. Hidrojen enerjisi ve sentetik fosil yakıt sistemi, bugünkü fosil yakıt sistemine alternatif olan enerji üretim yöntemleridir. Günümüzde kullanılan sistem, maliyet, çevre zararları ve kullanım verimliliği bakımından diğer sistemlerle karşılaştırıldığında, hidrojen enerji sisteminin en iyisi olduğu ve 21. Yüzyılın sonundan önce fosil yakıt sisteminin yerini alması gerektiği sonucu öngörülmektedir. Dünyada ABD, AB Ülkeleri ve Japonya gibi ülkeler enerji sistemlerini, hidrojen enerji sistemi ile desteklemeyi planlamakta ve bu konuda

alışmalarını sürdürmektedirler. Ülkemiz de endüstriyel olarak gelişmiş bu ülkeleri yakalamak için, bir an önce hidrojen enerjisi kervanına katılmalı ve hidrojen enerji sistemine geçişini planlamaya başlamalıdır (Veziroğlu, 2003).

Bu tez çalışmasında öncelikle yenilenebilir enerji kaynakları hakkında genel bilgi verilmiştir. Daha sonra bu kaynaklardan hidrojen enerjisi üzerinde durularak, yakıt pillerinin çalışma prensibi, özellikleri ve eşitleri incelenmiştir. Çalışmanın sonunda ise evsel bir yük talebini karşılamak üzere seçilen bir yakıt pilinin çalışması benzetim ortamında incelenmiştir.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

Dünya enerji ihtiyacının büyük bir kısmını petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlardan karşılamaktadır. Ancak rezervleri sınırlı olan fosil yakıtları, çevreye zarar vermekte ve kullanımı günden güne azalmaktadır. Bunların yanında dünya nüfusunun hızlı bir şekilde artması ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, dünya enerji talebinde hızlı bir artış görülmesi, insanlığı elde bulunan kaynakları en verimli şekilde kullanmaya ve alternatif enerji arayışlarına yöneltmiştir. Fosil yakıtların kullanımından dolayı atmosferde oluşan sera etkisi ve buna bağlı olarak oluşan küresel ısınma gibi çevresel problemler, çevre dostu yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yapılan çalışmaları çok önemli bir konuma taşımıştır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarında, fosil ve nükleer enerjide bulunan hammadde problemi olmamakla birlikte, hammadde potansiyeli çok fazladır. Örnek olarak rüzgar ve güneş enerjisi düşünüldüğünde, kaynak sıkıntısının olmadığı görülmektedir. Bu konulardaki ilerlemeler, öncelikle petrol yatakları olmayan ülkelerde başlamış fakat günümüzde dünyanın her tarafında alternatif enerji kaynakları ile enerji üretiminin gerekliliği açıkça ortaya konmuştur. Ülkeler doğal kaynaklarına, iklim koşullarına ve gelişmişlik düzeylerine bağlı olarak yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı araştırma ve uygulama çalışmalarını hızlandırmışlardır. Bu çalışmada incelenecek olan hidrojen, temiz bir enerji kaynağı olmasının yanında diğer enerji kaynaklarının enerjilerini depolamak için de uygun bir araçtır. Ayrıca hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarının araçlarda kullanımını sağlamak için bu enerjileri yakıt formuna da dönüştürebilir.

Enerji talebinin büyük bir bölümünü dışalım ile karşılayan Türkiye'nin, enerji üretiminde ve dışalımında yıllara bağlı olarak bir artış görülmektedir. Bununla birlikte yerli üretimin enerji talebini karşılama oranında ise azalma görülmektedir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003). Toplam kömür üretiminden sonra, yenilenebilir enerji kaynakları üretim potansiyeli en çok olan kaynaklardır. Ancak ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik enerji üretim planlamaları yetersizdir. Yenilenebilir enerji kaynakları sürdürülebilir enerjinin temini için büyük ve önemli bir potansiyel oluşturmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynakları güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidrolik enerji, jeotermal enerji, biyokütle enerjisi, gel-git enerjisi, dalga enerjisi ve hidrojen enerjisi olarak sınıflandırılabilir.

2.1 Güneş Enerjisi

Güneş, dünyamızın ve başka gezegenlerin enerji ihtiyacını karşılayan enerji kaynağıdır. Dünyamızın en büyük enerji kaynağı olarak bilinen güneş enerjisi, tarihsel süreç içerisinde

elektrik enerjisi üretiminde de kendisini göstermiştir. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimini sağlayan sistemler “Fotovoltaik Sistemler” olarak adlandırılırlar (Kekezoğlu, 2007).

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarından üzerine en çok çalışılan güneş enerjisi olmuştur. Bitkiler, canlı doku üretmek ve besin yapabilmek (fotosentez) için güneş enerjisinden faydalandığı gibi rüzgar da güneş ışınlarının havada sıcaklık farkı oluşturmasıyla meydana gelir. Bunların yanında kömür ve bitki artıklarından petrol meydana gelmesi de güneş enerjisi sayesinde. Bu durumda güneşi ana enerji sağlayıcısı olarak görmek mümkündür (Doğan, 2008).

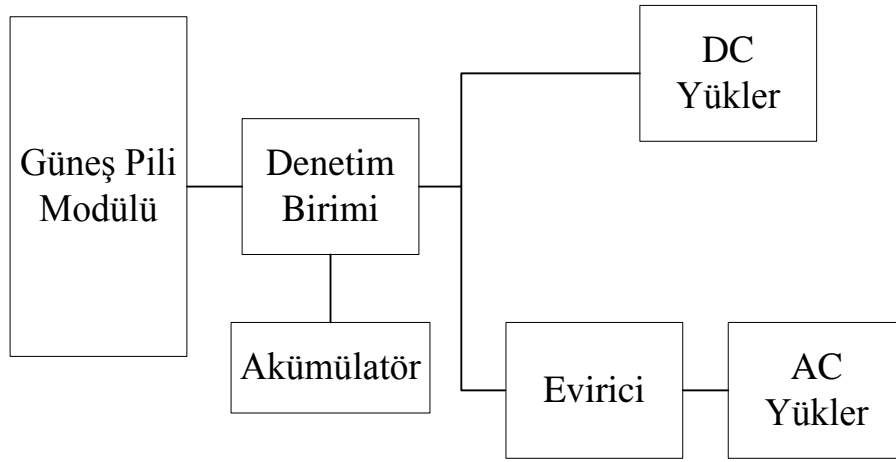
Yıllık güneşlenme süresinin 2640 saat olduğu ülkemiz üzerine yılda 80 MTEP güneş enerjisi düşmektedir. Bu enerjiden ağırlıklı olarak sıcak su elde edilmesinde yararlanılmakta, 287 BTEP/yıl değerinde enerji, güneş toplacıları “kolektörler” ile elde edilmektedir. Ancak ülkemizde güneşten, 1 MW/yıl değerinde elektrik üretilmektedir ve bu miktar çok azdır. Aynı şekilde binalarda güneşten etkin yararlanmak ve şebekeden bağımsız güneş pili ile aydınlatma sistemleri kullanılmasını sağlamak için güneş enerjisi sistemlerinin teşvik edilmesi gerekmektedir. Dünyada gittikçe yaygınlaşan güneş evi ve sera uygulamaları yararlanılması gereken örneklerdendir. Güneş enerjisinden, güneş termik santralleri ile dolaylı olarak ve güneş pilleri (PV- Fotovoltaik güç sistemi) ile doğrudan elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Günümüzde gelişen teknoloji ile güneş pillerinin ticari uygulamaları başarıyı yakalamıştır (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

Güneş elektrik sistemlerini ele alırsak, elektrik üretimi doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki yöntemle yapılabilmektedir. Doğrudan yöntemde fotoelektrik, termoelektrik, fotovoltaik ve termioyonik çeviriciler bulunur. Büyük çapta elektrik üretiminde bunlardan sadece fotovoltaik sistemler kullanılabilmektedir. Burada fotovoltaik sistem için büyük olarak bahsettiğimiz güç, günümüz elektrik santrallerinin gücü yanında küçük kalmaktadır. Dolaylı yöntem ise güneş termik elektrik üretimidir. Bu tür sistemler senkron jeneratör vasıtası ile AC elektrik üretirler. Bugün elektrik santralleri ile kıyaslanınca orta ve büyük güçlü güneş termik elektrik santrallerinin kurulabileceği görülmüştür.

Fotovoltaik dönüşümünde kullanılan pillerin çok çeşitli yüzeylere uygulanabilir olmalarının yanı sıra sınırsız ve tükenmez olan güneş ışığını kullanmaları, uydu ve uzay araçlarında da tercih edilen kaynak olmalarına yol açmıştır. Güneş pilleri; seri ve paralel bağlanarak fotovoltaik panelleri meydana getirirler. Aynı şekilde bahsi geçen panellerde istenilen gücü elde etmek amacıyla birleştirilerek de kullanılabilir.

Elektrik enerjisine ihtiyaç duyulan ve yeterince ışınım alan yüzeye sahip her uygulamada

güneş pilleri kullanılabilir. Uygulama koşullarına bağlı olarak güneş pili modülleri akümülatörler, eviriciler, akü şarj denetim aygıtları ve elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş paneli sistemi yani fotovoltaik sistem oluştururlar. Şekil 2.1’de şebekeden bağımsız bir güneş pili enerji sisteminin şeması gösterilmiştir. Özellikle elektrik şebekesi olmayan, yerleşim yerlerinden uzak olan bölgelerde, jeneratöre yakıt taşınmasının da zor ve pahalı olduğu durumlarda çok elverişli olarak kullanılabilen sistemlerdir. Bunun haricinde dizel jeneratörler gibi başka enerji kaynakları ile hibrit olarak kullanılmaları da mümkündür.



Şekil 2.1 Güneş pili enerji sisteminin şeması

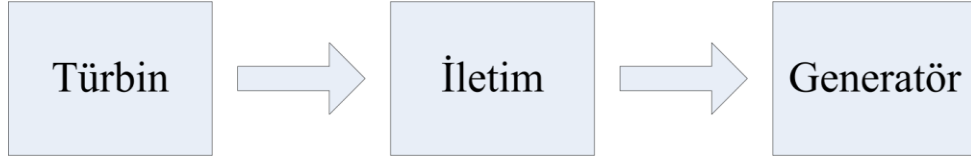
Bu tür sistemlerde güneş pili modülü sayısı öngörülen ihtiyaca göre belirlenerek, enerji kaynağı olarak kullanılır. Yukarıdaki şekilde gösterilen akümülatör, güneşin yetersiz olduğu veya hiç olmadığı gece saatlerinde elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak üzere konulmuştur. Güneş pili sistemleri güneşin olduğu saatler boyunca elektrik enerjisini üreterek yükün ihtiyacı olan elektrik enerjisini karşılar ayrıca ihtiyaç fazlası olan enerjiyi ise güneş enerjisinin olmadığı veya yetersiz olduğu saatlerde yükü besleyebilmek üzere akülerde depolar. Denetim birimi ise akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek ayrıca maksimum güç noktası takibi (MPPT) ile güneşten en verimli şekilde faydalanmayı sağlamak amacı ile kullanılır. Kullanılabilir bir AC gerilime ihtiyaç olunan uygulamalarda ise sisteme bir evirici eklenerek akümülatördeki DC gerilim, AC gerilime dönüştürülür. Bunun gibi ihtiyaçlara bağlı olarak farklı uygulamalar için çeşitli elektronik devreler sisteme katılabilir.

2.2 Rüzgar Enerjisi

Güneş ışınları yeryüzünün her bir parçasını farklı oranlarda ısıtır, bunun sonucunda basınç farklılıkları meydana gelmektedir. Buradaki basınç farklılığından dolayı hava, yüksek

basınçtan alçak basınca doğru hareket etmektedir. Havanın bu hareketine rüzgar denir ve güneş enerjisinin dolaylı bir ürünüdür. Dünya üzerine gelen güneş enerjisinin yaklaşık olarak %2'si rüzgar enerjisine dönüşmektedir. Bu enerjiyi insanoğlu çok eski dönemlerden beri kullanmaktadır (Boynueğri, 2010).

Basit bir ifade ile bir rüzgar türbinindeki enerji dönüşümü kanatlara çarpan rüzgarın rotoru çevirmesi ve rotorun miller vasıtası ile generatörü tahrik etmesi ile açıklanabilir. Şekil 2.1'de rüzgar türbinindeki enerji dönüşümünün basit bir hali gösterilmiştir (Kekezoğlu, 2007).



Şekil 2.1 Rüzgar türbininde enerji dönüşümü

Çevresel faktörler ve artan enerji ihtiyacı sebebi ile rüzgar enerjisini kullanarak elektrik enerjisi elde eden sistemler üzerine yapılan çalışmalar, son yıllarda büyük oranda artmıştır. Bu enerji kaynağı da güneş enerjisinde olduğu gibi tükenmeyecek bir enerji kaynağıdır. Böyle kaynaklar dış ülkelere olan bağımlılıklardan bizleri kurtarmaya yarayacak olan yerli enerji kaynaklarıdır. Ayrıca rüzgar enerjisi daha aktif kullanıldığı takdirde rezervleri sınırlı olan fosil yakıtlarında tüketimi belirli bir oranda azaltılmış olur.

Rüzgar potansiyeli olarak düşünüldüğünde denizlerin karalardan daha yüksek bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Kıyıdan uzak noktalara kurulan bir rüzgar santralinde enerji açısından verim sağlanır fakat iletim maliyetleri artmaktadır.

Türkiye'de elektrik üretmeye yönelik rüzgar potansiyeli yüksek olan bölgeler Marmara, Ege ve Akdeniz kıyılarıdır. Ülkemiz bu potansiyeliyle dünya üzerindeki rüzgar gücü potansiyeli yüksek ilk %30 alan içindedir ve ülkemizde rüzgar enerjisi toplam teknik potansiyeli 88000 MW'tır (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

Rüzgar enerjisinden, mekanik olarak su pompajında, elektrik elde edilmesinde jeneratörler ve santrallerde yararlanılmaktadır. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü uygulamalar şebeke bağlantısı olup olmama durumuna göre iki başlık altında incelenmektedir. Bunlardan şebekeye bağlı olmayanların güçleri bireysel olarak 1 kW üzerinde olabiliyor iken şebekeye bağlı rüzgar tarlalarının güçleri 6 MW ile 7 MW arasında olabilmektedir. Bireysel türbinlerden elde edilen elektrik akülerde depolanabildiği gibi başka kaynaklarla kombine edilerek de kullanılabilir. Bu uygulama deniz fenerleri, gözlem noktaları ve iletişim

istasyonları gibi yerler için çok uygundur (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisini üretirken karşılaşılabilecek en büyük sorunlar; güç çıkışının kontrol edilmesi, yüksek rüzgarda yeterli güvenliğin sağlanması ve sistemin frenlemesi ile aşırı üretimin önlenmesi olarak söylenebilir. Bu sistemde rotor hızının kontrolünün sağlanması için oluşturulan güç elektroniği devrelerinin bakım ve kurulum maliyetlerini arttırması da bu sistemin bir dezavantajıdır.

Rüzgar türbinleri, inşaatın başlamasından üretime geçişe kadar birkaç ay gibi kısa bir zamanda kurulabildiğinden bu tür santrallerin kurulumlarının hidroelektrik santrallere göre daha hızlı ve kolaydır. Ancak rüzgar türbinlerinin avantajları yanında bir takım dezavantajları da bulunmaktadır. Bu türbinler gürültülü çalışmalarının yanında kuş ölümlerine de sebep olabilirler. Görsel ve işitsel olarak kirliliğe yol açtıkları gibi radyo ve televizyon parazitlerine de yol açmaktadırlar. Bahsi geçen sebeplerden dolayı da milli parklar içine ve şehir merkezine yakın alanlara kurulması pek uygun görülmemektedir.

2.3 Hidrolik Enerji

Günümüzde en çok kullanılan yenilenebilir enerji kaynağının suyun potansiyel enerjisine dayalı olan kaynaklar olduğu söylenebilir. İnsanoğlu suyun enerjisini çok uzun zamandan beri kullanmaktadır. Geçmişte değirmenlerde kullanılan suyun potansiyel enerjisi, şimdilerde elektrik enerjisi elde etmek için kullanılmaktadır.

Bu amaçla, nehirlerin ve derelerin üzerine barajlar kurularak sudan potansiyel enerji elde edilmektedir. Hidroelektrik santralleri, yüksekten düşen suyun kinetik enerjisinin öncelikle türbin rotorlarına çarparak mekanik enerjiye, daha sonra da elektrik enerjisine dönüştürülmesi prensibine dayalı üretim yapan tesislerdir.

Türbinlere birim zamanda verilen su miktarını tanımlayan debi (m^3/s) ve üst su seviyesi ile çıkış su seviyesi arasındaki yükseklik farkı olan düşü (m), hidroelektrik santrallerde üretilecek enerji miktarında etkili olan değişkenlerdir. Bu santrallerin dezavantajlarından bir tanesi yük faktörünün su rejimine bağlı olarak değişken ve oldukça düşük olmasıdır.

Hidroelektrik santraller uzun süreli yağış, su, jeolojik çalışmaların yapılması, su altında kalacak olan arazilerin istismak bedelleri ve baraj yapım maliyetlerinin yüksek olması gibi sebeplerden dolayı ilk kurulum maliyetleri oldukça yüksektir ve bu büyük bir dezavantajdır. Her ne kadar kurulduktan sonra elektrik üretimi esnasında çevreye zarar vermeyen bir yenilenebilir enerji kaynağı olsa da, ilk kurulumu esnasında tarihi yerlerin yok olmasına sebep olan, doğal hayata zarar verebilen ve pek çok ağacın kesilmesine sebep olan bir enerji

kaynağıdır.

Hidroelektrik santrallerinin avantajları olarak, çevre için kirlilik yaratmamasını, puant enerji ihtiyacında çabuk devreye girmesini ve gerektiğinde hızla devreden çıkabilmesini, dışa bağımlı bir enerji olmayışını ve yapay göllü santrallerin sosyal ve sulama, sel kontrolü, balıkçılık gibi ekonomik yaşantıya katkılarının bulunmasını söyleyebiliriz. Yakıt maliyetleri olmayan bu tip santrallerin, işletme ve bakım maliyetleri düşüktür. Ayrıca ekonomik ömürleri de uzundur. Büyük santrallerde her 35-50 yılda bir elektro-mekanik aksamaların yenilenmesi üzerine en az 200 yıl ömür biçilmektedir. Barajın ömrü ise daha uzundur. Diğer enerji kaynakları düşünüldüğünde verimi daha yüksektir. Eski kurulan santrallerde %65'lerde olan verim günümüzde %90'lar seviyelerine ulaşabilmektedir.

Türkiye'nin brüt hidroelektrik potansiyeli 433 TWh/yıl iken, bunun ekonomik hidroelektrik enerji potansiyeli ise 125 Milyar kWh'tir. Ancak bu potansiyelin %30'unu değerlendirmektedir. Ekonomik potansiyel göz önünde tutulduğunda Avrupa ülkeleri arasında ikinci sırada bulunan ülkemizde, 129 hidroelektrik santral işletmede bulunmaktadır. Hidroelektrik santraller, termik santraller ve doğal gaz santralleri ile karşılaştırılır ise, dünyadaki eğilimler ve çevresel faktörler de dikkate alındığında, hidroelektrik santraller avantajları ile öne çıkmaktadır. Türkiye, mevcut enerji potansiyelini etkin bir şekilde değerlendirmeli, havza planlamaları yapmalı, mevcut santrallerin kapasiteleri verimli kullanılmalı, küçük çaplı hidroelektrik santralleri kurulmalı, özel sektörün katılımı arttırılmalı ve baraj elektromekanik aksamalarının ve kontrol sistemlerinin yurtiçinde üretilmesi teşvik edilmelidir. Bunlar gerçekleştiği takdirde, barajların yapıldığı bölgelerde sosyo-ekonomik gelişme sağlanacaktır. Bu alanda karşılaşılabilecek finansal sorunlar için yap-işlet, yap-işlet-devret, yap-sahiplen-işlet, işletme haklarının devredilmesi ve otoprodüktör sistemi gibi seçenekler, uygun yasal zemin çerçevesinde yerli girişimcilerce desteklenmelidir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

2.4 Jeotermal Enerji

Yeryüzü kabuğunun farklı tabaklarında birikmiş basınç altındaki su, buhar, gaz veya sıcak kuru kayaçların içindeki ısı enerjisine yani yer kabuğunda bulunan ısıya jeotermal enerji denmektedir. Bu enerjiden yararlanma, yer yüzeyine çıkan sıcak sular aracılığıyla olmaktadır. Eski çağlardan beri kullanılan kaplıcalar, jeotermal enerjinin ilk kullanım alanları olarak gösterilebilir. Jeotermal enerji, kaynağın sıcaklığına bağlı olarak ısıtma uygulamalarında ve elektrik üretiminde kullanılabilir ya da elektrik üretiminde faydalanılır. Elektrik enerjisi üretimi amacıyla 20. yüzyılın başlarından itibaren jeotermal santraller kurulmaya

başlanmıştır. Fakat yeterince tanınmadığından, dünya genel enerji üretiminin yalnızca %0,05'lik bir payını oluşturmaktadır.

Bu enerji kaynağında, yer altındaki sıvılar ile birlikte gelen zararlı maddeler için gerekli tedbirlerin alınması gerekir. Ancak bu şekilde olduğunda çevreye zararı olmayan temiz bir teknoloji olduğu söylenebilir. Jeotermal enerji; kullanılan sıcak suyun reenjeksiyon, yani akışkanın geri yer altına verilmesi koşulu ile yenilenebilir enerjiler arasında sayılabilir.

Jeotermal enerji, rüzgar, yağmur ve güneş gibi meteorolojik koşullara bağlı olmadığı için daha güvenilir bir enerji kaynağı olarak görülse de reenjeksiyon uygulanmadığı takdirde ömürleri kısalmır. Daha önceden bahsettiğimiz enerji kaynakları olan güneş ve rüzgar, hidrolik santrallere göre daha az alan işgal ederler. Jeotermal santrallerin kurulumu kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir. Kurulum esnasında gerekli yatırımların yapılması halinde verimlilik %95'lere kadar çıkabilir. Bununla birlikte bakımları düzenli ve dikkatli yapılmaz ise korozyona bağlı verim kayıpları ve hasarlar ortaya çıkabilir. Bu durumda bakım maliyetlerinde artış meydana gelebilir.

Türkiye, brüt jeotermal elektrik potansiyeli ile dünya sıralamasında yedinci sırada bulunmaktadır ve bu potansiyel 4500 MW değerindedir. Ülkemizde jeotermal elektrik üretim miktarı oldukça düşüktür. Bu sebeple santral sayılarının artması gerekmektedir. Türkiye'de bulunan jeotermal sahaların yaklaşık %35'inde henüz kuyu açılmamıştır. 170 jeotermal alan bulunmasına rağmen 105 kuyu açılmıştır. Bu 170 adet sahanın 35 °C üzerinde sıcaklığa sahip olduğu saptanmıştır. Bunlardan 161 tanesi merkezi ısıtma, endüstriyel proses ısısı ve kaplıca kullanımına uygun olup; Batı, Kuzey-Batı, Orta Anadolu, ve Doğu Anadolu'da toplanmıştır. Elektrik enerjisi üretimi ve entegre ısıtma sistemleri için uygun olan sahalar ise; Denizli-Kızıldere, Aydın-Germencik, Aydın-Salavatlı, Çanakkale-Tuzla, Manisa-Salihli, Kütahya-Simav, İzmir-Seferihisar ve Aydın-Yılmazköy'dedir. Sıcaklığı 150 °C'den düşük olan jeotermal kaynaklar verimin düşük olması sebebiyle doğrudan elektrik elde edilmesi için kullanılamamaktadır. Türkiye'de ilk jeotermal santral 1984 yılında Denizli-Kızıldere'de kurulmuştur ve kurulu gücü 20,4 MW'dır. Aydın-Germencik'te kurulu gücü 50 MW ile 100 MW arasında olacak yeni santral için girişimler sürmektedir. Ülkemizdeki jeotermal potansiyelin ortaya konması, yeni kuyuların açılması, yap-işlet-devret modeli ile elektrik enerjisi elde edilmesinin teşvik edilmesi, yatırımların kolaylaştırılması, yerel yönetimlerce ısıtma uygulamalarının arttırılması ve konuyla alakalı yasal düzenlemelerin yapılarak izinlerin verilmesi gerekmektedir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

2.5 Biyokütle Enerjisi

Petrol ve kömüre benzer olarak, biyoküteller de güneş enerjisinin depolanmış halidirler. Buna örnek olarak bitkilerin güneş enerjisini fotosentez aracılığıyla tuttukları gösterilebilir. Buradan yola çıkarak biyokütle, yeşil bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yolu ile kimyasal enerjiye dönüştürerek depolaması ile meydana gelen biyolojik kütle ve buna bağlı organik madde kaynakları olarak tanımlanabilir. Biyokütle enerjisi, yetiştiriciliğe dayalı olan bir enerji kaynağı olduğundan dolayı yenilenebilir, çevre dostu ve yerel bir kaynak olarak önem kazanmaktadır.

Biyokütle endüstriyel anlamda ele alındığında, yaşayan ya da yakın zamanda yaşamış biyolojik maddelerden yakıt elde edilmesi ya da diğer endüstriyel amaçlar ile kullanılması akla gelmektedir. Yaygın olarak biyoyakıt, kolay taşınabilir, depolanabilir ve kullanılabilir yakıtlar elde etmek amacıyla yetiştirilen bitkiler ile birlikte lif, ısı ve kimyasal madde elde etmek üzere kullanılan hayvansal ve bitkisel ürünleri ifade eder. Aynı zamanda biyoküteller, bir yakıt olarak yakılabilen organik atıkları da içerir. Bununla birlikte, coğrafi etkiler ile değişikliğe uğramış, kömür ve petrol gibi organik maddeleri içermez. Genel olarak kuru ağırlıkları ile ölçülürler.

Biyokütle elde etmek üzere yetiştirilen bitkilere, şeker kamışı, şeker pancarı, mısır, dallı darı, arpa, keten tohumu, ayçiçeği, kolza ve soya fasulyesi gibi pek çok değişik örnek verilebilir. Diğer bahsettiğimiz kaynaklarda da olduğu gibi petrole olan bağımlılığı azaltma ve küresel ısınma ile mücadelede yenilenebilir yakıtların artan önemi nedeniyle biyokütle üretimi büyüyen bir endüstri haline gelmiştir.

Biyokütle enerji teknolojisi kapsamında; odun olarak enerji ormanları ve ağaç artıkları, yağlı tohum bitkileri olarak ayçiçeği, kolza, soya v.b., karbo-hidrat bitkileri olarak patates, buğday, mısır, pancar, v.b., elyaf bitkileri olarak keten, kenaf, kenevir, sorgum, v.b., bitkisel artıklar olarak dal, sap, saman, kök, kabuk v.b., hayvansal atıklar ile şehrsel ve endüstriyel atıklar değerlendirilmektedir. Biyokütle yenilenebilir, her yerde yetiştirilmesi mümkün olan, sosyo-ekonomik bir gelişme sağlayabilen, çevre dostu olan, elektrik enerjisi elde edilebilen ve taşıtlar için yakıt olarak üretilebilen stratejik bir enerji kaynağıdır. Biyokütellerin doğrudan yakılmasıyla elde edilen biyoyakıtlar, enerji teknolojisinde değerlendirilebildiği gibi çeşitli süreçler ile yakıt kalitesi artırılarak, mevcut yakıtlara eşdeğer özelliklerde alternatif biyoyakıtlar elde edilerek de bu işlem yapılabilir. Biyokütleden; fiziksel süreçler ve dönüşüm süreçleri ile yakıt elde edilmektedir. Fiziksel süreç olarak boyut küçültme-kırma, öğütme, kurutma, filtrasyon, ekstraksiyon ve birikitleme söylenebilirken dönüşüm süreçleri için ise

biyokimyasal ve termokimyasal süreçler söylenebilir. Uygulamadaki başarıları kanıtlanmış biyoyakıtlardan dönüşüm süreçleri ve ürünlerine örnek olarak, aşağıdaki biyoyakıtlar verilebilir:

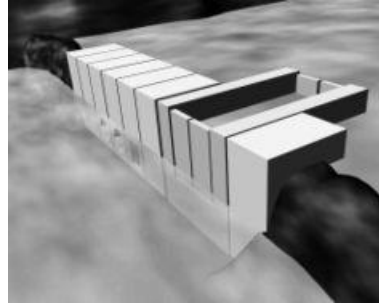
- Biyometanlaştırma Süreçleri: Biyogaz
- Biyofotoliz Süreçleri: Hidrojen
- Fermentasyon Süreçleri: Biyoetanol
- Piroliz Süreçleri: Pirolitik sıvı
- Gazlaştırma Süreçleri: Gaz yakıt
- Karbonizasyon Süreçleri: Biyokömür
- Esterleşme Süreçleri: Biyomotorin-Biyodizel

Buradaki biyoyakıtlar içerisinde biyogaz, biyoetanol ve biyomotorin en önde yer almaktadır. Biyoyakıtların ülkemizde uygulanır olması için gerekli potansiyel, bilgi birikimi ve altyapı mevcuttur. Türkiye, sadece odun, bitki ve hayvan atık-artıklarından yakacak olarak ısınma ve pişirmede yararlanmakta olduğundan dolayı maalesef dünyadaki modern biyokütle kullanım eğiliminin dışında kalmaktadır. Modern biyokütle denildiğinde; kaynakları, enerji ormancılığı ürünleri ile orman ve ağaç endüstrisi atıkları, enerji tarımı ürünleri, tarım kesiminin bitkisel artıkları ve hayvansal atıkları, kentsel atıklar, tarımsal endüstri atıkları biçiminde sıralanan enerji akla gelmektedir. Ülkemizde hayvansal ve bitkisel artık miktarı 10,3 MTEP değerindedir. Bu değer Türkiye'nin enerji tüketiminin %13'üne denk gelmektedir. Türkiye modern enerji ormancılığına uygun kavak, söğüt, kızılğaç, okaliptüs ve akasya gibi hızlı büyüyen ağaçların dikilebileceği 4 Milyar Hektar devlet orman alanına sahiptir. Bu alanlar için uygun planlamalar yapılarak, modern enerji ormancılığında değerlendirilmeli ve bu şekilde de kıymetli ağaçların yakacak olarak kesilmesi önlenmelidir. Bunlarla birlikte ülkemizde her gün 65000 ton çöp çıktığı düşünüldüğünde bu çöplerin düzenli depolama ile elektrik enerjisi üretiminde değerlendirilmesi de göz ardı edilmemelidir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

2.6 Gel-git Enerjisi

Gel-git enerjisi, gel-git veya okyanus akıntısından dolayı yer değiştiren su kütlelerinin sahip olduğu kinetik veya potansiyel enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Her gün tekrarlanan gel-git olayı esnasında deniz kabarır ve alçalır. Bu iki deniz seviyesi arasındaki farktan yararlanılarak türbinler çalışır. Elektrik enerjisi üretebilmek için gelgit hareketlerinden

dolayı oluşan bu seviyelerin arasındaki farkın 5 metreden az olmaması gerekmektedir. Bu enerjiyi elektriğe dönüştürebilmek için uygun bulunan koyların ağızları barajla kapatılır ve gelen su tutulur. Gel-git sonrasında da yükseklik farkından dolayı türbinler aracılığı ile elektrik üretilmesi hedeflenir. Şekil 2.2, bir gel-git barajının temsili gösterimidir. Bu şekilden de görülebileceği gibi körfez boyunca barikat kurularak gel-git suları sıkıştırılır. Geri çekilen su ile birlikte oluşan seviye farkı ile yüksekte kalan su türbinlere gönderilir. Gel-git enerjisinde, gel-git olayı için özel olarak üretilmiş iki taraflı olarak hareket edebilen türbinler kullanılır.



Şekil 2.2 İki türbinli bir gel-git barajının temsili gösterimi [1]

Gel-git olayının 24,8 saatte bir tekrarlanması, sürekli bir enerji kaynağı olarak bir avantaj gibi görülsede, enerji üretim süresinin 6 ile 12 saat arasında sınırlı olması da dezavantaj oluşturmaktadır. Bu enerji üretim şekli suyun potansiyel enerjisinin %80'ini elektrik enerjisine dönüştürebilir. Bir başka teknoloji ise suyun altına yerleştirilen gel-git türbinleridir.

2.7 Dalga Enerjisi

Dünyanın en büyük potansiyel enerjilerinden biri de, dünyanın %75'inden fazlasını kaplayan okyanuslarda biriken enerji olarak söylenebilir. Dünyadaki en büyük güneş kolektörleri olarak okyanuslar düşünülebilirler. Dalga enerjisi sürekli yenilenebilir ve çevreyi kirletmeyen bir enerji kaynağıdır.

Dalga enerjisi; rüzgar, denizde hareket eden taşıtlar, deniz altında meydana gelen depremler gibi dış etkenler sonucunda dengesiz bir hal alan deniz yüzeyinin tekrar eski haline gelirken oluşturduğu dalgaların enerji potansiyelidir. Dalga enerjisinin kullanıldığı sistemlerde, enerji okyanus yüzeyindeki dalgardan ya da suyun altındaki dalgalanmalardan elde edilir. Her bir dalganın gelmesi ile hidrolik motorlar hareketi jeneratöre iletilerek enerji üretimi sağlanır.

Okyanuslar ve denizler gibi büyük su kütlelerinde oluşan dalgaların enerjisinden faydalanan bu enerji kaynağının üretilmesindeki zorluklar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Dalgaların gücünün yüksek olmasına rağmen, hızının düşük olması ve farklı yönlerde hareket etmesi
- En güçlü fırtınaların ve tuzlu suyun neden olabileceği paslanmaya karşı dayanabilecek yapıların yüksek maliyetli oluşu
- Kurulum ve bakım maliyetlerinin yüksekliği

Dalga enerjisinin toplam enerji potansiyeli, bir önceki başlıkta anlatılan gel-git enerjisine oranla çok daha fazladır. Sahillerinde güçlü rüzgarlar meydana gelen ülkeler için ideal bir yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Dalga enerjisinin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarında olduğu gibi temiz ve sınırsız enerji üretir. İlk yatırım maliyeti ve daha sonradan meydana gelen bakım maliyetleri hariç bir gideri yoktur. Böylelikle primer enerjiye hiçbir bedel ödenmez.
- Kullanıcıların kıyılara yakın yerlerde bulunması durumunda uzun iletim hatlarına gerek yoktur. Dolayısıyla oluşacak iletim kayıpları da ortadan kalkmış olur. Ülkemizin üç tarafının denizlerle çevrili olduğu düşünülürse nüfus yoğunluğu kıyılarda toplandığı için üretilen enerji, üretildiği yerde tüketilecektir.
- Bu tür santraller öngörülen enerji ihtiyacına göre, hangi yörede kurulmak isteniyorsa, o yöredeki dalga boyutlarına göre boyutlandırılabilirler. Sistemin büyük dalga boyutlu olması ise maliyeti düşüren bir etkidir.
- Dalyan görevi sayesinde, denizlerdeki balık neslinin çoğalmasına yardım eder. Böylece hem ekolojik dengeye katkıda bulunur hem de tesise ek gelir sağlar.
- Santralin yapıldığı yer deniz üzerinde olduğu için verimli tarım arazilerini yok etmez.
- Gürültü kirliliği olmamaktadır. Tam bir çevreci kaynaktır.
- Kurulan santrallerin üzerleri otel, restoran, sosyal tesis veya disko gibi turizm amaçlı tesisler için kullanılabilir.

2.8 Hidrojen Enerjisi

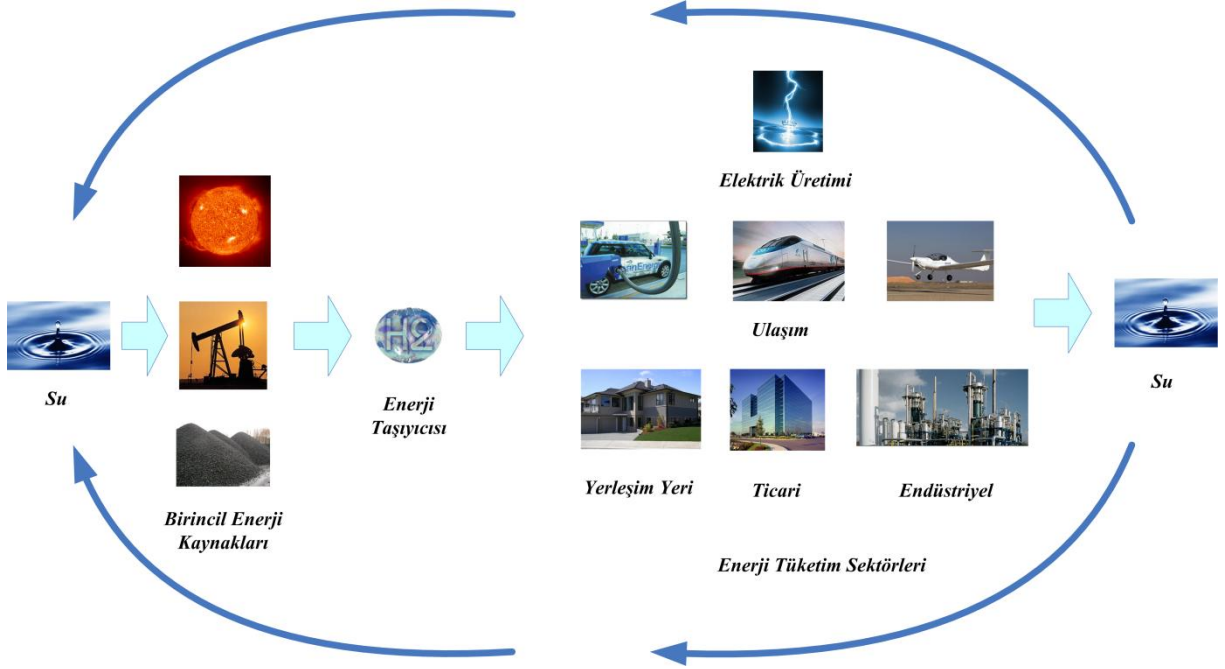
Fosil yakıtların yanması sonucu çevreye verdiği zararlar ve petrol, doğal gaz gibi akışkan yakıtların, bilinen üretilebilir rezerv ömürlerinin insan ömrüyle kıyaslanabilecek boyuta düşmüş olması hidrojen enerjisi kullanılmasını gerektiren başlıca nedenlerdir. Hidrojen, kolay ve güvenli bir şekilde her yere taşınabildiği gibi taşınması esnasında çok az enerji kaybı

meydana gelir. Sanayide, evlerde ve taşıtlarda kısaca her yerde kullanılabilen tükenmez, çevreye zarar vermeyen, kolaylıkla ısı, elektrik ve mekanik enerjiye dönüşebilen, ekonomik, hafif ve verimli bir yakıttır. Hidrojen doğal bir yakıt değildir. Ancak birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtları ve biyokütle gibi çeşitli hammaddelerden üretilen sentetik bir yakıttır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını gündeme getiren çevre sorunlarının başında sera etkisi gelmektedir. Sera etkisine sebep olan gazların başında ise CO₂ bulunmaktadır. Dünyada meydana gelen karbondioksit emisyonundaki artış, sera etkisi ve iklim değişiklikleri sonucu ulaşılmış son durum ve tahminler sonucunda, geleceğin en önemli yakıtı hidrojen ve yakıt teknolojisi olarak da yakıt pilleri görülmektedir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

Hidrojen enerji sistemleri; hidrojen gazının yakıt pilleri yardımı ile kimyasal tepkimeye girerek elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Böyle bir sistemde buhar kazanı veya türbin kullanılmadan sadece kimyasal tepkime gerçekleştirilerek elektrik enerjisi üretilir. Hidrojen ve oksijen arasında meydana gelen elektrokimyasal tepkime ile elde edilen ve verimliliği %90'lara kadar ulaşabilen bu sistem yakıt pilleri olarak da adlandırılır. Bu sistemler temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip sistemlerdir. Şekil 2.3'ten de görülebileceği gibi bu sistemin çalışmasının sonucunda atık olarak su elde edilir. Bu da hidrojen enerjisinin temiz enerji olarak adlandırılmasının başlıca sebeplerinden biridir..

Hidrojen enerji sisteminin şematik gösteriminin yapıldığı Şekil 2.3'ten de görülebileceği gibi hidrojen saf halde bulunmadığı için ilk önce enerji taşıyıcı kaynaklar kullanılarak elde edilir. Daha sonra değişik enerji tüketim sektörlerinde kullanılarak sonucunda atık olarak sadece su meydana getirirler. Ayrıca istenildiği takdirde bu su elektroliz yöntemi ile tekrar hidrojen elde edilmesinde kullanılabilir. Böylece atıksız bir çevrim elde edildiği gibi çevre dostu bir sistem oluşturulmuş olur.



Şekil 2.3 Hidrojen enerji sistemi

Enerji, son tüketiciye elektrik ya da yakıt şeklinde ulaşmaktadır. İkincil enerji olan elektriğin çeşitli kullanım avantajlarının bulunmasına rağmen, yakıt teknolojisini önemli kılan yalnızca elektriğe bağlı olmayan bir teknoloji olasıdır. Genel enerji tüketiminin %60'ının ısı biçiminde gerçekleşmesi bunun sebebini açıklamaktadır. Fiziksel durum değişimi içeren şekilde dönüştürülen birincil enerji kaynaklarından ikincil enerjiler elde edilir ve bunlara enerji taşıyıcısı denir. 20. Yüzyıla damgasını vuran enerji taşıyıcısı elektrik olurken, 21. Yüzyıla damgasını vuracak enerji taşıyıcısının hidrojen olması beklenmektedir.

Hidrojen enerji sisteminin temel konularını hidrojen, hidrojenin üretimi, dağıtımı, depolanması ve elektrokimyasal enerji dönüştürücü olan yakıt pilleri oluşturmaktadır. Üçüncü bölümde de hidrojen daha detaylı bir şekilde incelenerek üretimi, depolanması, taşınması ve yakıt olarak kullanılması anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ise yakıt pilleri ve çeşitleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

3. HİDROJEN ENERJİSİ

3.1 Hidrojenin Özellikleri

Hidrojen, en çok bulunduğu madde olan suda olduğu gibi doğada bileşikler halinde bulunur ve serbest halde bulunmaz. Normal şartlar altında renksiz, kokusuz, metalik olmayan, tatsız, oldukça yanıcı ve H₂ olarak bulunan bir biatomik gazdır. 1,00794 g/mollük atomik kütlesi ile tüm elementler arasında en hafif elementtir. Bu sebepten dolayı yerçekimi kuvvetinden diğer daha ağır gazlara göre kolayca kurtulur ve bunun sonucu olarak dünya atmosferinde hidrojen gazı oranı oldukça düşük olmasına rağmen, hidrojen dünyada en çok bulunan üçüncü elementtir. Çizelge 3.1’de hidrojenin element özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.1 Hidrojen elementinin özellikleri (Doğan, 2008)

HİDROJEN	Değer	Birim
Molekül Ağırlığı	2,016	Kg/Kmol
Yoğunluğu	0,0838	Kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141,9	MJ/Kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11,89	Mj/m ³
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119,9	MJ/Kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10,05	Mj/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20,3	K
Sıvı Yoğunluğu	70,8	Kg/m ³
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32,94	K
Kritik Noktadaki Basınç	12,84	Bar
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31,40	Kg/m ³
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% Hacimsel
Havada Stokiyometrik Karışım	29,53	% Hacimsel
Havadaki Alev Sıcaklığı	2318	K
Difüzyon Katsayısı	0,61	cm ² /s

Evrenin kütlece %75'ini oluşturan hidrojen, atom sayısınca %90'ını oluşturur ve bu oranlarıyla evrende en çok bulunan elementtir. Özellikle dev gaz gezegenlerinde ve yıldızlarda büyük miktarda bulunur. Moleküler hidrojen bulutları yıldızların oluşumuyla bağlantılıdır. Yıldızların proton-proton nükleer füzyon reaksiyonuyla enerji üretmesinde hidrojen önemli rol oynar. H₂ molekülü ve hidrojen atomu uzayda bolca bulunduğu halde dünya da bunların üretimi ve saflaştırılması oldukça güçtür (Doğan, 2008).

Günümüzde çoğunlukla doğalgaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlardan üretilmekte olan hidrojen uzay programları dışında şimdiye kadar bir yakıt veya enerji taşıyıcısı olarak pek kullanılmamıştır. Buna rağmen bazı kimyasal ve metalürjik uygulamalar ile rafinerilerde ham petrol yükseltgenmesi gibi işlerde kullanılmıştır.

3.2 Hidrojenin Üretilmesi

Hidrojen üretiminde, güneş ve nükleer enerjinin kullanılmasına dayalı bir ekonomi giderek önem kazanmaktadır. Kamuoyunun bu konuda henüz tam bilgi sahibi olamaması, hidrojenin mevcut yakıtlarla kıyaslandığında ortaya çıkan yüksek maliyet farkı ve yüksek sermaye yatırımı en sık karşılaşılan problemlerdir. Uzak bölgelerde hidrojenin üretilmesinde, güç santralleri deniz suyunu elektroliz edebilir. Üretilen hidrojenin iletilmesi ise boru hatlarıyla sağlanabilir.

Hidrojen, enerji kaynaklarından bir veya daha fazlası kullanılarak sudan üretilir. Geçiş periyodunda, daha yaygın olarak kabul edebileceğimiz bir fosil yakıt olan kömür hidrojen üretimi için kullanılabilir.

3.2.1 Fosil Yakıtlardan Hidrojen Üretimi

Hidrojen, fosil yakıtların yerini alacak geçecek alternatif bir enerji kaynağı olarak düşünülse de fosil yakıtların içerisinde hidrojen atomu bulunduğu da bir gerçektir. Bu sebeple çeşitli kimyasal işlemler ile fosil yakıtlardan da hidrojen elde edilebilir.

Günümüzde, sanayide kullanılan hidrojen genellikle, doğal gaz, petrol ürünleri veya kömür gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Petrolün kısmi oksidasyonu, buhar demir işlemi ve kömür gazlaştırılması en çok kullanılan yöntemlerdir. Bunlardan başka, temel amacı hidrojen üretimi olmakla birlikte başka sanayi maddelerinin üretimi sırasında, yan ürün olarak hidrojen elde edilen yöntemler vardır. Bunlar; klor-alkaliden karşıt klor üretimi, ham petrolün rafineri işleminde hafif gazların üretimi, kok fırınlarında kömürden kok üretimi ve margarin sanayinde kimyasal hidrojenasyon işlemleri olarak sayılabilir (Mert, 2005).

3.2.2 Suyun Elektrolizi İle Hidrojen Üretimi

Elektroliz, suyun doğru akım kullanılarak hidrojen ve oksijenlerine ayrıştırılması işlemine denilmektedir ve hidrojen üretimi için en basit yöntem olarak bilinmektedir. Bir elektroliz hücresi içinde, genelde düzlem bir metal veya karbon plakalar olan, iki elektrot ve bunların içine daldırıldığı, elektrolit olarak adlandırılan iletken bir sıvı bulunur. Bu elektrotlara doğru akım kaynağı bağlandığında akım iletken sıvı içinde, pozitif elektrottan negatif elektroda doğru akacaktır. Bu işlemin sonucunda, elektrolit içindeki su, katottan çıkan hidrojen ve anottan çıkan oksijene ayrışacaktır. Ancak su iyi bir iletken olmadığı için elektrolitin içine iletkenliği artırıcı olarak genelde potasyum hidroksit gibi bir madde eklenir. Suyun elektrolizi için, normal basınç ve sıcaklıkta, ideal olarak 1,23 Volt yeterli olmaktadır. (Doğan, 2008; Türe, 2003)

Tepkimenin yavaş olmasından ve başka sebeplerden dolayı, elektroliz işleminde daha yüksek gerilimler de kullanılır. Hidrojenin üretim hızı, gerçek akım şiddeti ile orantılı olduğundan, yüksek akım yoğunlukları istenmektedir. Bu yüzden pratikte suyun ayrıştırılması için hücre başına uygulanan gerilim genelde 2 Volt dolayındadır. Her metreküp oksijen için 2,8 kWh elektrik enerjisi yeterli olmakla birlikte, yukarıda özetlenen nedenlerle pratikte kullanılan elektrik enerjisi miktarı bir metreküp hidrojen üretimi için 3,9–4,6 kWh arasında değişiklik göstermektedir. Buna göre elektroliz işleminde verim %70 dolayında olmaktadır. Fakat son yıllarda bu alanda yapılan çalışmalar ve gelişen teknoloji sayesinde %90'ın üzerinde verim ile çalışabilen sistemler mevcuttur (Doğan, 2008).

Kısa vadede, suyun elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi ekonomik olarak sağlanabilir. Bu yöntemin verimliliği yüksek sıcaklıklarda (700-900 °C) ortaya konmuştur. Gelecekte, yüksek-sıcaklık reaktörlerinde nükleer enerji elektrolitik yöntem ile hidrojen üretiminde ısı kaynağı olarak kullanılabilir (Noyan, 2003).

3.3 Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin depo edilebiliyor olması en önemli özelliklerinden birisidir. Bunun yanında hala günümüzde büyük miktarlarda enerjiyi depolamak için bir yöntem bulunamamıştır. Eğer üretilen enerjinin kullanılmayan kısmı depo edilebiliyor olsaydı, enerji sorunu yaşanmazdı. Enerji aküler vasıtasıyla depo edilebilir olmasına rağmen uygulama alanlarının azlığı ve çok verimli olmamaları elektrik enerjisini doğrudan akülerde biriktirilmesine engel olmaktadır (Sarıtış, 2004).

Hidrojenin depolanması için tükenmiş petrol veya doğal gaz yatakları, depolama hacimlerinin

büyüklikleri ve ucuz olmaları sebebiyle en uygun yerlerdir. Bunun haricinde hidrojeni mağaralarda ve maden ocaklarında depolamak da farklı bir yöntemdir ancak bu yöntemin maliyeti daha yüksektir.

Gerek sabit gerekse taşınabilir uygulamalarda hidrojenin depolanmasında en önemli konu güvenilir biçimde olmasıdır. Taşınabilir uygulamalar düşünüldüğünde ise güvenliğin yanında depolamada hafiflik de çok büyük önem kazanmaktadır.

Hidrojen, orta ve küçük ölçekli olmak kaydıyla gaz veya sıvı olarak saf halde depolanabileceği gibi, fiziksel olarak nanotüplerde veya kimyasal olarak hidrit şeklinde depolanabilmektedir. Hidrit şeklinde depolamada; sıvı halde sodyum bor bileşiğinde olduğu gibi olabilir veya metallerde ve alanatlarda katı halde olabilir. Değişik depolama yöntemlerinde elde edilebilecek hidrojen miktarı ve enerji yoğunluk değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir (Saritaş, 2004).

Çizelge 3.2 Değişik ortamlarda depolanabilecek hidrojen miktarı ve yoğunlukları

Depolama Ortamı	Hidrojen Miktarı (ağ.%)	Hacimce Yoğunluk* (H atomu / I) ($\times 10^{25}$)	Enerji Yoğunluğu*	
			MJ / kg	MJ / I
Gaz halde H ₂ (150 atm)	100,00	0,5	141,90	1,20
Sıvı H ₂ (-253 °C)	100,00	4,2	141,90	9,92
MgH ₂	7,65	6,7	9,92	14,32
VH ₂	2,10	11,4	-	-
Mg ₂ NiH ₄	3,60	5,9	4,48	11,49
TiFeH _{1,95}	1,95	5,5	2,47	13,56
LaNi ₅ H _{6,7}	1,50	7,6	1,94	12,77
NaAlH ₄	7,40	-	-	8,25
NaBH ₄ (katı)	10,60	6,8	-	-
NaBH ₄ -20 Sol.	4,40	-	44	-
NaBH ₄ -35 Sol.	7,70	-	77	-
Benzin	-	-	47,27	6,6-9,9
Metanol	-	-	22,69	5,9-8,9

*Bu değerlere tank ağırlığı dahil edilmemiştir.

3.4 Hidrojenin Taşınması

Hidrojen gaz halinde, doğal gaz veya hava gazına benzer olarak borular aracılığıyla her yere kolaylıkla ve güvenli bir şekilde taşınabilmektedir. Doğal gaz için kullanılan mevcut yer altı boru dağıtım ağının, yapılacak az bir değişiklik ile ileride hidrojen içinde kullanılmasına olanak sağlanabilir. Bu boru hatlarındaki ölçü cihazlarının ve kompresörlerin değişmesi ile basıncın arttırılması yeterli olacaktır. Boru hatlarının dışında hidrojen, basınçlı gaz veya sıvı halde tüplere konup tankerlerle taşınabilir.

Hidrojen gazının boru ile taşınmasına, Texas'da petrol sanayi tarafından kullanılmakta olan ve 80 km uzunluğuna sahip boru şebekesi ile Almanya'da Ruhr havzasında 1938 yılında işletmeye açılan ve bugün 15 atmosfer basınç altında hidrojen taşımaya devam eden 204 km'lik boru hattı örnek olarak gösterilebilir.

Bu güne kadar geliştiren birçok deneme amaçlı hidrojenle çalışan taşıtta kullanılan yöntem, basınçlı hidrojenin çelik tüpler içine yerleştirilerek taşınması olmuştur. Hidrojenin depolanmasında bahsettiğimiz gibi burada da görülen en büyük sorun çelik tüplerin kendi ağırlıklarıdır. Benzinli bir otomobil, ortalama olarak 17 kg hidrojene karşılık gelen 65 litre (47kg) benzin almaktadır. Hidrojeni sıvı halde depolamak ağırlık sorununu çözmekle birlikte, tank hacminde ve maliyetindeki artış sorun oluşturmaktadır. Diğer bir sorun ise, hidrojenin gaz haline geçmesi esnasında oluşan kayıplar ve yakıt ikmal zorluğudur.

Günümüzde önemle ele alınan taşıma yöntemlerinden biri de hidrojenin hidritlerle taşınmasıdır. Hidritleşme, hidrojenin bir organik molekülle depolanması anlamına gelmektedir. Geliştirilen hidritler; titanyum alaşımları (özellikle demir-titanyum), magnezyum nikel alaşımları, zirkonyum alaşımları, paladyum alaşımları gibi materyallerle oluşturulmaktadır. Düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık hidritleri olmak üzere iki çeşit hidrit türü vardır. Düşük sıcaklık hidritlerine örnek olarak demir-titanyum verilirken, magnezyum-nikel alaşımı yüksek sıcaklık hidritidir. Ayrıca düşük ve yüksek sıcaklık hidritlerinin kombinasyonu da kullanılmaktadır. Paket olarak metal hidritler taşınmaya uygundur.

3.5 Hidrojenin Yakıt Olarak Kullanılması

Doğadaki ana enerji kaynaklarına birincil enerji kaynakları denir. Birincil kaynakların fiziksel durumu farklı olacak biçimde dönüştürülmesi ile elde edilen ikincil enerjilere, enerji taşıyıcısı denilir. Buna göre elektrik, yüzyılı aşkın süredir kullanılan bir enerji taşıyıcısıdır. Bugüne kadar kullanılan yakıtlar ise ya doğal enerji kaynağı olabilecek yapıya ya da bunların fiziksel durumları sabit kalarak değiştirilmesi ile elde edilmiş ürünlerdir. Doğada bileşik biçimde bol

miktarda bulunan hidrojen dünyada en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen serbest biçimde bulunmadığından, bir doğal enerji kaynağı değildir. Hidrojen birincil enerji kaynakları ile değişik hammaddelerden üretilmekte ve üretim esnasında dönüştürme işlemi yer almaktadır. Bu nedenle, hidrojene elektrikten bir yüzyıl sonra teknolojinin geliştirdiği yeni enerji taşıyıcısı denilebilir (Sarıtış, 2004).

Hidrojen enerjisi gelecek için insan ve çevre sağlığını tehdit etmeyen temiz, güvenilir, pratik bir yakıt türüdür. Özellikle çevresel kirlilik oluşturmamasından dolayı petrolün ve doğal gazın yerini alacaktır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasından sonra, karbon içermediğinden dolayı çevreye zarar veren ve petrol bazlı yakıtların kullanılması sonucu ortaya çıkan karbondioksit ve karbonmonoksit meydana getirmez. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasından sonra sadece su buharı ortaya çıkar.

Hidrojen, günümüzde araç yakıtı olarak ve diğer uygulamalarda hala kullanmaya mahkum olduğumuz petrolün yerini alabilecek bir enerji taşıyıcısıdır. Hidrojen enerjisini hayatımıza sokabilecek birçok çalışma günümüzde yapılmaktadır. Yakıt pilleri geliştikçe hidrojen enerjisinin kullanıldığı uygulamalar artacak ve bunun sonucu olarak hidrojen tercih edilen bir yakıt olacaktır.

Hidrojen, normal bir içten yanmalı motorda yakılabilmektedir ve bazı test arabaları hidrojenin bu özelliği düşünülerek donatılmıştır. Ayrıca uçaklarda da bunun denemesi yapılmıştır. Bununla birlikte esas kullanımı, hidrojenin oksidasyonunu nispeten düşük sıcaklıklarda doğrudan elektriğe katalizleyen ve kimyasal kinetiğe dönüştürmede iki kat verimli olan yakıt pillerindedir. Yakıt pilleri hidrojen gazını kullanılarak büyük miktarlarda elektrik gücü elde edilmesine imkân veren bir teknolojidir.

Hidrojen, depolanma probleminin daha az olduğu, elektrik üreten küçük ölçekli müstakil santrallerde ve yakıt pillerinde de kullanılabilir.

Yakıt olarak ideal özelliklerinin yanı sıra, hafifliğinden dolayı hidrojen taşımacılık için çok iyi bir yakıttır. İçten yanmalı motorlarda kullanıldığında ise mekanik enerji, fosil yakıtlara nazaran daha yüksek bir verimle harekete dönüştürülebilir. Bunlarla birlikte hidrojen yakıtlı motorlar kullanıldığı takdirde kirlilik kontrol cihazlarına gerek yoktur, böylelikle daha fazla enerji korunmuş olur. Hidrojen, jet yakıtı olarak da kullanılabilir. Bu kullanımda jet yakıtından çok daha hafif olduğundan, uçakların kalkış ağırlığını önemli ölçüde azaltır ve sonuç olarak yakıt tüketimini düşürmüştür. Hidrojenin kullanıldığı yerlerde yanma ürünü olarak su buharı oluştuğu için, ozon tabakasına zarar vermez (Noyan, 2003).

Günümüzdeki çalışmalar, mevcut fosil yakıt sisteminden hidrojen enerji sistemine dönüşümü

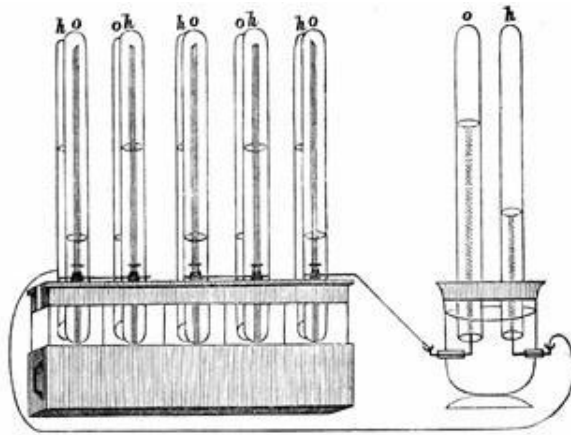
gerçekleştirilmesi durumunda, atmosfere karbondioksit tedricinde sanayi-öncesi seviyelere inebileceğini göstermektedir. Elbette bu, kısa bir sürede olabilecek bir şey değildir. Fosil yakıtların yerini alacak ve ülkelerin yakıt taleplerini karşılayacak miktarda hidrojenin üretilmesi zaman alacaktır.

4. YAKIT PİLLERİ

4.1 Yakıt Pili Teknolojisinin Gelişimi

Yüksek teknolojik görünümüne rağmen, yakıt pillerinin yaklaşık 150 yıllık bir geçmişi vardır. 1838 yılında ters elektroliz işlemi düşüncesini ortaya atan William Robert Grove, YP kavramı ile ilk bağlantıyı kuran bilim adamıdır. Grove hücresi olarak adlandırılan ıslak-hücre bataryasını geliştirmiştir. Bu hücre, çinko sülfat içerisinde çinko elektrot ve nitrik asit içerisinde platin elektrot daldırılarak oluşturulmuş ve yaklaşık 1,8 Volt civarında gerilim üretirken 12 Amperlik akım üretmiştir. Grove, elektrotlardan biri sülfürik asit kabına diğeri oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrotu düzenlediği takdirde, elektrotlar arasında sabit bir akım akacağına farkına varmıştır. Sızdırmazlığı sağlanan kaplar kullanarak hem suyu hem de gazları tutmuştur. Grove, akım aktığı takdirde, su seviyesinin her iki tüpte de arttığını gözlemlemiştir (Bıyıkoglu, 2003).

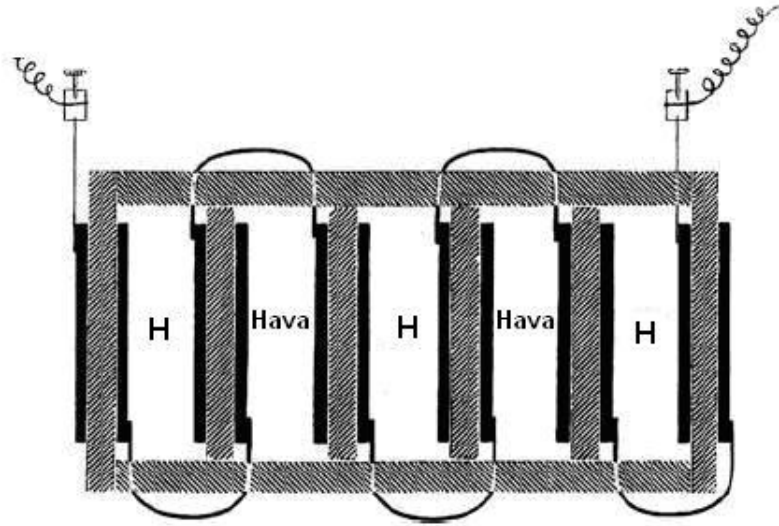
1800'de, İngiliz bilim adamları Willam Nicolas ve Anthoney Carlisle, elektrik vasıtasıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrılabilceğini ispatlamışlardır. Fakat elektrik ve su üretmek için iki gazın birleştirilmesini çözememişlerdir. Grove, birkaç elektrotu seri devre ile bağlayarak bileşimini ayarladığı takdirde suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Bunu gaz bataryası adını verdiği ve ilk YP olarak tanımlayabileceğimiz Şekil 4.1'de gösterilen aygıt ile başarmıştır (Yıldızbilir, 2006).



Şekil 4.1 William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt pili [2]

Grove'un yaptıklarından sonra birçok bilim adamı da YP gelişimi için çaba sarf etmiştir. 1882 yılında Lord Rayleigh tarafından platin elektrotların verimini arttırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunun için katı elektrot, gaz ve sıvı arasındaki işlem kesitini arttırmış hidrojenin yanı sıra kömür gazı da kullanmıştır. 1889'da kimyager Ludwing Mond ve Carl

Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda, oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 Watt güç üreten ve %50 verimle çalışan bir YP geliştirmişlerdir. YP'den 1,47 Volt gerilim elde etmeyi beklerken bu değer 0,97 Volt olarak ölçülmüştür. Şekil 4.2'de Mond ve Langer'in tasarladığı YP görülmektedir.



Şekil 4.2 Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili (Yıldızbilir, 2006)

1893 yılında yakıt pillerinin çalışma prensibinin anlaşılmasında pek çok teorik çalışma yapmış olan Friedrich Wilhelm Ostwald YP'nin çeşitli bileşenlerinin (elektrot, elektrolit, oksitleyici maddeler, anot ve katotlar) bağlantılı işlevlerini deneysel olarak belirlemiştir. 1894'te ise kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal pil yapmıştır.

1932'de Francis Tomas Bacon hidrojen-oksijen hücre ve alkalın elektrolit kullandığı ilk başarılı yakıt pilini geliştirmiştir. Pahalı olmasına rağmen Pratt&Whitney firması bu projenin önemini kavramış ve Bacon'ın yakıt pilini Apollo uzay aracında kullanmak için lisans vermiştir.

1950'lerin sonlarında, NASA, uzay görevlerinde kullanmak için kompakt elektrik üretici kurmaya başladı. NASA, YP teknolojisi ile ilgili yüzlerce araştırmayı desteklediği gibi son yüzyılda da içlerinde büyük taşıt üreticileri ve çeşitli YP araçları ve diğer uygulamalarında olduğu YP teknolojisi geliştirmeye yönelik araştırmalara destek vermeye devam etmektedir.

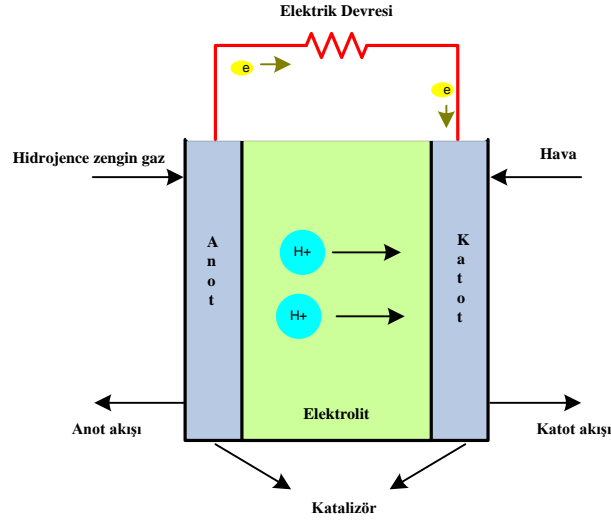
Günümüzde gelecek için yakıt pillerinin geleneksel güç kaynaklarının yerini alması beklenmektedir. Cep telefonlarında kullanılabilecek küçük yakıt pillerinden otomobil sporlarında kullanılabilecek yüksek güçlü yakıt pillerine kadar geniş bir yelpazede yerini alması beklenmektedir.

4.2 Yakıt Pili'nin Çalışma Prensibi

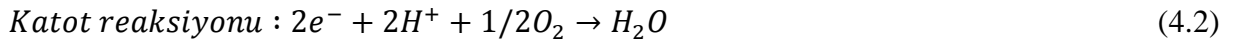
Yakıt pilleri, çevreye zarar vermeyen, yüksek verime sahip ve elektrokimyasal bir süreç sonucunda doğrudan elektrik enerjisi üreten enerji dönüşüm teknolojileridir. Bu süreç esnasında içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanma evresi olmadığından temiz enerji kaynağıdır.

Yakıt hücresi, bir elektrolit ve bu elektroliti sandviç şeklinde saran anot ile katot olmak üzere iki elektrottan meydana gelmektedir. Anot elektrotuna yakıt elektrotu ve katot elektrotuna ise oksijen elektrotu denilmektedir. Oksijen ve hidrojen ayrı elektrotlardan geçerek elektrik, su ve ısı üretir. Yakıt pilleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe çevirdiğinden dolayı prensip olarak akümülatör veya pile benzemektedir. Akümülatörlerde, kimyasal enerjinin kullanılmadan önce depolanmış durumda olması gerekmektedir. Pillerden farklı olarak yakıt pilleri bitmez ya da şarj edilmesine gerek yoktur. Dış kaynaklardan enerji sağlandığı müddetçe elektrik üretilebilir. Gerilim değeri arttırılmak istendiğinde hücreler seri olarak bağlanır ve istenen değer elde edilebilir. Bununla birlikte hücrenin üretebileceği akım yüzey alanına bağlı olduğundan, bu değer arttırılmak istendiğinde YP'nin alanı arttırılır.

Elektroliz reaksiyonunda suya doğru akım uygulanmakta ve bunun sonucunda su, oransal hacimlerde oksijen ve hidrojene ayrışmaktadır. Yakıt pillerinin çalışma prensibi de bu reaksiyonun tersi bir kimyasal reaksiyondur. Suyu elektroliz ederken elektrik enerjisi uygulanarak oksijen ve hidrojene ayrıştığına göre, mantıksal olarak bu işlem ters yönde düzenlendiği takdirde, yani hidrojen ve oksijen reaksiyonu sonucunda su ve ısı elde edilirken, elektrik enerjisi de ortaya çıkmaktadır. Saf hidrojen bulunmadığı takdirde yakıt pillerinde kendisinden hidrojen elde edilen hidrokarbonlar da kullanılabilir. Fakat bunlar kullanıldığı takdirde verim düştüğünden dolayı tercih edilmemektedir. Şekil 4.3'te YP'nin çalışma prensibi görülmekte olup devamında ise anotta ve katotta olan reaksiyonlar ile toplam reaksiyonlar görülmektedir.



Şekil 4.3 Yakıt pilinin çalışma prensibi



Hidrojen, yakıt pillerinin anodundan girerken, oksijen veya hava katodundan girer. Katalizör yardımıyla, hidrojen atomu, katoda farklı yollardan gidecek olan bir proton ve bir elektron olarak ayrılır. Proton, elektrolitin içerisinde geçerken elektronlar, katoda dönüp hidrojen ve oksijen ile birleşerek su molekülü oluşturmadan önce bir elektrik akımı oluştururlar.

Yakıt hücresinde anotta bulunan hidrojenin katalitik oksidasyonu ve katotta bulunan oksijenin indirgenmesi ile elektrotlar arasında potansiyel fark oluşur. Eğer elektrotların arasında bulunan ve yalıtımı sağlayan elektrolit, iyonik kütle ve şarj aktarımına izin verirse, bu oluşan potansiyel fark dış bir devrede kullanılabilir. Kullanıldığında, ürün olarak su elde edilir ve bu reaksiyonun kimyasal enerjisi, kutuplaşma ve direnç kayıpları dolayısıyla, elektrik ve ısı olarak serbest bırakılır. Yakıt hücresinin iki elektrotuna dış devreden bağlanan iletken yardımıyla oluşan elektrik hücreden alınır. Bu iletken üzerinden geçen elektronların yarattığı elektrik enerjisi DC karakterlidir. Bunun sonucunda ise toplam verim yüksek olduğu gibi elektrikselsel verim de yüksek olabilir. Yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen gazı, doğalgaz, metanol veya etanol kullanılabilirken, oksidan olarak oksijen gazı veya hava kullanılabilir. Eğer yakıt ile oksidan çifti hidrojen ve oksijen gazlarından oluşturulursa, yan ürün olarak saf su elde edilir. Yakıt pillerinin hareketli kısımları bulunmamaktadır. Bu sebeple gürültü ve titreşim seviyelerinin çok düşük olmasının yanı sıra güvenilirlikleri yüksek ve maliyetleri düşüktür.

4.3 Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri kullandıkları elektrolit cinsine, yakıt türüne ve çalışma sıcaklığına göre farklı isimler alır. Aşağıda yakıt pillerinin sınıflandırılmış hali belirtilmiştir.

Yakıt pilleri, kullandıkları yakıtı göre:

- Proton geçirgen zarlı yakıt pili (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC, PEMYP)
- Direk metanol yakıt pili (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC, DMYP)
- Alkali yakıt pili (Alkaline Fuel Cell, AFC, AYP)
- Fosforik asit yakıt pili (Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC, FAYP)
- Erimiş karbonatlı yakıt pili (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC, EKYP)
- Katı oksitli yakıt pili (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC, KOYP)
- Rejeneratif yakıt pili (Regenerative Fuel Cell, RFC, RYP)
- Silindirik yakıt pili (Cylindrical Fuel Cell, CFC, SYP)

Çalışma sıcaklıklarına göre:

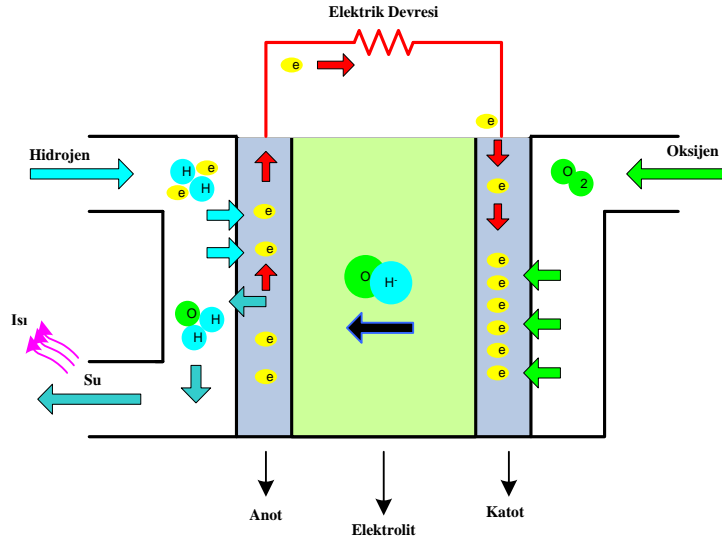
- Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (0-100 °C)
- Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (100-500 °C)
- Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (500-1000 °C)

Kullandıkları elektrolite göre:

- Alkali elektrolitli yakıt pilleri
- Katı polimerili yakıt pilleri
- Fosforik asit yakıt pilleri
- Erimiş karbonatlı yakıt pilleri
- Katı oksitli yakıt pilleri

olarak sınıflandırılmaktadır (Oğuz, 2006).

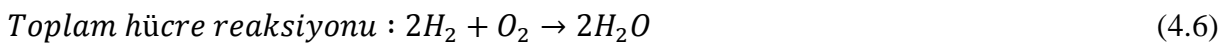
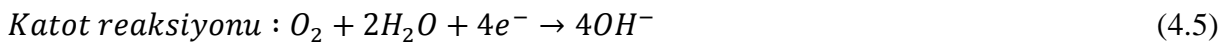
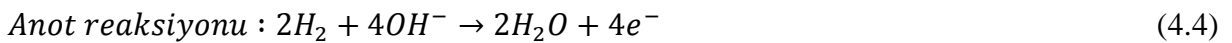
4.3.1 Alkali Yakıt Pili



Şekil 4.4 Alkali yakıt pilinin çalışma biçimi

Alkali yakıt pilleri ilk YP teknolojilerindedir ve ABD'nin uzay çalışmaları sırasında elektrik üretmek için kullanılmıştır. Bu yakıt pillerinde elektrolit olarak suda eriyik halinde bulunan potasyum hidroksit (KOH) veya sodyum hidroksit (NaOH) kullanılır. Anot ve katot bölümünde ise katalizör olarak Ni (nikel), Ag (gümüş), metal oksitler veya özel bazı metaller kullanılabilir. Şekil 4.4'te bir alkali YP'nin çalışma biçimi görülmektedir. Çalışma sıcaklıkları 100 °C ile 250 °C arasında değişmektedir. Performansları yüksek olmakla birlikte verimleri yakıtın, oksidantın kalitesine ve anot katot malzemesine bağlı olarak değişmekle beraber %70 civarındadır (Doğan, 2008).

Bu tip yakıt pillerinde hidroksil iyonları (OH⁻) katottan anoda doğru ilerlerler. Anoda gelen OH⁻ iyonları hidrojen gazı ile reaksiyona girer ve su oluşurken elektronlar da açığa çıkar. Açığa çıkan bu elektronlar harici bir devreye elektrik enerjisi sağladıktan sonra katoda geri dönerler. Katottaki elektronlar su ve oksijenle reaksiyon gösterir ve böylece elektrolit içinde çözünen daha çok hidroksil iyonu üretilir. Bu hidroksil iyonları elektrolit üzerinden difüzyon yoluyla tekrar anoda aktarılır ve reaksiyon devam eder. YP'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir.

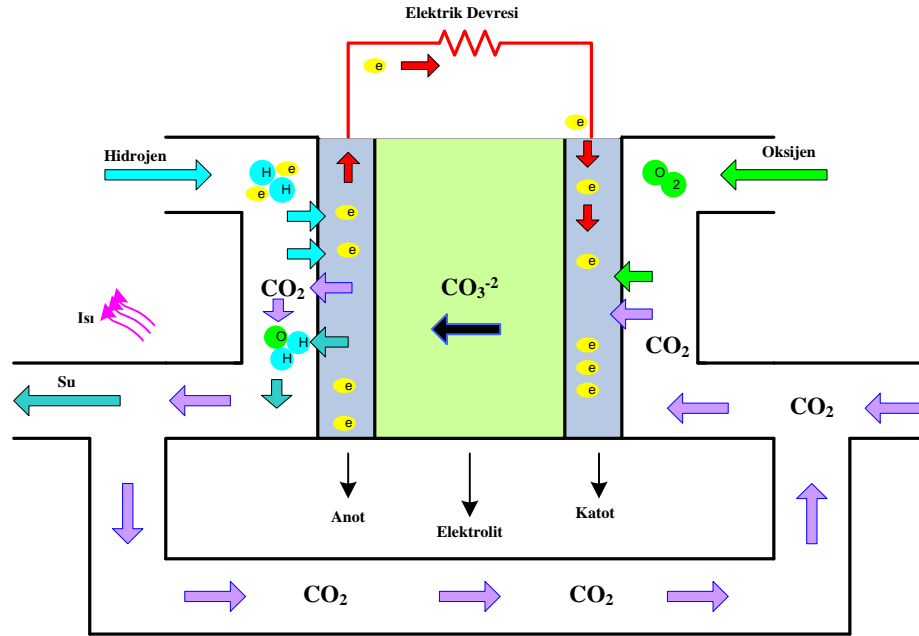


Kimyasal reaksiyonlarda da görüldüğü gibi yakıt olarak saf hidrojen kullanıldığı takdirde

katottan gelen hidroksil iyonları hidrojenle birleşip yan ürün olan saf suyu oluşturmaktadır. Bununla birlikte alkali YP'de yan ürün olarak kirletici çıkışı söz konusu olmadığı gözükmektedir.

4.3.2 Erimiş Karbonat Yakıt Pili

Erimiş karbonat yakıt pillerinde elektrolit olarak Li (lityum), Na (sodyum), K (potasyum) gibi alkali karbonatlarının LiAlO_2 biçimindeki seramikleri kullanılır. Çalışma sıcaklıkları oldukça yüksek olup $600\text{ }^\circ\text{C}$ ile $700\text{ }^\circ\text{C}$ arasındadır. Verimleri ise yaklaşık olarak %60 seviyelerindedir. Yüksek çalışma sıcaklığı, açığa çıkan yüksek ısının kojenerasyonla yeniden kullanımına olanak tanımaktadır. Bu şekilde açığa çıkan ısı kojenerasyon sistemlerinde kullanılırsa verim %80 i bulabilir. Askeri uygulamalarda faydalı elektrik üretiminde kullanılırlar. Şekil 4.5 erimiş karbonat YP'nin çalışma biçimini göstermektedir.

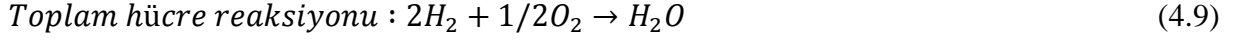
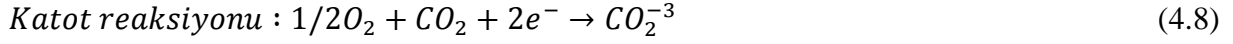
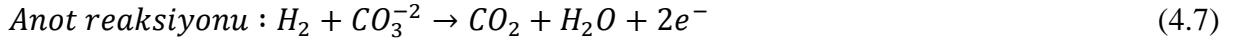


Şekil 4.5 Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma biçimi

Katı erimiş karbonat yakıt pilleri CO_2 ve CO ya karşı dayanıksız olmadıkları gibi sistemin çalışmasını olumlu yönde etkilerler. 1 MV ile 20 MV kapasite aralığına uygun olarak üretilir. Çok yüksek çalışma sıcaklıklarına ihtiyaç duyduğundan ancak sabit ve büyük santrallerde yerleşimleri mümkün olmaktadır. Bu sebepten dünyada uygulama alanları sınırlıdır.

Erimiş karbonat yakıt pillerinin en büyük dezavantajı yüksek çalışma sıcaklığında elektrolit üzerinde artan aşınmanın etkisi sonucunda sistemde arızalar meydana gelmesidir. Ayrıca katı yerine sıvı bir elektrolitle çalışmanın yarattığı zorluk ve karbonat iyonlarının anot reaksiyonunda harcanması nedeniyle sürekli katoda karbondioksit enjeksiyonu gerektirmesi

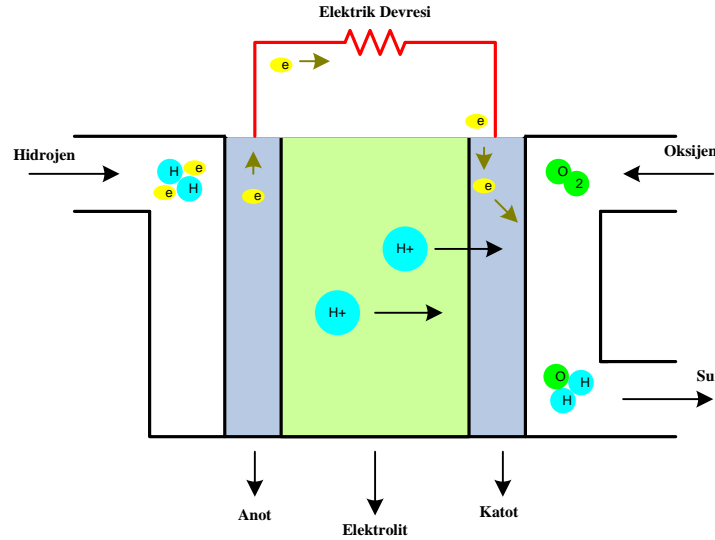
de diğer dezavantajlarıdır. Bu tip YP'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıda gösterildiği gibidir.



4.3.3 Fosforik Asit Yakıt Pili

Fosforik asit yakıt pillerinde elektrolit olarak adından da tahmin edilebileceği gibi fosforik asit (H_3PO_4) kullanılmakta olup katalizör olarak ise platin ve platin alaşımları kullanılır. Bunun sebebi ise fosforik asitin temel metallerle çok çabuk reaksiyona giren kararlı bir asit olmasıdır. Hala ticari teknolojide geçerli tek pil çeşidi fosforik asit pilleridir.

Yakıt anot elektrotuna verilir ve burada proton ve elektronlarına ayrılır. Pozitif yüklenen hidrojen iyonları elektrolit vasıtasıyla anottan katoda geçerler. Anottaki reaksiyon sonucu üretilen elektronlar, harici bir yol izleyerek devrelerini tamamlar ve elektrik enerjisi üreterek katoda dönerler. Katotta ise elektronlar, hidrojen iyonları ve oksijenden su gelmesini sağlarlar. Şekil 4.6 fosforik asit YP'nin çalışma biçimini göstermektedir.

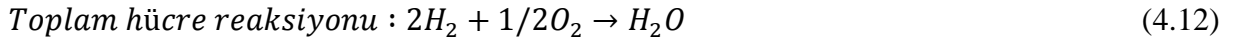
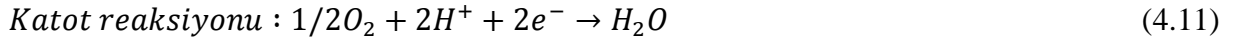


Şekil 4.6 Fosforik asit yakıt pilinin çalışma biçimi

Bu teknoloji yüksek sıcaklık uygulama derecelerinde sıvı asiti kontrol edebilmek için yardımcı sistemlere ve çok pahalı materyallerin kullanımına ihtiyaç duymaktadırlar. Bununla birlikte, doğal gaz veya kömür gazına dayanan yakıtların, elektrotu zehirlemeden kullanılabilmesi bu tip yakıt pillerinin avantajlarından biridir. Aynı zamanda bu piller

karbondioksit içeren hava ile de çalışabilirler. Fakat platin zehirlenmesini önlemek için karbonmonoksit dönüştürülmeli veya tamamen kaldırılmalıdır.

Fosforik asit yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı 150 °C ile 220 °C arasında değişmektedir. Çalışma sıcaklığının yüksekliği ve maliyetin de yüksek olması sebebiyle birçok uygulamada tercih edilmemektedir. Bununla birlikte 200 °C de çalışırken bu yüksek çalışma sıcaklıklarından dolayı katalizörlerin karbonmonoksit ile zehirlenmesini azaltması ve %1,5 oranında bir karbonmonoksit konsantrasyonuna izin vermeleri fosforik asit yakıt pillerinin avantajlarından biridir. Suyun kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda da görevini yapabilmesi ise bir başka avantajdır. Fosforik asitin iletkenliğinin düşük sıcaklıklarda az olmasından dolayı bu sıcaklıklar tercih edilmez. Bu tip YP'de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıda gösterildiği gibidir.



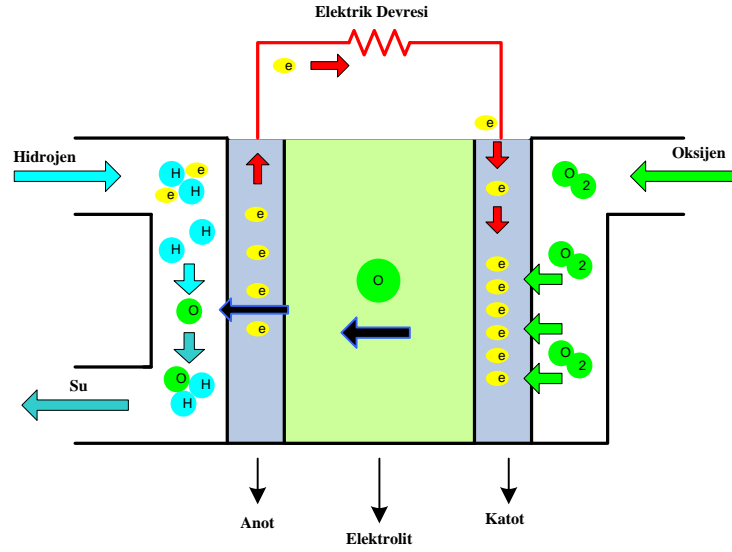
Bu YP'nin verimi ise %40-50 civarlarındadır. Bu tip pillerin çalışma sıcaklığının yüksek olmasından dolayı kojenerasyona uygundur. Böylece açığa çıkan ısı kojenerasyonda kullanıldığı takdirde verim %80'i bulabilir.

4.3.4 Katı Oksit Yakıt Pili

Katı oksit yakıt pillerinde elektrolit olarak, gözeneksiz bir katı metaloksit olan katı yitra dengeli zirkonyum materyaller kullanılır. Bu elektrolit, yüksek sıcaklıkta oksijen iyonlarının O^{2-} katottan anoda aktarılmasına yarar. Gözeneksiz bir katı metaloksitin elektrolit olarak kullanılması sebebiyle katı oksit yakıt pilleri diğer YP çeşitlerine nazaran yapı bakımından daha basittir. Çünkü YP'nin yapısında sadece iki faz; gaz ve katı söz konusu olmaktadır. Elektrolit de elektrotlar da seramik malzemedir meydana gelmektedir. Bu katı elektrolitin her iki tarafı da geçirgen özelliğe sahip elektrot maddeyle kaplanmıştır. Çalışma sıcaklıkları 1000 °C dir ve negatif yüklü oksijen iyonları kristal madde içerisinde hareket ederler. Bu tip yakıt pillerinin verimi ise %60 seviyelerindedir. Erimiş karbonat yakıt pillerinde olduğu gibi çalışma sıcaklığının yüksekliğinden dolayı açığa çıkan ısı, kojenerasyonda kullanmaya uygundur ve bu şekilde kullanıldığı takdirde verim %85'lere kadar çıkartılabilir.

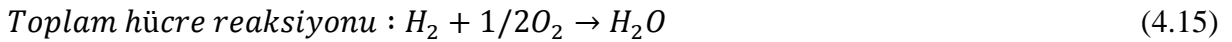
Bu YP'de yakıt anot tarafına verildiği anda katot tarafında bulunan oksijen iyonları elektrolit içinden geçerek anotta hidrojenle reaksiyona girer. Burada gerçekleşen reaksiyon sonucunda elektronlar ayrılır ve anot katot arasına bağlı dış devre iletkeninden geçerek elektrik enerjisini

oluşturup katoda geri döner. Reaksiyon sonucunda, reaksiyona giren hidrojen, oksijen ve karbonmonoksit çıkış ürünü olarak su ve karbondioksiti üretir. Şekil 4.7’de katı oksit YP’nin çalışma biçimini gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Katı oksit yakıt pilinin çalışma biçimi

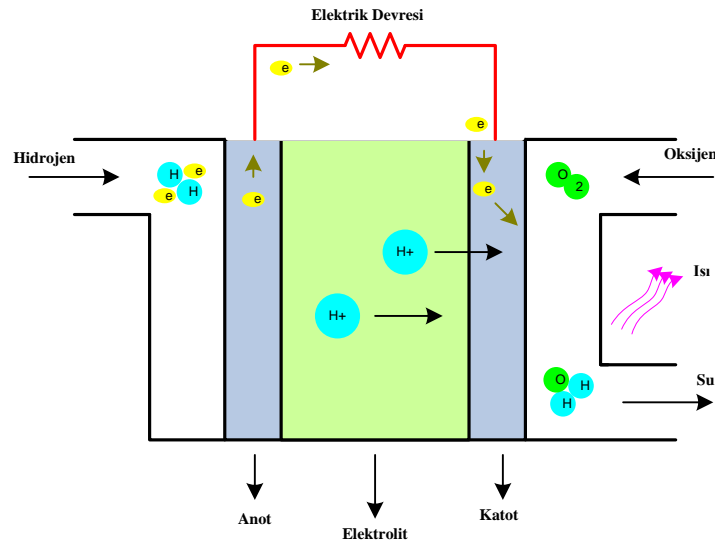
Katı oksit yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen haricinde doğalgaz da kullanılabilir. Çalışma sıcaklığının yüksekliği doğalgazı hidrojene dönüştürürken kolaylık sağlamaktadır. Bunun yanında saf hidrojen dışında yakıtlar kullanıldığında ortaya çıkan kükürt kirliliği karşılaşılan en büyük sorunlardandır. Yüksek çalışma sıcaklığından dolayı elektrotlardaki reaksiyonlar da çok yüksek hızlarda olmaktadır. Bu tip YP’de meydana gelen kimyasal reaksiyonlar aşağıda gösterildiği gibidir.



4.3.5 Proton Geçirgen Zarlı Yakıt Pili

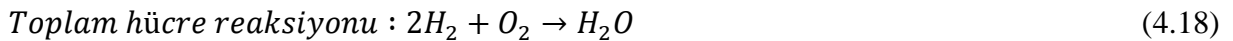
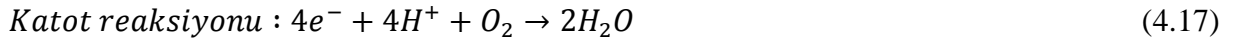
PEM yakıt pillerinde elektrolit olarak yapısında flor bulunduran ve sulfonik asit polimerleri gibi iyon değiştirebilen çok ince polimer zar kullanılır. Bu zarın kalınlığı 12-20 mikron seviyesindedir ve inceldikçe verimliliği artar. Anot ve katotta katalizör olarak Pt (platin) veya Pd (paladyum) gibi metaller kullanılmaktadır. Bu tip yakıt pillerinde yakıt olarak hidrojen kullanılırken, oksitleyici olarak da havanın oksijeni kullanılır. Çalışma sıcaklığı genellikle 100 °C altında olan bu pillerin tipik çalışma sıcaklığı ise 60-80 °C civarındadır (Oğuz, 2006).

PEM yakıt pillerinin temel bileşeni birbirlerinden polimer membran elektrot ile ayrılmış anot ve katot olmak üzere iki tane elektrot içerir. Bu elektrotlar bir kenarından ince platinyum katalizör tabakası ile örtülmüştür. Pilin anot tarafına verilen hidrojen atomları burada iyonize olurlar. Protonlar pozitif yüklenir ve geçirgen zardan geçerek katoda yönelirler. Elektronlar ise anottan katoda geçerken harici bir yol izlerler ve elektrik enerjisinin ortaya çıkmasını sağlarlar. Katoda geçen elektronlar burada hidrojen protonları ve havadan alınan oksijen ile birleşerek su meydana getirir. Bu YP türünün çalışması için polimer zar hidrojen protonlarının geçmesine izin verirken elektronların ve daha başka ağır gazların geçişini engellemelidir. Şekil 4.8’de PEMYP’nin çalışma biçimini gösterilmektedir.



Şekil 4.8 PEMYP’nin çalışma biçimi

PEM yakıt pillerinin çalışması esnasında anot, katot ve pil de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir. Çıkış ürününün sadece su olduğu toplam reaksiyonda görülmektedir.



PEM yakıt pilleri aşınmamalarını, oldukça sessiz çalışmalarını ve herhangi atık ortaya çıkarmamalarını hareketli parça içermemelerine borçludurlar. Verimlilikleri oldukça yüksek olup yaklaşık olarak %50 dir. PEM yakıt pilleri düşük güç seviyelerinde daha verimli çalışmaktadırlar ve verimlilikleri gücün arttırılmasıyla lineer olarak azalmaktadır (Doğan, 2008).

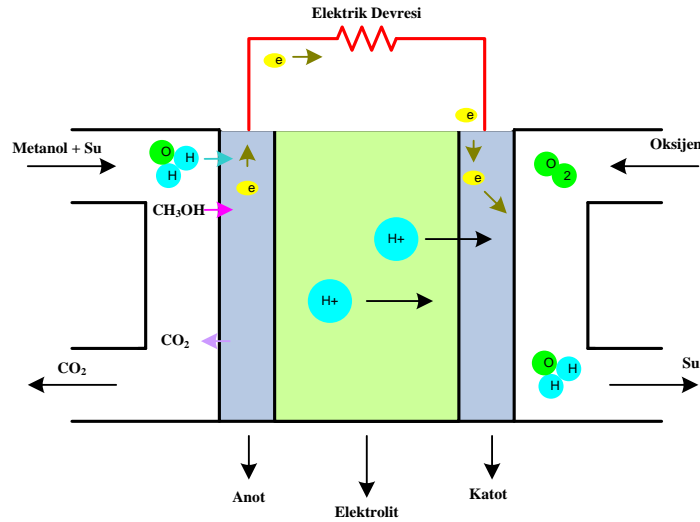
PEM yakıt pilleri üretim maliyetlerinin pahalı olması dezavantajına rağmen yüksek akım ve güç yoğunluğuna sahiptirler. Performans için kritik noktalardan birisi de yan ürün olarak çıkan suyun idaresidir. Bu yakıt pillerinde seri üretime imkan verilebilmektedir. Bu sebeplerden dolayı PEM yakıt pilleri günümüzde geliştirilen yakıt pilleri arasında en fazla ilgi çeken ve en fazla gelecek vaat eden tiptir (Yıldızbilir, 2006).

PEM yakıt pilleri düşük çalışma sıcaklığı ve hızlı başlangıç karakteristikleri ile konut kullanımı için en cazip YP türüdür. Bu çalışmada da yük olarak bir ev yükü kullanılacağından kullanılacak YP türü olarak PEMYP tercih edilmiştir (Tanrioven ve Alam, 2006).

4.3.6 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili

Doğrudan metanol kullanan YP, özellikleri ve çalışma prensipleri itibarıyla proton değişim zarfı yakıt piline yakıt olarak saf hidrojen değil de hidrojen elde edilebilen metanol kullanılması farklılığı haricinde benzemektedir (Yıldızbilir, 2006).

Bu tip yakıt pillerinde elektrolit olarak, proton değişim zarfı YP'deki geçirgen zarf kullanılmaktadır. Ancak doğrudan metanol kullanılan bu tip pillerde hidrojen doğrudan sıvı metanolden elde edilmekte olup yakıt yakarak hidrojen elde etme ünitesine gerek kalmamaktadır.

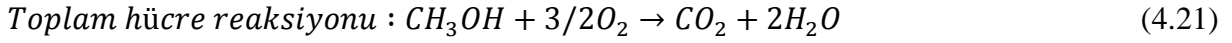
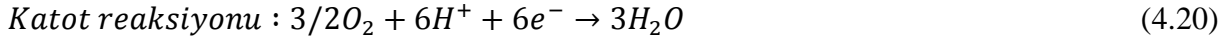
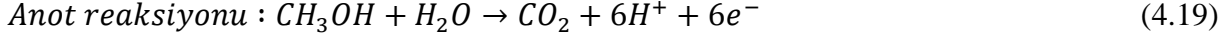


Şekil 4.9 Doğrudan metanol kullanılan yakıt pilinin çalışma biçimi

Yakıt hücresinin anodunu metanol ve su karışımı ile beslerken katot üzerinde oluşan su ile elektrokimyasal bir reaksiyon meydana getirir ve metanolün parçalanması sonucu protonlar, elektronlar ve karbondioksit meydana gelmektedir. Reaksiyon sonucu oluşan protonlar diğer ürünlerden ayrılarak seçiciliğe sahip elektrolit zarından geçerek katoda hareket etmektedir ve katot üzerinde beslenen havadan sağlanan oksijen ile reaksiyona girerek suyu oluşturmaktadır.

Bunların sonucunda meydana gelen termodinamik potansiyeller, dış devre bağlantısı ile gerilim oluşmasını ve elektrik üretilmesini sağlamaktadır. Şekil 4.9'da doğrudan metanol kullanılan YP'nin çalışma biçimi gösterilmektedir.

Doğrudan metanol kullanılan YP'nin çalışması esnasında katot, anot ve hücre de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir.



Toplam hücre reaksiyonu göz önünde bulundurulduğunda, YP yan ürün olarak dışarıya karbondioksit ve su vermektedir. Çalışma sıcaklıkları 50 °C ile 100 °C arasında değişen bu yakıt pillerinin verimleri ise %40 civarındadır.

Metanolün (CH₃OH) karbondioksit ve hidrojene dönüşümünün düşük sıcaklıklarda olması, PEM yakıt pillerine göre daha fazla platin katalizörüne ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Platin katalizörünün miktarındaki bu artışın fiyatta da artışa neden olması bu tip yakıt pilleri için önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. En önemli avantajı ise sıvı yakıt kullanımına olanak sağlaması ve reformlama ünitesi olmadan çalışabilir olmalarıdır. Geliştirme aşamasında olan bu tip yakıt pillerinin gelecekte cep telefonları, diz üstü bilgisayarlar ve taşınabilir güç kaynakları için büyük bir potansiyel oluşturacağı görülmektedir.

4.4 Yakıt Pillerinin Karşılaştırılması

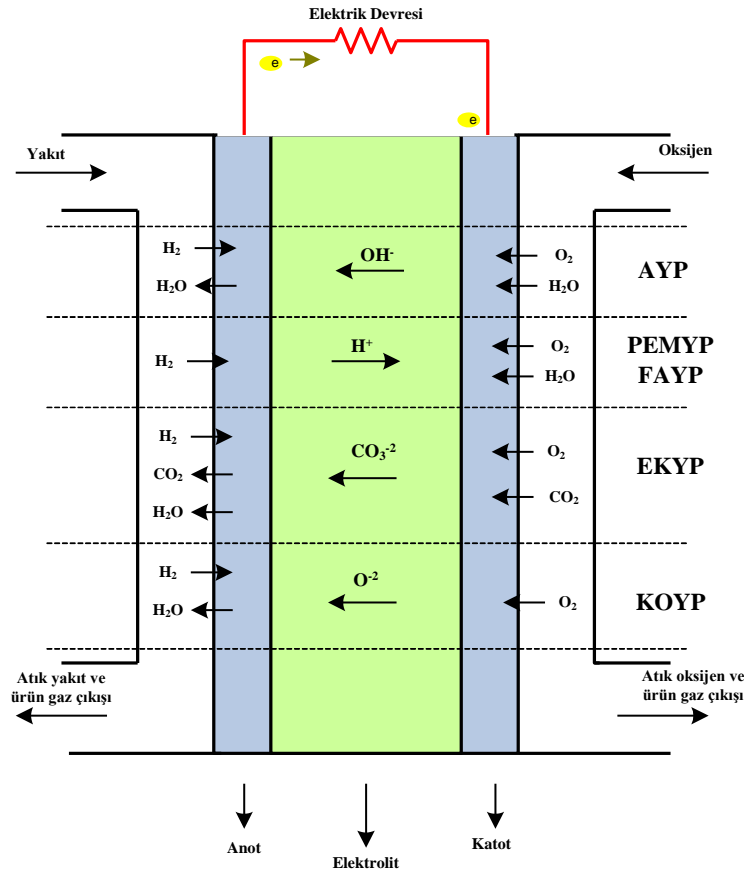
Yakıt pillerinin en yaygın olarak kullanılan çeşitleri ve özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgede bütün yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları incelendiği takdirde en düşük, pratik uygulamanın en kolay olduğu ve soğutma için özel yapı oluşturulmasına en az ihtiyaç duyulan YP çeşidinin PEMYP olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1 Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri (Vural, 2010)

YP Türü	Çalışma Sıcaklığı [°C]	Elektrolit Türü	Yakıt Türü	Yük Taşıyıcısı	Oksitleyici Türü	Verim (%)
Alkali YP	70-100	Potasyum hidroksit	Doğrudan hidrojen	OH^-	Saf oksijen	50-70
Erimiş Karbonlu YP	650	Erimiş karbon çözeltisi	Doğal gaz ya da hava gazından elde edilen hidrojen ve karbonmonoksit	CO_3^{2-}	Havadan elde edilen oksijen	40-55

Fosforik Asit YP	160-210	Dengelenmiş fosforik asit	Doğal gazdan elde edilen hidrojen	H^+	Havadan elde edilen oksijen	35-50
Katı Oksit YP	800-1000	Seramik katı oksit	Doğal gaz ya da hava gazından elde edilen hidrojen ve karbonmonoksit	O_2^{-2}	Havadan elde edilen oksijen	45-60
PEMYP	50-100	Proton geçirgen polimer	Doğrudan hidrojen	H^+	Saf ya da havadan elde edilen oksijen	35-60

Şekil 4.10'da tüm YP çeşitlerinin akım taşıyıcı iyonları, tepkimeye giren moleküller ve katalizörleri görülmektedir. Bu şekilde en çok dikkati çeken unsur bütün YP çeşitlerinin yapısının Anot-Elektrolit-Katot şeklinde olmasıdır.



Şekil 4.10 Bütün yakıt pili çeşitlerinin çalışma biçimleri

Yakıt pillerinin çeşitlerine göre kimyasal tepkimeleri de değişir. Bununla birlikte akım taşıyıcı iyonlar da değişmektedir. Çizelge 4.2 yakıt pillerinin kimyasal tepkimelerini göstermektedir.

Çizelge 4.2 Yakıt pillerinin kimyasal tepkimeleri

YP türü	Anot tepkimesi	Katot tepkimesi
AYP	$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 2H_2O + 4e^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
EKYP	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
FAYP	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
KOYP	$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$	$1/2O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
PEMYP	$H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$	$4e^- + 4H^+ + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Bu bölümün başında yakıt pillerinin çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılabilirdiğinden bahsedilmiştir. Bu çeşitlerden düşük ve yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinin, her ikisinin de yapılacak uygulamanın özelliklerine bağlı olarak farklı avantaj ve dezavantajları vardır. Çalışma sıcaklıklarının farklı olması, her ikisinin de kesinlikle farklı işlerde kullanılacağı anlamına gelmediği gibi her ikisi de benzer işlerde kullanılabilirler. Güç ihtiyacının artması durumunda pil sayısı artırılarak problem çözülebilir. Bu da modüler yapıda olmalarının sağladığı oldukça yüksek esnekliğin bir sonucudur. Her YP teknolojisi özel uygulama alanlarında kendini çekici kılan uygulama özelliklerine sahiptir. Yakıt pilleri büyük güç ünitelerinden düşük güç uygulamalarına kadar büyük değişiklikler gösterir. Her uygulama değişik enerji teknolojisi yaklaşımına uyum gösterir.

En yaygın kullanılan yakıt pillerinden biri fosforik asit pilleridir. Bu teknoloji yüksek uygulama derecelerinde sıvı asiti kontrol edebilmek için düşük dereceli destek sistemlerinde, çok pahalı materyallerin kullanımında ve daha iyi durumda muhafaza edilmesinde başarıyla uygulanır (Doğan, 2008).

İlk YP teknolojilerinden olan alkali YP teknolojisi uzay mekiği uygulamalarında ve NASA'nın diğer uygulamalarında geniş kullanım alanı bulur. Yer uygulamalarında kullanılması zordur ve bunun sonucu olarak tercih edilen bir teknoloji değildir. Bu zorluğun sebebi ise havada bulunan karbondioksitlere karşı çok duyarlı olmasıdır.

Çizelge 4.3'te YP çeşitlerinin; uygulamaları, avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.3 Yakıt pili çeşitlerinin karşılaştırılması

Yakıt Pili Çeşitleri	Yakıt Pili Uygulamaları	Avantajları	Dezavantajları
PEMYP	Elektrik Taşınabilir güç Ulaşım	<ul style="list-style-type: none"> Katı elektrolit aşınma ve kontrol sorunlarını azaltır Düşük sıcaklık Çabuk çalışma Yüksek akım ve güç yoğunluğu 	<ul style="list-style-type: none"> Düşük sıcaklık pahalı katalizörlere ihtiyaç duyar Yakıt içindeki pisliklere karşı aşırı duyarlılık
AYP	Ordu Uzay Sabit güç	<ul style="list-style-type: none"> Alkali elektrolit kullanımında katot tepkimesi daha hızlı gerçekleşir Yüksek performans 	<ul style="list-style-type: none"> Yakıt ve havadaki karbondioksitin ortadan kaldırılması maliyeti arttırır
FAYP	Elektrik Kojenerasyon Ulaşım Sabit güç	<ul style="list-style-type: none"> Bileşik elektrik ısı üretiminde %85'e varan verim Yakıt olarak saf olmayan hidrojen kullanabilme 	<ul style="list-style-type: none"> Pt katalizörler Düşük akım ve güç Büyük boyut, kütle
KOYP	Elektrik Kojenerasyon Sabit güç	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek sıcaklık avantajları 	<ul style="list-style-type: none"> Yüksek sıcaklık, pil bileşenlerinin aşınmasına ve kırılmasına sebep olur.

Her çeşit uygulama için kullanılabilen ideal bir YP sistemi bulunmamaktadır. Uygulamanın gereksinimlerine göre amaca en uygun YP sistemi değişmektedir. Özel amaçlı kullanımlar için karar verilirken yalnızca YP değil, tüm sistem incelenerek karar verilmelidir.

Belirli bir YP türü belli bir uygulama için mükemmel bir seçim olarak düşünülebilir, ancak hidrojenin depolanması ve dönüştürücü sistem de hesaba katıldığında böyle olmama ihtimali de görülür. Buna örnek olarak, dahili dönüştürücü konfigürasyonu içermekte olan ve hidrokarbon yakıt kullanan yüksek sıcaklık yakıt pillerinin düşük sıcaklık pillerine göre daha

basit sistem dizaynı gerektirdiği verilebilir (Doğan, 2008).

PEMYP'in Çizelge 4.3'te de belirtildiği gibi düşük çalışma sıcaklığı ve hızlı başlangıç karakteristikleri vardır. Bu avantajları ile konut uygulamaları için en cazip YP türüdür. Bu çalışmada bir konut uygulaması olduğu için YP türü olarak PEMYP seçilmiştir (Tanrioven ve Alam, 2006).

4.5 Yakıt Pillerinin Uygulama Alanları

YP teknolojisi geliştikçe çok farklı alanlarda kullanımı yayılarak sınırsız bir pazara sahip olabilir. Uygulama alanlarını; uzay çalışmaları ve askeri alanlar, ulaşım ve taşıma, sabit güç sistemleri ve taşınabilir uygulamalar olmak üzere dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

YP uygulamalarının bir kısmı aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

- Sabit güç uygulamaları
 - Güç üretim istasyonları
 - Yedek üniteler
 - Dağıtılmış güç üretimi
 - Kombine ısı ve güç üretim sistemi olarak konutsal kullanım
- Ulaşım uygulamaları
 - Otobüsler, kamyon ve arabalar
 - Hava alanı içindeki terminal araçları
- Taşınabilir uygulamalar
 - Diz üstü bilgisayarlar
 - Hücresel telefonlar

4.5.1 Uzay Çalışmaları ve Askeri Alanlar

Uzay çalışmaları yakıt pillerinin ilk uygulanma alanıdır. Bu konuda ilk çalışmalar ABD'de NASA'nın çalışmaları kapsamında Apollo, Gemini ve Space Shuttle uzay gemilerinde H₂-O₂ YP birbirine bağlı üç ünite olarak kullanılmıştır. Her üniteye 31 adet YP olmak üzere toplamda 93 adet YP kullanılmıştır. Toplam üretilen güç 1,4 kW iken gerilim 27–31 Volt'tur. Ağırlığı 111 kg olan piller kullanılmıştır. 1995 saatlik uçuş süresi boyunca 450 kg su ve 325 kWh'lik enerji üretilmiştir. Bu gemilerden Gemini gemisinde farklı olarak kullanılan YP türü

değiştirilip PEMYP kullanılmıştır. Burada kullanılan yakıt pillerinin ömrü ve performansı o zaman kullanılan membranlarla büyük bir ölçüde sınırlandırılmıştı. Daha sonraki çalışmalar ile hücre performansı ve güç seviyeleri önemli bir şekilde artmıştır. Her üniteye 32 adet pil bulunurken 1 kW güç sağlanmaktadır. Bu üç geminin tamamında iki ünite ihtiyacı karşılamak için kullanılırken, üçüncü ünite acil ve özel görev için hazırda tutulmuştur (Yıldızbilir, 2006; Kılıçoğlu, 2008).

Hibrit sistemlere de güzel bir örnek olan konvansiyonel denizaltılar dizel-elektrikli tahrik sistemi ile yapılandırılmışlardır. Denizin üstünde giderken dizel motorlarını kullanan denizaltılar denize daldıklarında ise hava olmadığından dolayı elektrik motorlarını kullanırlar. Dizel-elektrik tahrik sistemi ile üretilen enerji, asitli kurşun bataryalara yüklenmekte ve denizaltının dalma operasyonu ve personelin ihtiyacını karşılamaktadır. Denizaltının su altında kalma süresi bataryaların kapasitesi ile sınırlıdır. Su üstü operasyonlarda ise dizel jeneratörle bataryaların tekrar şarj edilmesi sağlanmaktadır. Bu esnada düşman tarafından tespit edilme riski oldukça yüksek olduğundan ve diğer sebeplerden dolayı denizaltı sistemlerinin su üstü periyoduna geçmeden atmosfere kapalı bir tahrik sistemi ile yapılandırılması ve daha fazla su altında kalması araştırılmıştır. Bunun için Almanlar tarafından geliştirilen kapalı devre dizel motoru, stirling motoru, kapalı çevrimli gaz-buhar türbinleri ve yakıt pilleri gibi tahrik sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler içinden yakıt pilleri diğer sistemlere göre aşağıda yazan avantajlı yanlarının olmasından dolayı diğer enerji kaynaklarına göre daha çok tercih edilmektedir (Bedir ve Alniak, 2004).

- Denizaltının uzun süre su yüzeyine çıkmadan çalışabilmesini sağlar.
- Çalışırken düşük ses seviyesine sahiptir.
- Düşük manyetik özelliğe sahiptir.
- Deniz suyuna az miktarda ısı transferi sağlar.

4.5.2 Ulaşım ve Taşıma

Yakıt pillerinin uygulandığı ve gelecekte de daha fazla yer bulacağı önemli alanlardan biri de otomotiv sektörüdür. Yakıt pilleri, otobüs, kamyon, otomobil ve her türlü taşıt için yakıt görevi yapabilecek özelliklere sahip oldukları gibi yakıt pilli araçlar, benzin ve dizel ile çalışan araçlara göre daha temiz ve enerji bakımından daha verimlidirler. Günümüzde taşıt emisyonlarının çevre kirliliği üzerindeki etkileri göz önüne alındığında, yakıt pilli araçların çevre dostu ve karlı bir seçim olduğu gözükmemektedir (Yıldızbilir, 2006).

Düşük çalışma sıcaklığı olan YP çeşitleri, yüksek sıcaklık yakıt pillerinin kullanıldığı

teknolojilere göre daha hızlı başlangıç yapmaya fırsat vermektedir. Düşük çalışma sıcaklığına sahip PEM yakıt pillerinin bu özelliğinin yanına hızlı cevap verebilme yeteneği, yüksek güç yoğunluğu gibi özellikleri de eklendiğinde taşıt uygulamaları için en elverişli YP sistemi olarak görülmektedir. Bununla birlikte elektrolitlerinin katı olması yani sızıntısız ve düşük korozyonlu olması da taşıt uygulamalarında tercih edilmeleri için iyi avantajlarındandır. (Ural ve Gençoğlu, 2009; Erdinç, 2008)

4.5.3 Sabit Güç Santralleri

YP teknolojisi için en önemli pazarlardan bir tanesi de sabit güç santralleridir. Dünyada hali hazırda 200'den fazla sabit güç kaynağı olarak kurulmuş YP istasyonlarının bulunması da bunu göstermektedir. Bu enerji üreteçleri, hastanelerde, otellerde, iş yerlerinde, okullarda, evlerde, güç istasyonlarında ve havaalanlarında hem elektrik hem de ısıtma sistemlerinde kullanılabilir. Şirketler bu sistemleri kullandığı takdirde enerji harcamalarında %20 ile %40 arasında bir düşüş görülmektedir (Yıldızbilir, 2006).

1 kW 'dan birkaç MW 'a kadar üretilebilen sabit güç uygulamaları ev, işyeri, okul, hastane v.b. yerleri kapsar. Bu tarz yerlere tipik olarak merkezi üretim birimi ile hizmet verilmektedir. Hidrojen türbinlerinin çalıştırılması da sabit güç hizmeti vermek için başka bir yöntemdir. Oksijen içinde yanan hidrojenin tek bir yan ürünü vardır. O da CO₂, NO_x ve SO_x emisyonlarından serbest kalan sudur.

Şebekeye paralel olarak bağlanabilen veya bağımsız olarak çalışabilen konutsal YP sistemleri, konut için temel ya da yedek güç sağlamak için kullanılabilir. Sessiz ve emniyetli bir güç sağlayan konutsal bir YP güç sistemi fazla da yer kaplamadığından dolayı rahatlıkla konutun bodrum katına ya da arka bahçeye yerleştirilebilir. Yakıt pillerinin değişken şartlar altında gösterdiği performans, gelişen yeni teknolojiler arasında yakıt pillerinin de yer almasını birkaç etkenden biridir. Konutsal YP sistemleri gelişiminde yakıt dönüştürücü sorunları, maliyet, ısınma süresi, yöntem, hidrojen depolanması ve taşınması, ekonomik hidrojen üretimi, kojenerasyon sistemi ve CO₂ atığı çözüm bekleyen sorunlardandır. Buna rağmen birçok şirket, bölgesel hükümetler ve kamu kuruluşları ile işbirliği içinde olan YP üreticileri tarafından birçok çalışma yapılmakta ve üretilen yakıt pilleri konutlarda test edilmektedir. Bu tez çalışmasında da bir ev yükü için simülasyon çalışmaları yapılmıştır (Ural ve Gençoğlu, 2009).

4.5.4 Taşınabilir Uygulamalar

Taşınabilir yakıt pilleri kameralar, telefonlar, diz üstü bilgisayarlar, radyolar, elektronik

cihazlar, güç aletleri v.b. uygulamalarda, bir prize bağlanmadan güç ihtiyacının karşılanması için kullanılır. Bu pillerde olması gereken özellikler olarak uzun çalışma zamanı, düşük ağırlık, kısa cevap zamanı, uzun ömür, düşük maliyet, küçük fiziksel boyut, emniyet ve güvenilirlik v.b. özellikler düşünülebilir.

Yakıt pillerinin en büyük dezavantajlarından olan yüksek maliyetleri piyasada uygulama alanı bulunabilmesini zorlaştırmaktadır. Bunu ortadan kaldırmak için ticarileştirilmesi gerekmektedir. Bu piyasada önemli bir uygulama olarak daha fazla güç ve enerji gerektiren elde taşınabilir video iletişim ve multimedya araçlarının bataryalarında yakıt pillerinin kullanımı söylenebilir. Bununla birlikte bisiklet ve motosiklet gibi küçük araçlarda da yakıt pillerinin kullanıldığı örnekleri görmek mümkündür (Ural ve Gençoğlu, 2009).

Taşınabilir uygulamalar oldukça büyük potansiyele sahiplerdir. Bu kategori genel olarak, enerji tüketimi ortalama 10 W olan dizüstü bilgisayarları ve enerji tüketimi ortalama 400 mW, bekleme konumunda 50 mW ve görüşme sırasında 1 mW olan cep telefonlarını kapsamaktadır. Her gün büyüyen bir pazar payına sahip olan bu uygulamaların en büyük dezavantajları, kullanılacak bataryaların ömrünün kısa olmasıdır. Bu uygulamalarda kullanılan piller arasında en verimli olan Li-on bataryaların yaklaşık 160 Wh/kg'lık bir enerjisi vardır. Bu, telefonun birkaç günlük enerjisini karşılarken, dizüstü bilgisayarın 3 saatlik enerjisini karşılamaktadır. Kullanılan bataryalar şu anda ulaşabilecekleri tüm limitleri zorlamış durumda olmasına rağmen günümüzde, tüketiciler bunun 3-5 kat daha fazlasını talep etmektedir.

Daha iyi enerji sağlayan, YP destekli şarj edilebilir, küçük boyutlu piller bu talebi karşılamak için üzerinde çalışılan çözümlerendir. Bu uygulamalarda pilin ömrü sadece taşınan hidrojen veya metanol tankının büyüklüğü ile sınırlı kalacaktır. Bu tip bir uygulamanın en iyi avantajı, günümüzde kullanılan batarya ile yakıt pilinin aynı oranda yer kaplamasıdır. Bununla birlikte kullanıcının cihazını sanki çakmağını veya dolmakalemini doldürmüş gibi birkaç saniyede dolduracak ve her dolunun da günümüz pillerinden 3-5 kat daha fazla enerji sağlayacak olması da en iyi özelliklerindedir. Bu tür uygulamalar için kullanılacak teknoloji proton değişim zarfı YP ya da benzer şekilde çalışan direk metanol YP olacaktır. Diğer yakıt pilleri de düşünüldüğünde düşük çalışma sıcaklıkları ve %100 katı içerikleri ile bu tarz uygulamalar için daha avantajlıdır. Gelecekte minyatür yakıt pilleri piyasaya çıktıkları zaman, cep telefonu sahipleri cep telefonlarını bir ay şarj etmeden kullanabileceklerdir. Telekomünikasyon dünyasından bilgisayar sektörüne, görüntü teknolojisinden alarm sistemlerine kadar birçok alanda bu küçük boyutlu yakıt pilleri söz sahibi olacaktır (Yıldızbilir, 2006).

4.6 Yakıt Pillerinin Avantaj ve Dezavantajları

Yakıt pillerinin çeşitlerinin kendi aralarında avantaj ve dezavantajları önceki başlıkta Çizelge 4.3'te karşılaştırılmıştır. Genel olarak yakıt pillerine bakacak olur isek diğer yakıt sistemleri göz önüne alındığında yakıt pillerinin birçok avantajı vardır ve bunların yanı sıra bazı dezavantajları da vardır.

4.6.1 Yakıt Pilleri'nin Avantajları

- Yakıt pillerinde elektrik üretimi esnasında yan ürün olarak sadece su oluşmaktadır. Günümüzdeki yakıt sistemlerinin çevre kirliliğine ve insan sağlığına ne kadar zararlı olduğu düşünülür ise bu sistemin yan ürün olarak su oluşturarak çevre dostu olması çok değerli bir alternatif yakıt olmasına sebep olmaktadır.
- Enerji üretim verimleri fosil yakıt sistemlerine göre daha yüksektir.
- Yakıt pillerinde hareketli aksam bulunmamaktadır. Bu nedenle gürültü kirliliği oluşturmadan, sessiz çalışırlar.
- Yakıt olarak kullanılacak çeşit çok fazladır. Saf hidrojenin yanı sıra fosil ve alternatif yakıtlar kullanılabilir. Bu sebeple çok farklı alanlarda kullanılabilirler.
- Çok düşük güçlerden yüksek güçlere kadar istenilen kapasitede üretilebildiği gibi boyutları da çanta taşınabilecek kadar küçük veya buzdolabı kadar büyük olabilir.
- Modüler olmaları ihtiyaç olan her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilir olmalarını sağlar. Böylece istenildiğinde kullanıcıya yakın inşa edilebilirler.
- Basit bir yapıları vardır. Montaj süresi de bu sebeple kısadır. Aynı zamanda inşa edildiği yerde çok az çevre kısıtlaması gerektirmektedir.
- Yakıt pillerinin yüksek sıcaklıkta çalışan çeşitlerinde elektrik üretiminin yanı sıra yan ürün olarak meydana gelen atık ısı geri kazanılabilir ve buhar santrallerinde kullanılır.
- Dayanıklı ve güvenilir bir sistem oluştururlar.
- Geleceğe yönelik potansiyeli en yüksek alternatif enerji kaynaklarından.

4.6.2 Yakıt Pillerinin Dezavantajları

- Henüz gelişen bir teknoloji olduğu için diğer sistemler düşünüldüğünde onlara nazaran maliyetleri çok yüksektir.

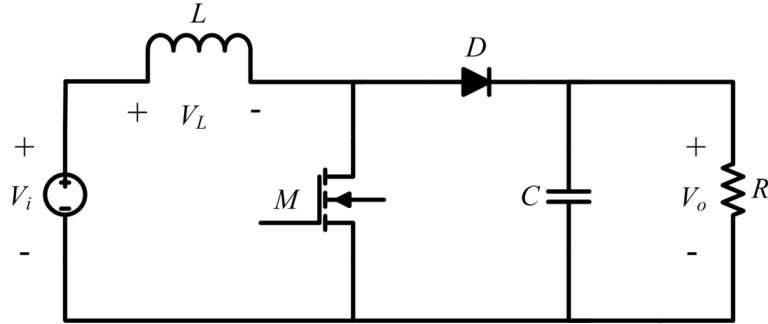
- Doğada bol miktarda bulunmasına rağmen kullanılacak hidrojenin saf olması gerekmektedir. Bunun sağlanması ise maliyeti arttırır.
- Hidrojen başta olmak üzere buna benzer kullanılacak olan yakıt türleri için bir dağıtım altyapısı bulunmamaktadır.
- Bu konuda uzun yıllar çalışmış uzman personel sıkıntısı vardır. Çünkü güç üretim endüstrisi için tanıdık olmayan bir teknolojidir.
- Hidrojenin depolanması başlığı altında bahsedilen depolama tanklarının, hacimlerinin büyüklüğü ve kütlelerinin çok olması da dezavantajlarındandır.

5. GÜÇ KOŞULLANDIRMA ÜNİTELERİ

YP'den DC bir elektrik gücü elde edilir. Bu gücü kullanılabilir bir AC güce çevirmek, otomotiv uygulamalarında kullanmak ya da elektrik ihtiyacını gidermek ve ara yüz olarak kullanmak için güç koşullandırması yapılması oldukça önemli bir teknolojidir. YP'nin iyi bir ideal elektrik güç kaynağı olmadığı elektrikselsel karakteristiğinden anlaşılabilir. YP hücresinin DC çıkış gerilimi ve yük akımı, YP'nin eski olmasına bağlı olarak geniş bir aralıkta değişkenlik gösterir ve sınırlı aşırı yüklenme kapasitesi vardır. Bu sebepten dolayı, YP'nin gerilimini üst seviyelere yükseltecek ve aynı zamanda düzenleyecek DC-DC dönüştürücüye ihtiyaç vardır. DC-DC dönüştürücüler adından da anlaşılacağı üzere DC giriş gerilimi alıp DC çıkış gerilimi üretirler ve tipik olarak çıkışta üretilen gerilim seviyesi giriş gerilim seviyesinden farklıdır (Çelik, 2007).

5.1 Yükseltici Tip DC-DC Dönüştürücü

Adından da anlaşılacağı gibi yükseltici tip DC-DC dönüştürücüler, çıkış gerilimi olarak giriş geriliminden daha yüksek seviyede gerilim elde etmek için kullanılır. İzole olmayan ve giriş-çıkış gerilim polariteleri aynı olan bir anahtarlama DC-DC dönüştürücüdür. Bu tür dönüştürücüler, kaynak olarak YP ve güneş paneli gibi çıkış gerilimi sabit olmayan cihazlar kullanıldığı yerlerde sıklıkla kullanılır. Yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün devre şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir (Özkan, 2007).



Şekil 5.1 Yükseltici tip DC-DC dönüştürücü devre şeması

Şekil 5.1'de; V_i dönüştürücünün giriş gerilimini, L endüktansı, V_L endüktans gerilimini, M anahtarlama elemanını, D diyotu, C kondansatörü, V_C kondansatör gerilimini, R yük direncini ve V_o dönüştürücünün çıkış gerilimini ifade eder.

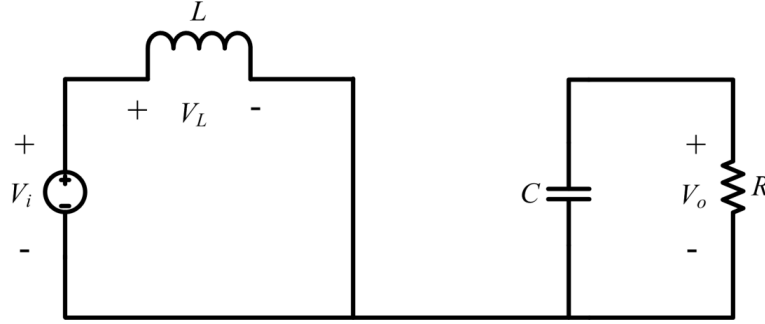
Şekil 5.1'de, M olarak nitelendirilen anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır. Bunun yerine IGBT veya transistor de kullanılabilir. Seçtiğimiz MOSFET çeşitli kontrol teknikleriyle belirli zaman aralıklarında ilettime geçirilerek veya iletimden kesilerek çıkışta,

girişten daha yüksek seviyede ve regüle edilmiş gerilim elde edilmesi için kullanılır. Bu anahtarlama elemanının iletimde tutulduğu sürenin yani t_{on} 'un, tüm periyot süresine yani T 'ye oranı D çalışma oranını verir.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad 0 < D < 1 \quad (5.1)$$

Yükseltici dönüştürücülerde endüktans girişte bulunduğundan dolayı dönüştürücünün giriş akımı aynı zamanda endüktansın akımı olur. Bu sebepten dolayı giriş akımı sürekli. Giriş ve çıkışı birbirine diyot bağlar ve bu elemanın sürekli iletimde olmamasından dolayı çıkış akımı sürekli değildir. Diyotun iletimde olmadığı durumlarda ise çıkış akımı kondansatör tarafından sağlanmaktadır.

Anahtar iletimde iken diyot kesimde olur. Bu durum esnasında oluşan eşdeğer devre Şekil 5.2'de verilmiştir.



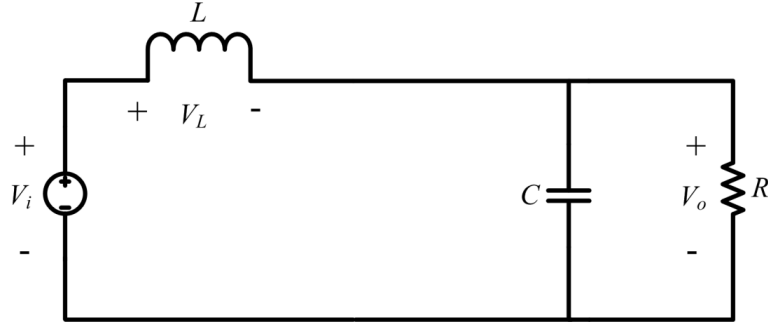
Şekil 5.2 Anahtar iletim konumunda iken yükseltici dönüştürücü eşdeğer devresi

$$V_L = V_i \quad 0 < t < DT_s \quad (5.2)$$

Denklem (5.2)'de DT_s bir anahtarlama periyodu esnasında anahtarlama elemanının ne kadar iletimde olacağını belirtirken, T_s anahtarlama periyodunu belirtir.

Şekilden de anlaşılacağı gibi anahtar iletim konumunda iken denklemde de gösterildiği gibi endüktansın gerilimi ile giriş gerilimi birbirine eşit olur. Endüktanstan geçen akım doğrusal bir şekilde artarak endüktansın üzerinde enerji yüklenmesine sebep olur. Güç diyotu ise bu esnada ters kutuplandığı için kesim durumuna geçer. Çıkışta kondansatör ise çıkışta bulunan yük üzerinde deşarj olur ve çıkış tarafı anahtarlama elemanın iletimde olduğu esnada bu şekilde beslenir.

Anahtar kesimde iken diyot iletimde olur. Bu durum esnasında oluşan eşdeğer devre Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Anahtar kesim konumunda iken yükseltici dönüştürücü eşdeğer devresi

$$V_L = V_i - V_o \quad DT_s < t < T_s \quad (5.3)$$

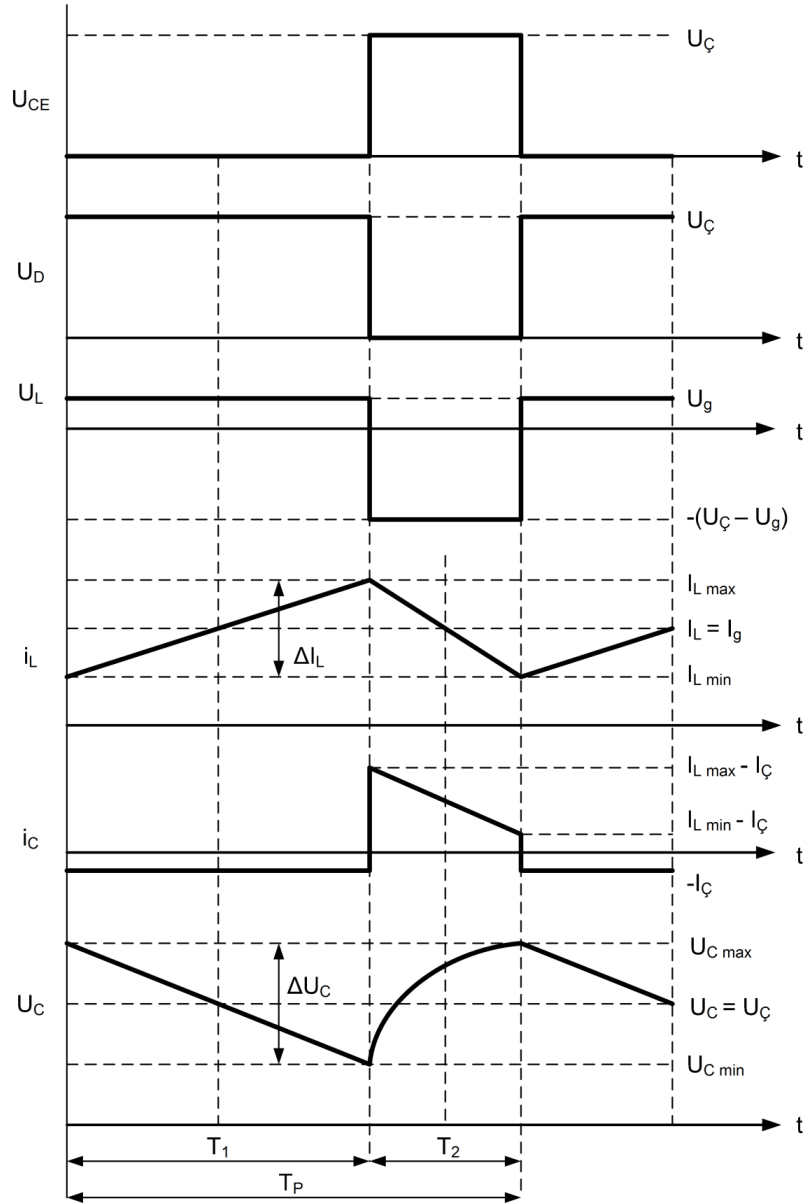
Bu durum esnasında, giriş gerilimi ile birlikte onun yanında endüktansın üzerinde biriktirilen ilave enerji de endüktans akımı vasıtasıyla diyot üzerinden geçerek yükü beslediği gibi bununla birlikte çıkış kondansatörünü de şarj eder. (5.3) eşitliğinde verildiği gibi, giriş gerilimi ile çıkışta oluşan gerilimin farkı endüktansın üzerindeki gerilime eşit olmaktadır.

Yükseltici dönüştürücüler endüktans akımının seviyesine göre sürekli ve süreksiz modları olmak üzere iki moda çalışabilirler. Anahtarlama elemanı kesimde olduğu esnada endüktansın akımı sıfır seviyesine düşer ise süreksiz akım modunda, düşmez ise sürekli akım modunda çalışmış olurlar. Bu iki durum için frekans alanı cevapları çok farklı olur. Bu sebepten dolayı dönüştürücünün sürekli olarak bu modlardan sadece birinde çalışması istenir.

$$\text{Sürekli akım modu} : \frac{\Delta I_L}{2} < I_L \quad (5.4)$$

$$\text{Süreksiz akım modu} : \frac{\Delta I_L}{2} > I_L \quad (5.5)$$

Endüktans akımı üzerindeki tepeden tepeye değişim miktarı ΔI_L ile gösterilir.



Şekil 5.4 Yükseltici dönüştürücü temel dalga şekilleri

5.2 Eviriciler

Eviriciler bir DC kaynaktan aldıkları enerjiyi yük uçlarına AC gerilim olarak uygulayan güç elektroniği devreleridir. Bu devrelerden temel olarak, çıkış harmonikleri düşük seviyelerde olan istenilen genlik ve frekansta alternatif kaynak sağlaması beklenmektedir.

Eviricilerin girişindeki DC kaynak için, aküler, Güneş panelleri, Yakıt Pilleri benzeri DC kaynaklar ya da AC bir kaynaktan beslenen doğrultucuların çıkışları kullanılabilir. Eviricilerde çıkış gerilimlerinin sinüzoidal dalga şeklinde olması istenir. Düşük ve orta güçlü uygulamalarda kare dalgaya yakın çıkış şekilleri kabul edilebilirken, büyük güçlerde mümkün olduğu kadar harmoniklerinden arınmış bir sinüs dalga şekli gerekmektedir.

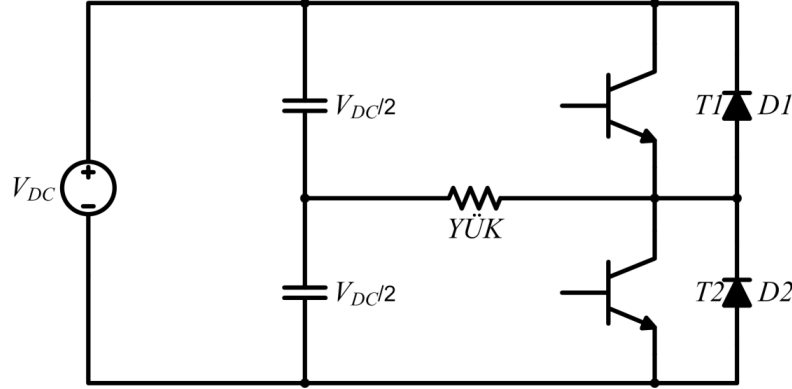
Eviriciler beslemede kullanılan kaynağın çeşidine göre gerilim kaynaklı eviriciler (Voltage

source inverters – VSI) ve akım kaynaklı eviriciler (Current source inverters – CSI) olmak üzere ikiye ayrılır. Simülasyon çalışmalarında evirici olarak gerilim kaynaklı evirici kullanılmıştır. Bu tür eviriciler genel olarak esnek AC iletim sistemlerinde (Flexible AC Transmission Systems – FACTS) kullanılır. Adından da anlaşıldığı üzere bu tür eviricilerde sistemi bir gerilim kaynağı besler.

5.2.1 Tek Fazlı Yarım Köprü Evirici

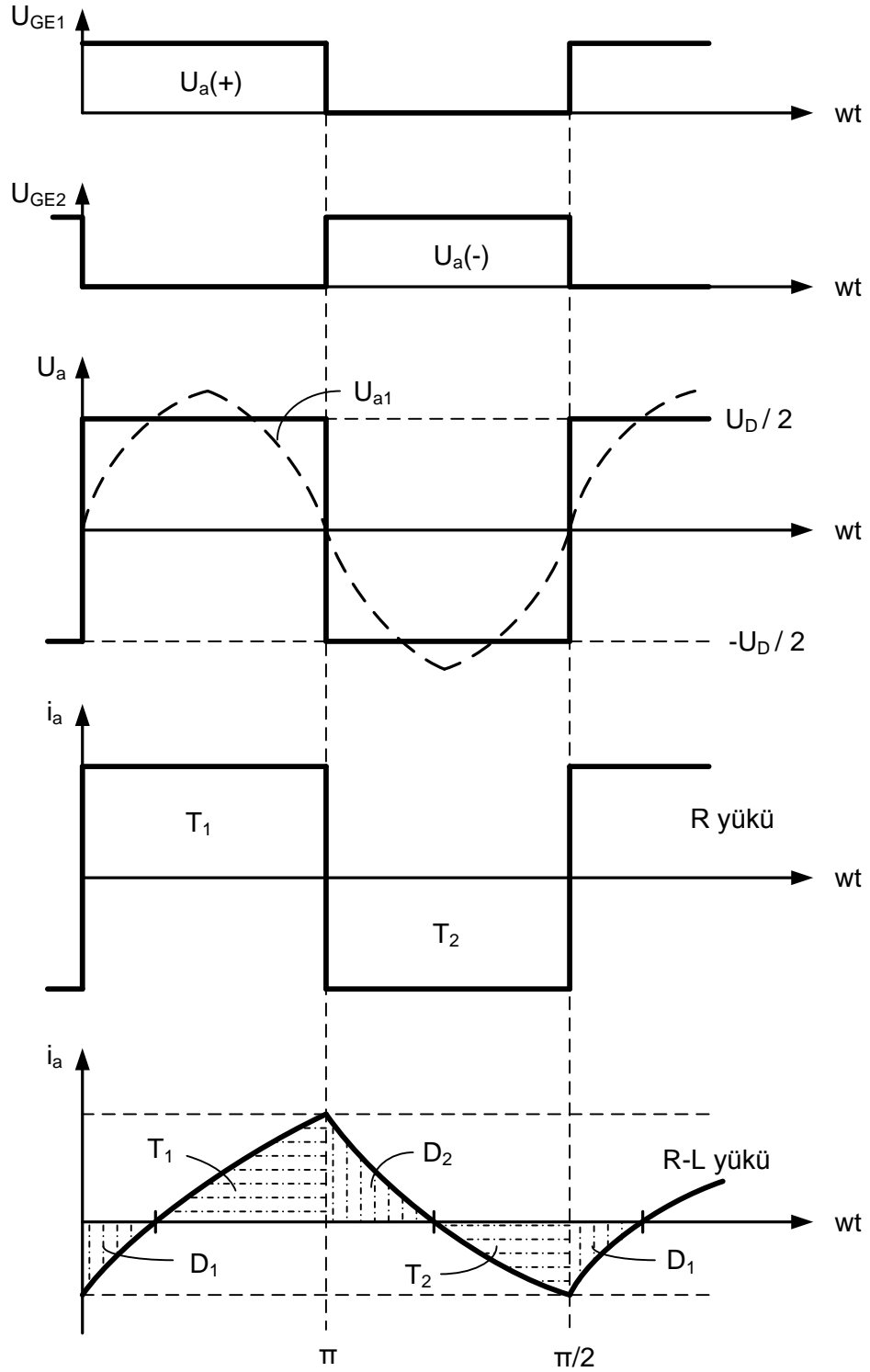
Tek fazlı yarım köprü topolojisi en basit evirici yapısıdır. Bu devrenin çıkışı iki seviyeli kare dalga şeklinde üretilir. Bu tip bir topolojide girişte kullanılması için orta uçlu bir gerilim kaynağına ihtiyaç duyulur. Orta ucu meydana getirmek için basit bir şekilde seri yerleştirilmiş iki kapasite ile DC kaynak beraber kullanılır. Şekil 5.5 tek fazlı gerilim kaynaklı yarım köprü evirici devre şemasını göstermektedir.

Bu tür bir eviricide Şekil 5.5'te de görüldüğü üzere yalnızca iki anahtarlama elemanına ihtiyaç duyulur. Bu iki anahtarlama elemanı mutlaka birbiriyle ters çalışmalı, birisi iletimdeyken diğeri mutlaka kesimde olmalıdır. Yani her iki anahtarın aynı anda kapatılmaması dikkat edilmesi gereken bir husustur. İki eleman da iletimde olur ise kaynak kısa devre olur ve evirici zarar görür (Sarıkurt, 2010).



Şekil 5.5 Yarım köprü evirici devre şeması

Şekil 5.6'da yarım köprü eviricinin temel dalga şekilleri gösterilmiştir. Devrede çıkış yani yük üzerinden geçen gerilim $T1$ anahtarı iletime geçirildiğinde $+V_{DC}/2$ olurken $T2$ anahtarı iletime geçirildiğinde ise $-V_{DC}/2$ değerinde olur.

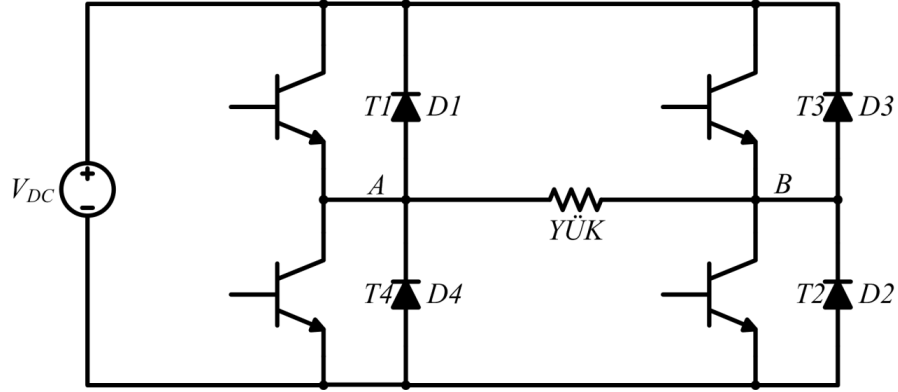


Şekil 5.6 Yarım köprü evirici temel dalga şekilleri

5.2.2 Tek Fazlı Tam Köprü Evirici

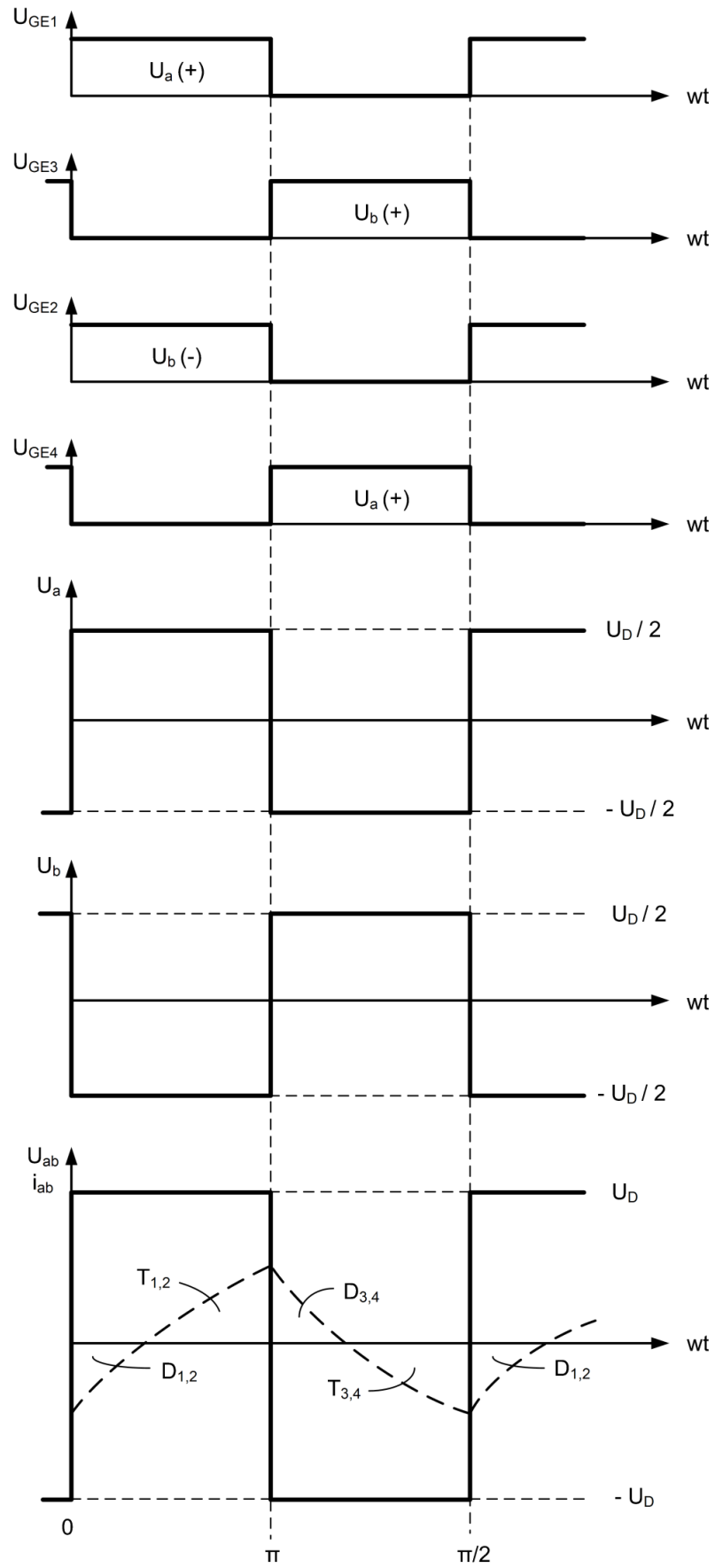
Tam köprü evirici topolojisi üç seviyeli çıkış gerilimi elde etmek için kullanılmaktadır. Yarım köprü evirici de iki seviyeli kare dalga şeklinde bir çıkış üretilirken, tam köprü eviricide çıkış

olarak üç seviyeli kare dalga şekli elde edilebilir. Bu eviricinin yapısı basit olarak yarım köprü eviriciye bir devre bacağı daha ilave edilmesi ve yükün bu bacaklar arasına yerleştirilmesiyle oluşturulur. Şekil 5.7 tek fazlı gerilim kaynaklı tam köprü evirici devre şemasını göstermektedir.



Şekil 5.7 Tam köprü evirici devre şeması

Tam köprü eviricilerde dört adet anahtarlama elemanı ve dört adet diyot bulunmaktadır. Yükseltici DC-DC dönüştürücüde de olduğu gibi bu eviricide de anahtarlama elemanı olarak farklı elemanlar kullanılabilirken simülasyon çalışmasında evirici için dört adet IGBT anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Burada yük üzerindeki gerilimi ifade eden V_{AB} 'yi elde etmek için anahtarların iletme geçerken ve kesime giderken çapraz çiftler halinde bu işlemleri yapmaları gerekmektedir. $T1$ ve $T2$ anahtarları iletimde iken, $T3$ ve $T4$ kesimde olur. Bu durumda A ile B noktaları arasındaki gerilim giriş gerilimine eşit olur ve $V_{AB} = V_{DC}$ olarak gösterilebilir. $T1$ ve $T2$ anahtarları kesimde iken, $T3$ ve $T4$ iletimde olur. Bu durumda A ile B noktaları arasındaki gerilim giriş geriliminin negatifine eşit olur ve $V_{AB} = -V_{DC}$ olarak gösterilebilir. Bu tür eviricilerin yapısında sıfır seviyesini elde etmek için $T1$ ve $T3$ anahtarları iletimde iken $T4$ ve $T2$ anahtarları kesime getirilir veya tam tersi olacak şekilde bir kombinasyon uygulanır. Şekil 5.8'de tam köprü eviricinin temel dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Tam köprü evirici temel dalga şekilleri

Tam köprü eviricilerde belirli çıkış seviyeleri için gereken anahtar pozisyonları 1 ve 0 olacak şekilde Çizelge 5.1’de görülmektedir.

Çizelge 5.1 Tam köprü eviriciye ait anahtarlama durumları

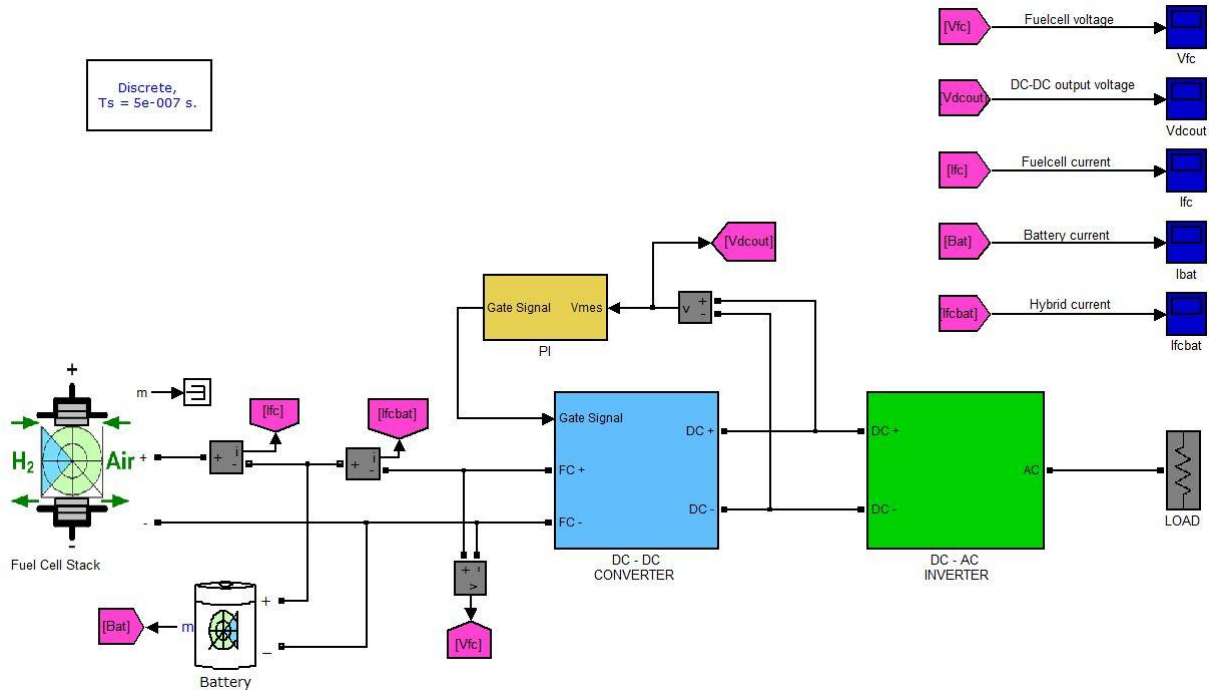
Yük üzerindeki gerilim	Anahtarların Durumları			
	T1	T2	T3	T4
V_{AB}				
$V_{DC}/2$	1	1	0	0
$-V_{DC}/2$	0	0	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	0	0	0	1
0	0	1	0	1

6. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

6.1 Simülasyon Modeli

Bu bölümde ele alınacak olan simülasyon çalışmaları, daha önceki bölümlerde açıklanan sistem modellerinin MATLAB, Simulink ve SimPowerSystems yazılımlarında oluşturularak yapılmıştır.

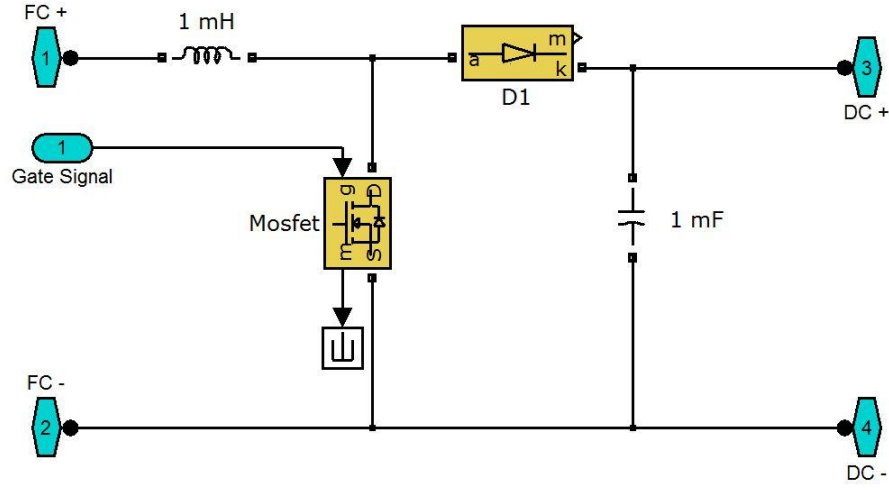
Yapılan sistemde 6 kW'lık bir PEMYP kullanarak bir ev yükü beslenecektir. Yük talebinin çok hızlı olarak değiştiği anlarda yük uçlarındaki gerilimin kararlı hale gelmesi belli bir zaman almaktadır. Bu nedenle YP ile birlikte anlık güç ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla kurşun asit batarya paralel bağlanarak sistemin daha kararlı bir hale gelmesi sağlanmıştır. YP ve batarya ile oluşturduğumuz hibrit sistemin düşük değerlerde olan çıkış geriliminin yükseltilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, elemanların çıkışına yükseltici tip bir DC-DC dönüştürücü bağlanmıştır. PI kontrol yapılarak çıkış gerilimi 400 V'a sabitlenmiştir. Evsel yüklerde YP'ni kullanabilmek için test sisteminde DC-DC dönüştürücünün çıkışına tam köprü evirici bağlanmıştır. Simülasyon modeli Şekil 6.1'de görülmektedir.



Şekil 6.1 Simülasyon modeli

Test sisteminde yükseltici tip DC-DC dönüştürücü modeli kullanılmıştır. Bu model içerisinde yarı iletken eleman olarak MOSFET tercih edilmiştir. PI kontrol tekniği ile MOSFET, belirli zaman aralıklarında iletime geçirilerek veya iletimden çıkartılarak modelin çıkışında,

girişindeki değerden daha yüksek seviyeli ve düzenlenmiş bir gerilim elde edilmesi amaçlanmıştır. Beşinci bölümde yükseltici tip DC-DC dönüştürücülerin temel çalışma şekilleri hakkında daha detaylı bilgi verilmiştir.

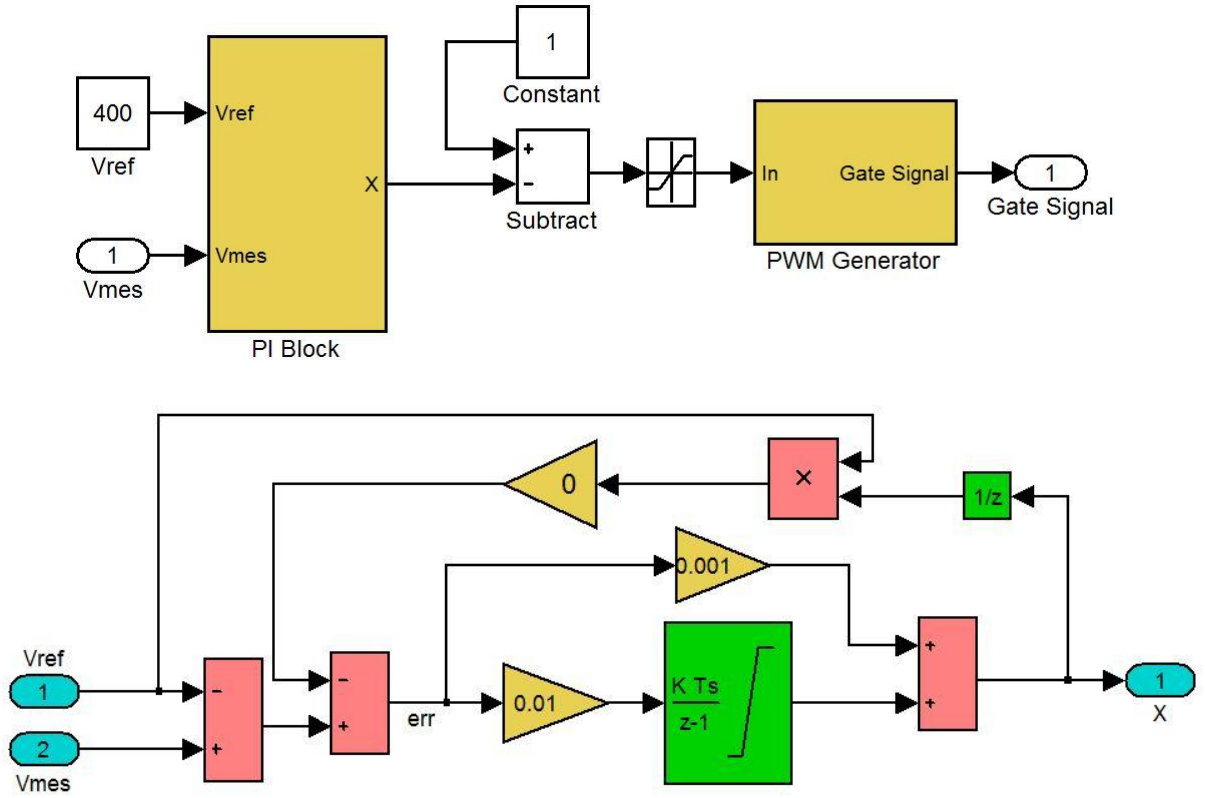


Şekil 6.2 DC-DC dönüştürücü modeli

Test sisteminde kullanılan yükseltici tip DC-DC dönüştürücünün parametrelerinin değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 DC-DC dönüştürücü parametre değerleri

Dönüştürücü endüktansı	1 [mH]
Dönüştürücü kapasitansı	1 [mF]
Yarı-iletken tipi	MOSFET
Ortalama anahtarlama frekansı	20000 [Hz]
PI gerilim kontrol sisteminin oransal kazancı	0.001
PI gerilim kontrol sisteminin integral kazancı	0.01
Referans gerilim	400 [V]



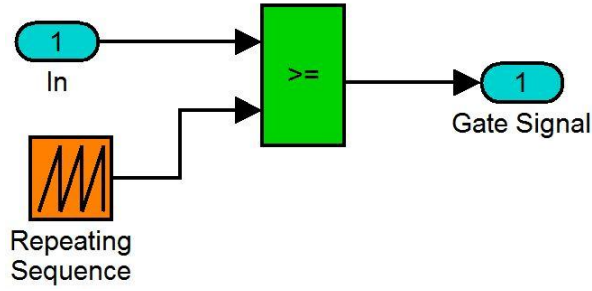
Şekil 6.3 PI kontrolör

PI kontrol yapılırken sistemin çıkışı bir giriş ile yönetilir. Burada amaç çıkışın girişi izlemesi yani çıkış ile giriş arasındaki farkın (hatanın) sıfır olmasıdır. Çıkış ile giriş arasındaki fark işlenerek kontrol sinyali elde edilir ve çıkışa verilir. Aynı zamanda bu işlem sürekli olarak yapılmaktadır.

PI kontrolör, sistemin mümkün olan en kısa zamanda istenen hataya ulaşılması için hata sinyali üstünde bir dizi hesap yapar. Bu hesaplar aşağıda verildiği gibi sıralanabilir.

- Hata sinyalinin K_p gibi bir kazanç ile çarpılması
- Hata sinyalinin integralinin K_i kazancı ile çarpılması
- Bulunan bu iki değerinin toplanması ve çıkışa verilmesi

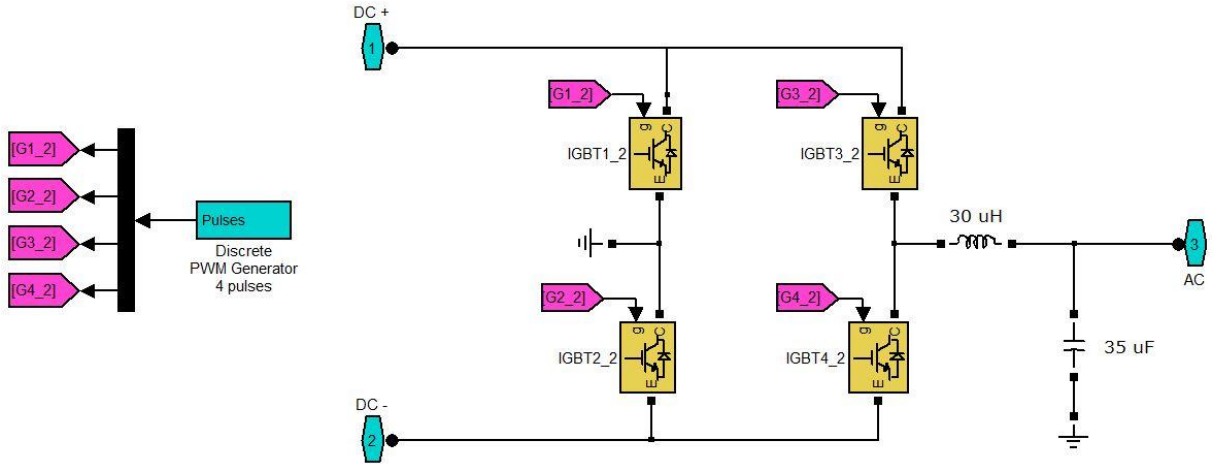
Bu kontrolörde K_i değeri 0,01 ve K_p değeri 0,001 olarak kullanılmıştır.



Şekil 6.4 PWM üretici

Darbe genişlik modülasyonu (PWM, Pulse Width Modulation), adından da anlaşılacağı üzere üretilecek olan darbelerin, genişliklerini kontrol ederek, çıkışta üretilmek istenen analog elektriksel değerin veya sinyalin elde edilmesi tekniğidir.

Üretilen kare dalga darbe sinyallerinin genişliklerinin ortalaması, çıkışta üretilecek olan analog değerin elde edilmesini sağlar.



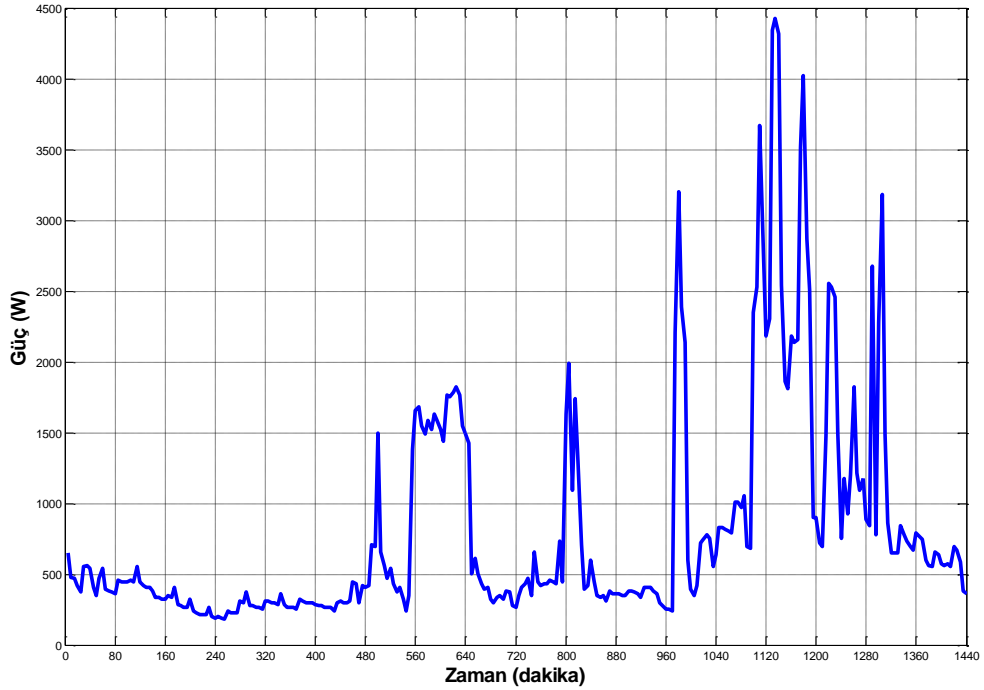
Şekil 6.5 Tam köprü evirici modeli

DC-DC dönüştürücünün çıkışında 400 V'a sabitlenmiş gerilimin ev yükünde kullanılabilmesi için AC gerilime çevrilmesi gerekmektedir. Bunu yapacak dönüştürücü olarak tam köprü evirici tercih edilmiştir. Bu tip eviricilerde dört adet anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Simülasyon çalışmalarında anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmıştır. Beşinci bölümde tam köprü eviricinin temel çalışma şekilleri hakkında daha detaylı bilgi verilmiştir. İnverter, Çizelge 6.2'de verilmiş olan parametrelere sahiptir. Bu eviriciler, 0,8 modülasyon indeksi ile 50 Hz frekansındaki tek-fazlı AC çıkış gerilimini üretmek üzere kontrol edilmektedirler.

Çizelge 6.2 Evirici modelinin parametreleri

Yarı-iletken tipi	IGBT
Bastırma direnci	$10^{-3}\Omega$
Taşıyıcı sinyal frekansı	20 [kHz]
Modülasyon indeksi	0,8
Çıkış gerilimi frekansı	50 [Hz]
Filtre endüktansı	30 [μ H]
Filtre kapasitansı	35 [μ F]

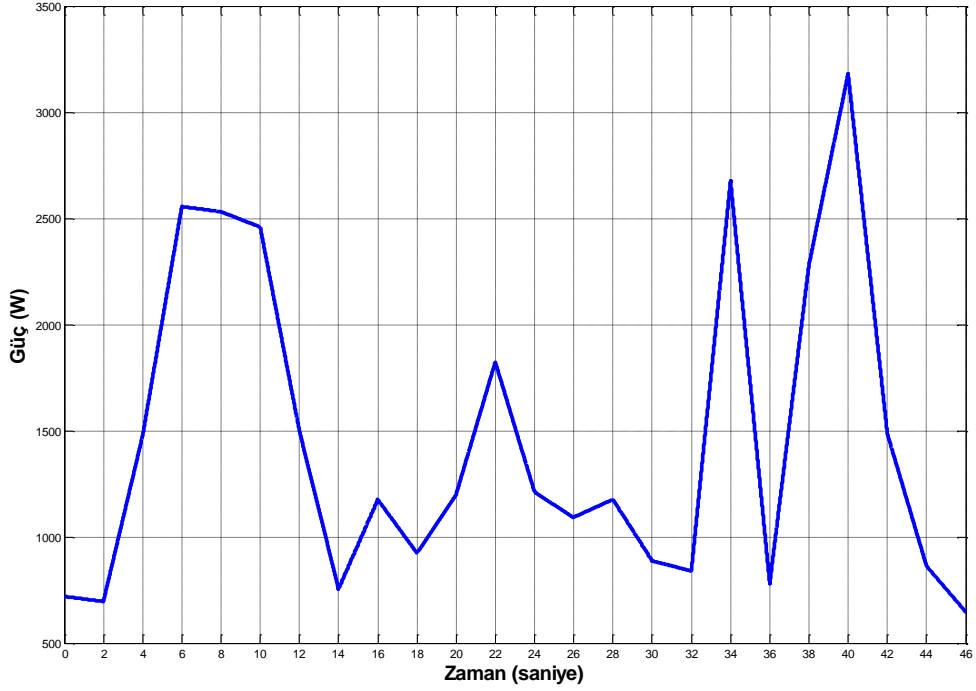
Yük profili oluşturulurken Galler ülkesinin Llanelli şehrindeki bir evin, 2003 yılı boyunca beşer dakika aralıklar ile ölçülen verileri kullanılmıştır. 108 m²'lik bu evde bir yetişkin ve beş çocuk yaşamaktadır. Yıllık veriler arasından Kasım ayının, ilk haftasının, pazartesi günü için alınan değerler kullanılmıştır (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Bir evin günlük yük talebi

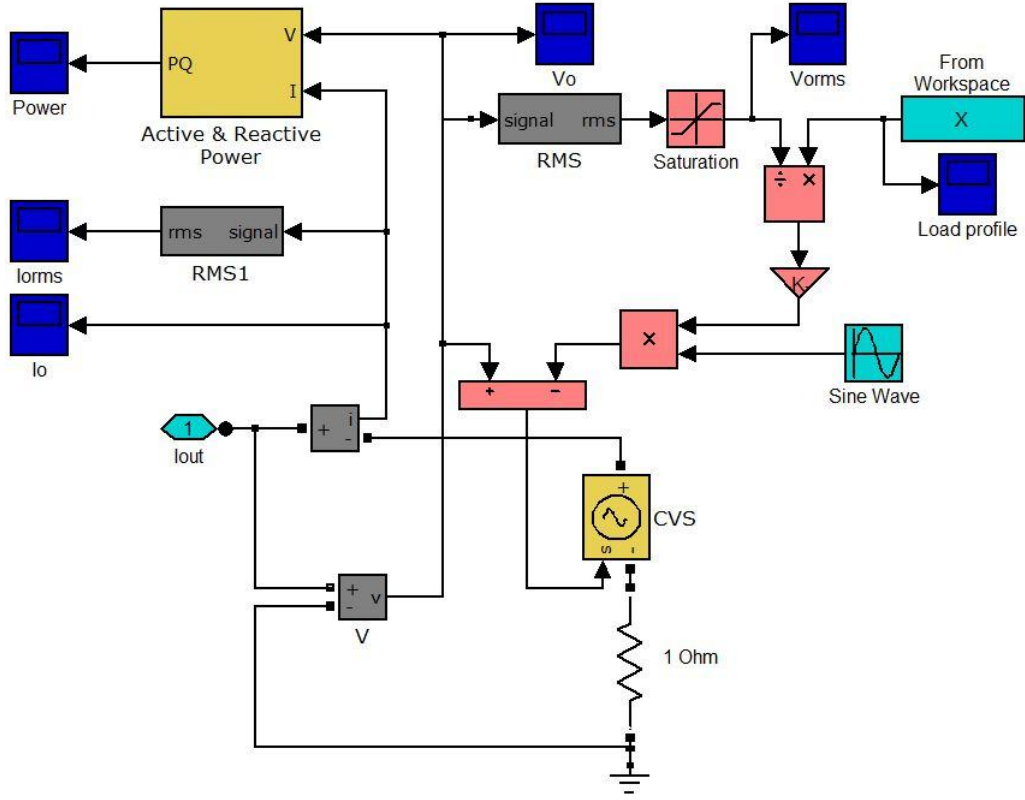
Simülasyonun çalışmasının uzunluğu ve sonuçların daha detaylı bir şekilde incelenebilmesi için bu yük talebinin en çok değişkenlik gösterdiği ve yük talebinin yüksek olduğu saatlerdeki çalışması incelenmiştir. Bu doğrultuda, yük talebi oluşturulurken 20:00 ile 22:00 saatleri

arasındaki değerler kullanılarak Şekil 6.7'deki yük talebi oluşturulmuştur. Kullanılan veriler beş dakikada bir alınmıŐtır. YP'nin kararlı hale geldikten sonra hep aynı Şekilde çalıŐmaya devam edecek olması, simülasyon süresinin çok uzun olması ve YP'nin iki saniye içerisinde kararlı hale oturacak dinamiklere sahip olması düşünüldüğünde simülasyonda yük talebi beş dakika yerine iki saniye olacak Şekilde deęiŐtirilmiŐtir. Böylece Şekil 6.7'deki 46 saniyelik yk talebimiz meydana gelmiştir.



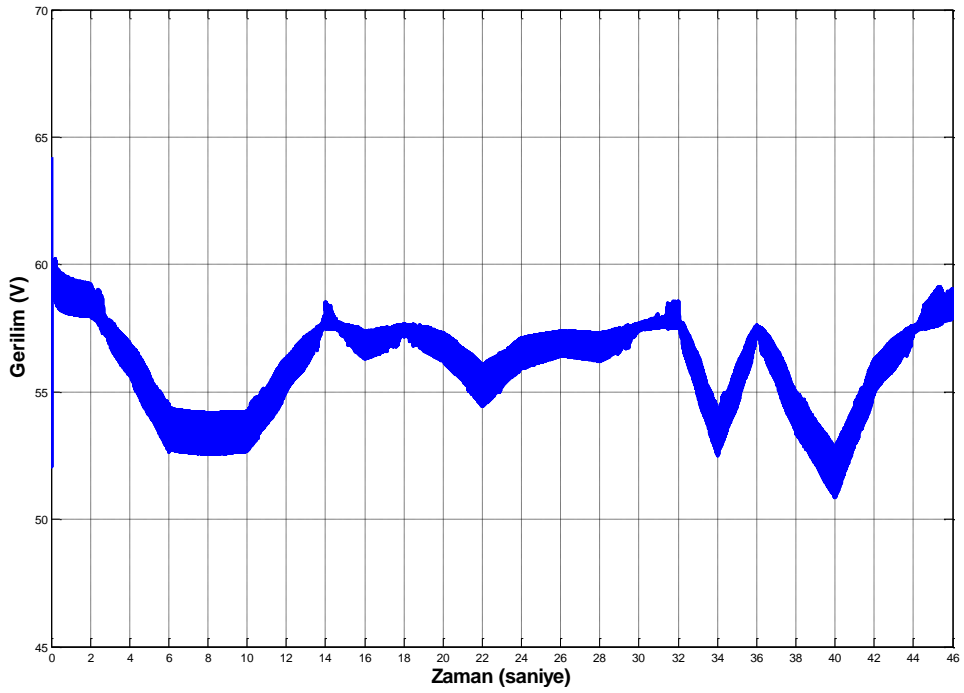
Şekil 6.7 Simülasyonda kullanılan yük talebi

Bu yük talebi, 1 Ω 'luk bir direncin üzerindeki gerilimin, bu dirence seri bağlı olan gerilim kaynağı ile deęiŐtirilerek geçen akımı, dolayısıyla da gücünü deęiŐtirme mantığıyla meydana getirilmiŐtir. Oluşturulan yük modeli Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



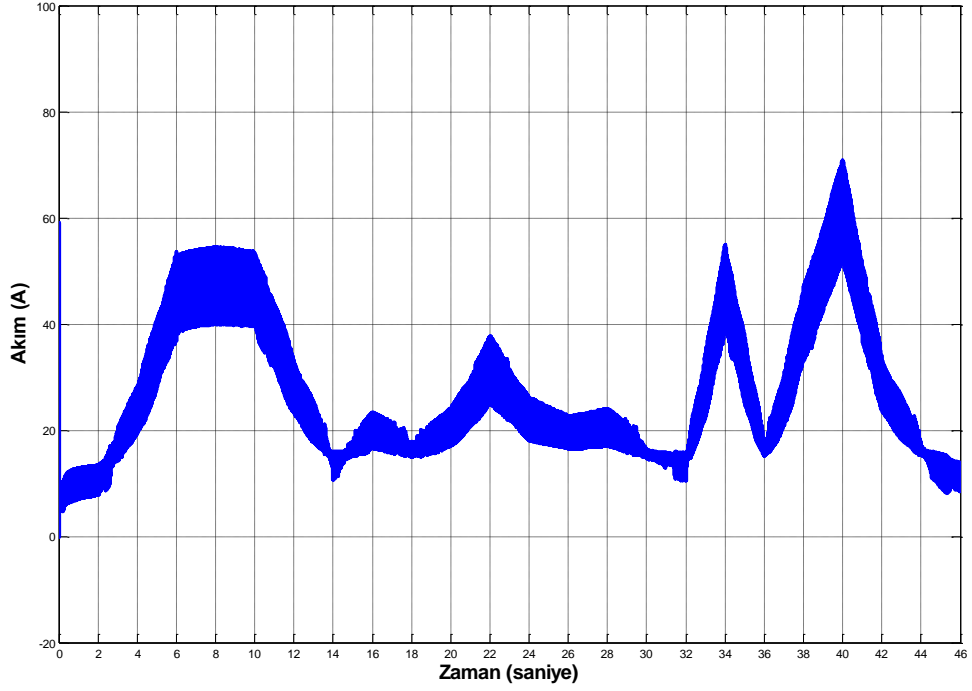
Şekil 6.8 Yük modeli

6.2 Simülasyon Sonuçları



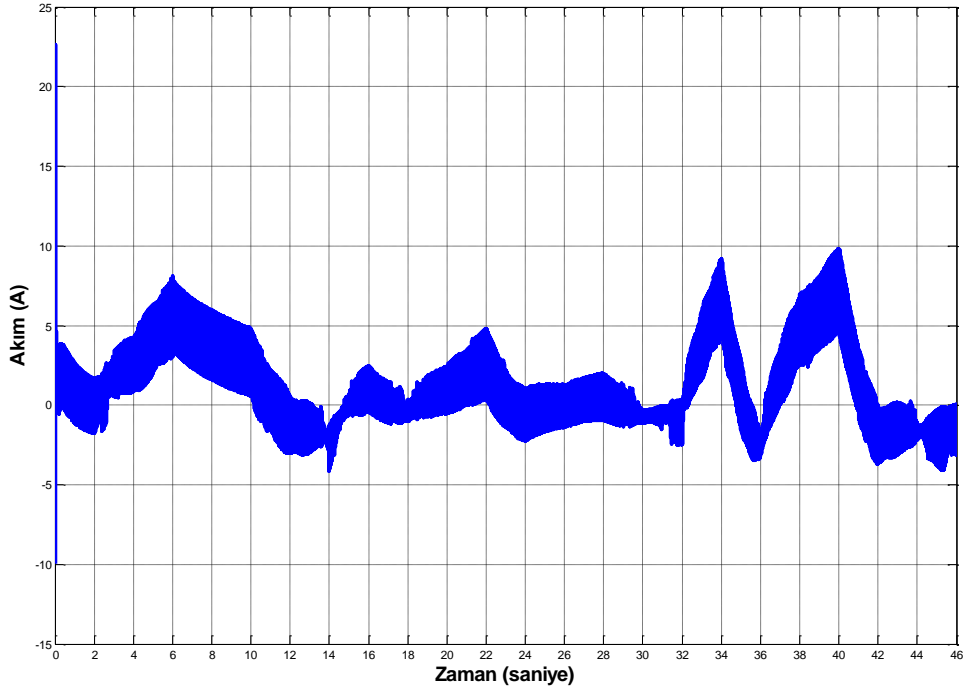
Şekil 6.9 Yakıt pili gerilimi

Şekil 6.7’de verilen yük profiline göre, 6.,22., 24. ve 40. saniyelerde yük artışı gözlemlenmektedir. 40. saniyedeki yük artışı ile sistem ürettiği maksimum güce ulaşmış bulunmaktadır. Sistem tarafından sağlanan güçteki değişim, YP karakteristiğine uygun olarak Şekil 6.9’da gözlenen etkilere neden olmaktadır. Şekil 6.9’dan da anlaşılacağı gibi YP’nin gerilimi, sistemin çıkış gücü arttıkça azalmaktadır. Güç ve gerilim arasında elde edilen bu ilişki de test sisteminin YP karakteristiklerine uygun olarak doğru ve güvenilir bir şekilde çalıştığını teyit etmektedir.



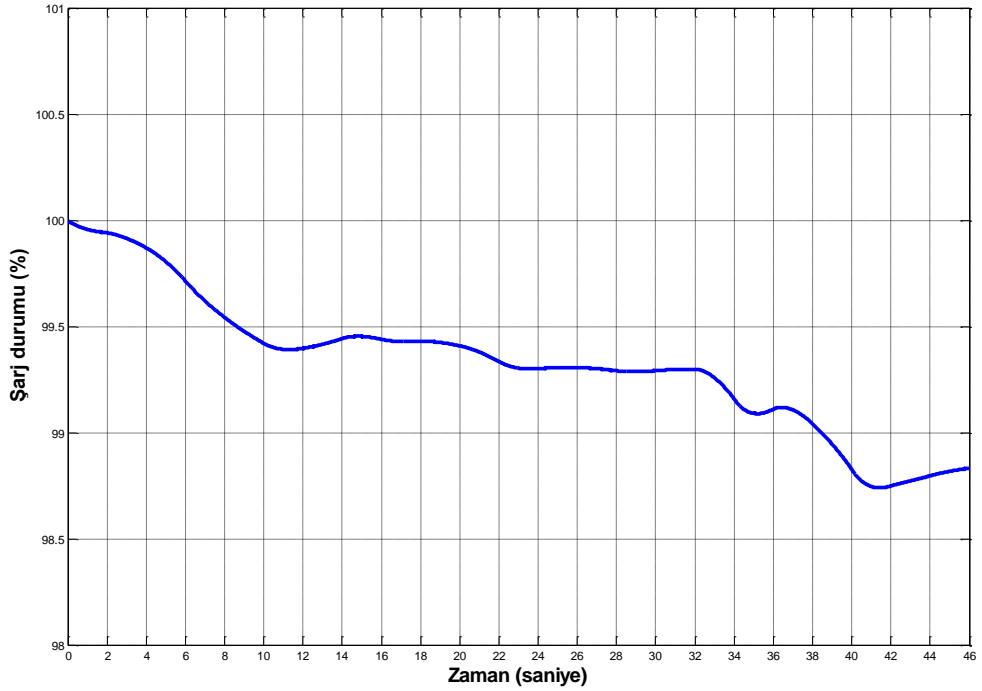
Şekil 6.10 Yakıt pili akımı

YP’nin geriliminin yük değişimlerine verdiği geçici cevap, Şekil 6.10’da verilen YP’nin sağladığı akıma göre değişmektedir.



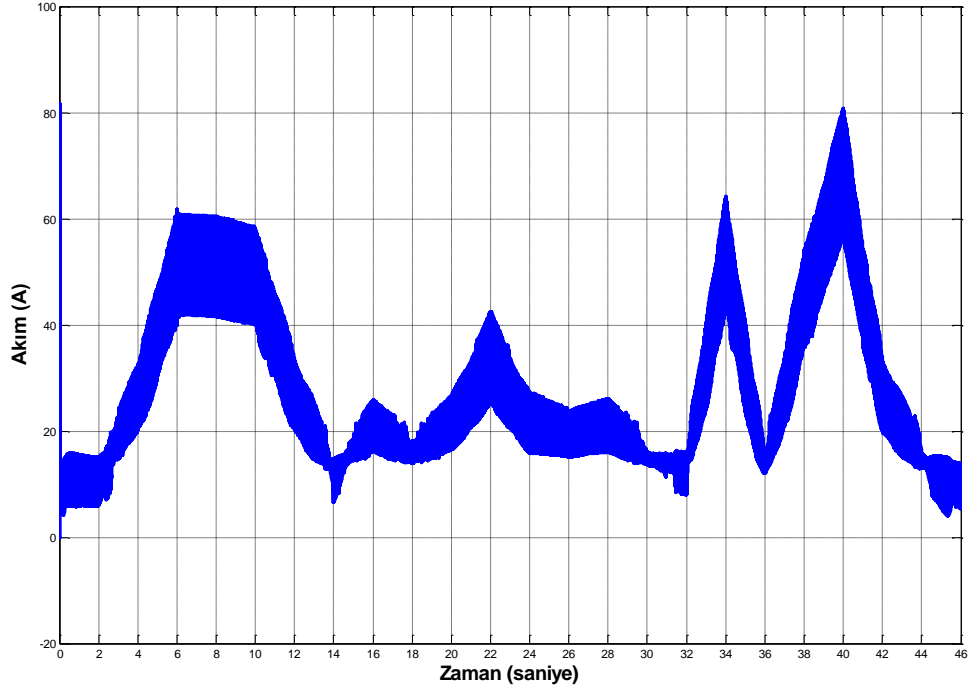
Şekil 6.11 Batarya akımı

Şekil 6.11’de bataryadan çekilen akımın değişimleri görülmektedir. Yük talebinin yüksek olduğu durumlarda batarya devreye girerek sistemin daha kararlı bir hal almasına yardımcı olmuştur. Yük talebinin düşük olduğu durumlarda ise akım negatif hal almıştır yani batarya şarj olmuştur.



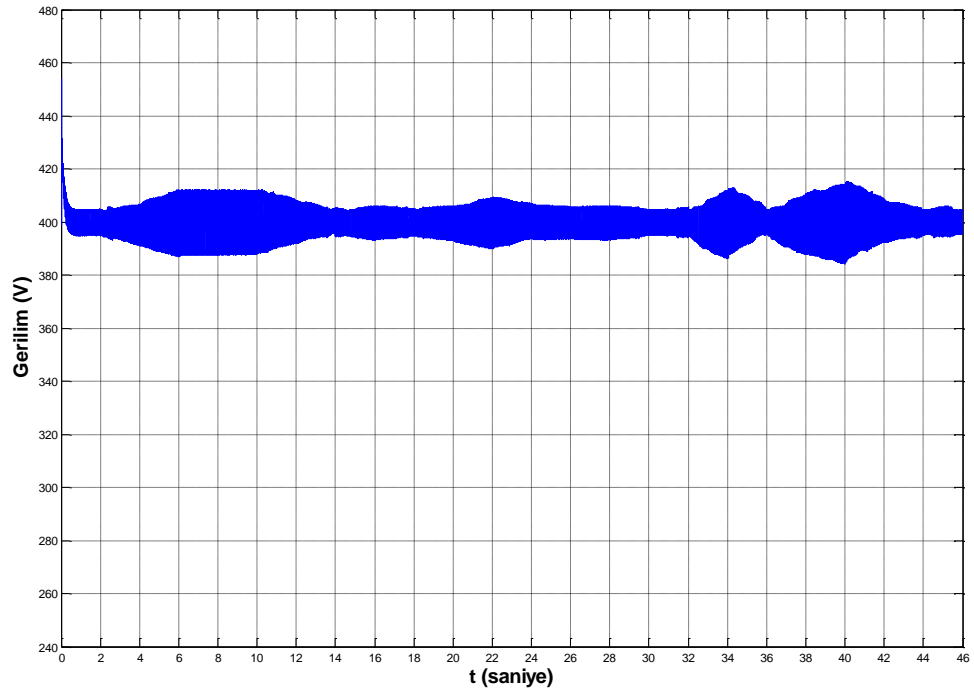
Şekil 6.12 Batarya şarj durumu

Şekil 6.12'deki bataryanın şarj durumunda meydana gelen değişimleri incelediğimizde yük talebinin düşük olduğu durumlarda bataryanın şarj olduğu, yüksek olduğu durumlarda ise deşarj olduğu görülmektedir.



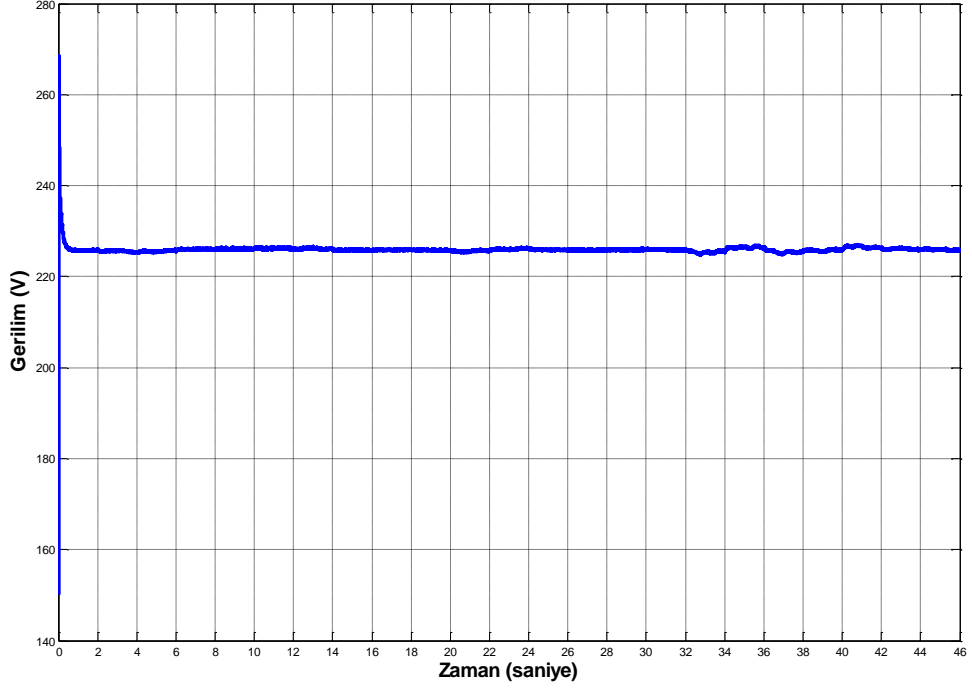
Şekil 6.13 DC-DC dönüştürücü giriş akımı

DC-DC dönüştürücünün girişinde YP ve batarya paralel bağlı olduğundan bu iki kaynağın akımlarının toplamı dönüştürücünün girişindeki akımı oluşturacaktır (Şekil 6.13).



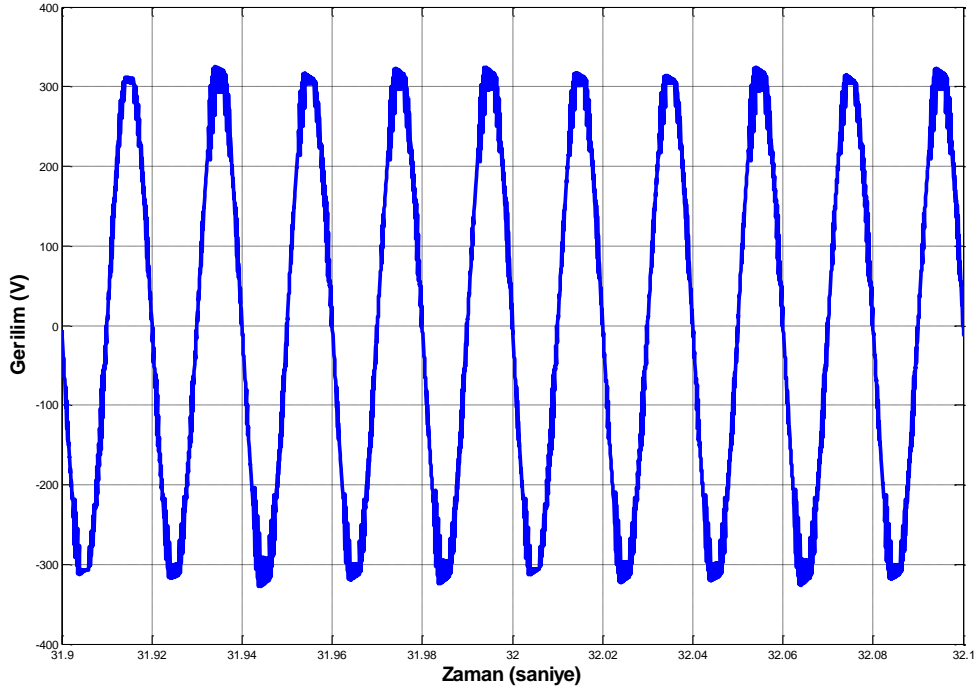
Şekil 6.14 DC-DC dönüştürücü çıkış gerilimi

DC-DC dönüştürücü, girişine uygulanan Şekil 6.9'daki YP gerilimini, PI kontrolör vasıtası ile Şekil 6.14'ten de görülebileceği gibi 400 V dolaylarında tutmaktadır. Dönüştürücünün çıkış geriliminde oluşan dalgalanma miktarının maksimum $\pm\%2,5$ civarında olması, bu gerilimin kullanılabilir sınırlar arasında olduğunu göstermektedir. Dalgalanma miktarının, yük talebi arttıkça artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



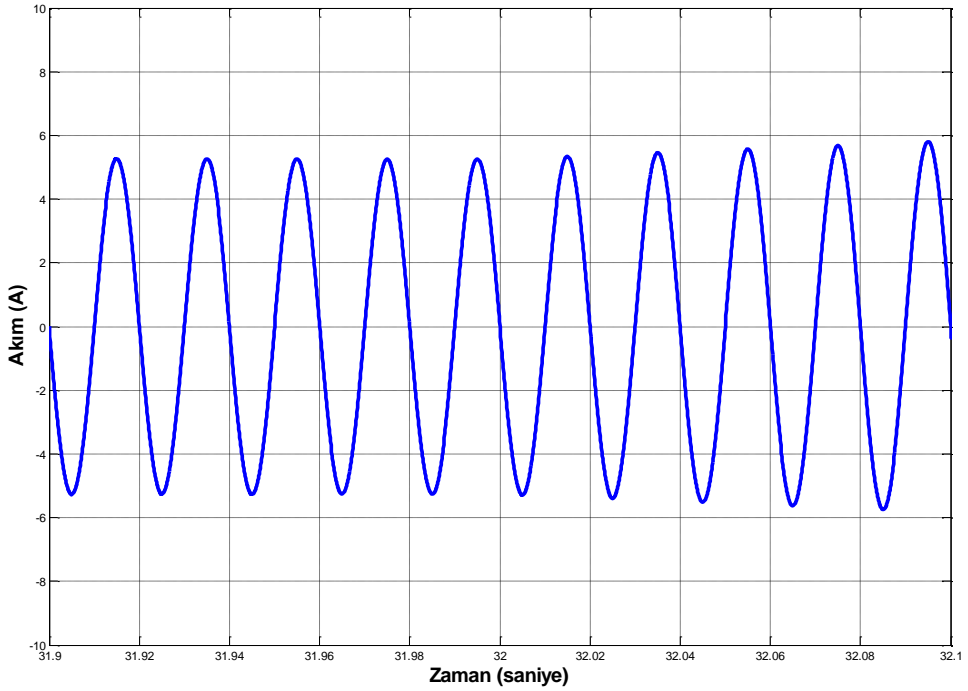
Şekil 6.15 Çıkış gerilimi

Şekil 6.15'te eviricinin çıkışındaki gerilimin ortalama değeri görülmektedir. Gerilimdeki $\pm\%0,0044$ lük değişim sistemin kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 6.16 Çıkış gerilimi dalga şekli

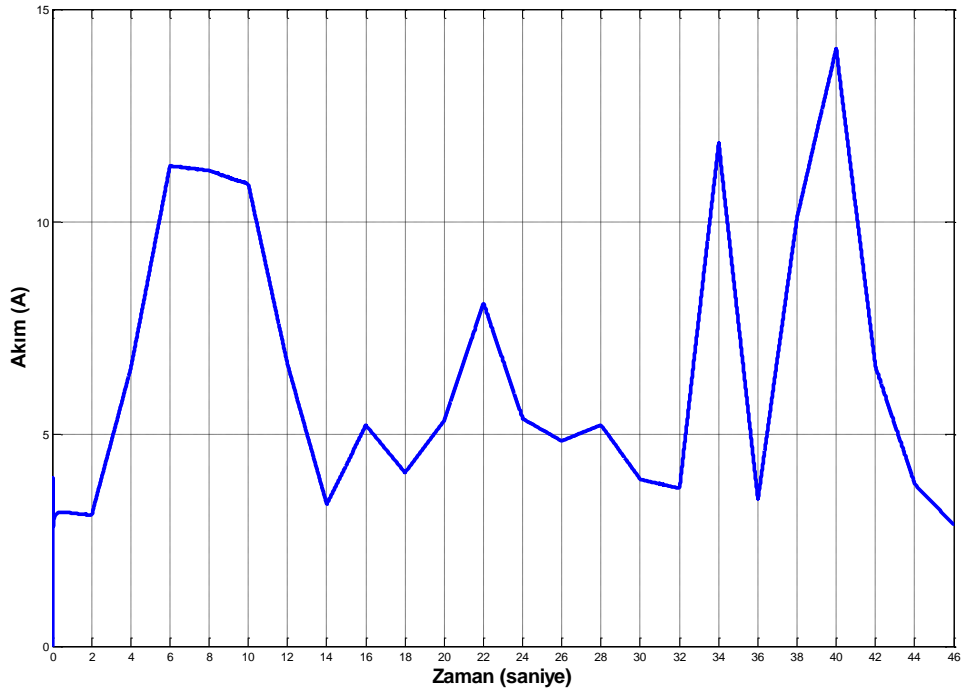
Şekil 6.16'da ise eviricinin çıkışındaki gerilimin sinüzoidal dalga şekli görülmektedir.



Şekil 6.17 Çıkış akımı dalga şekli

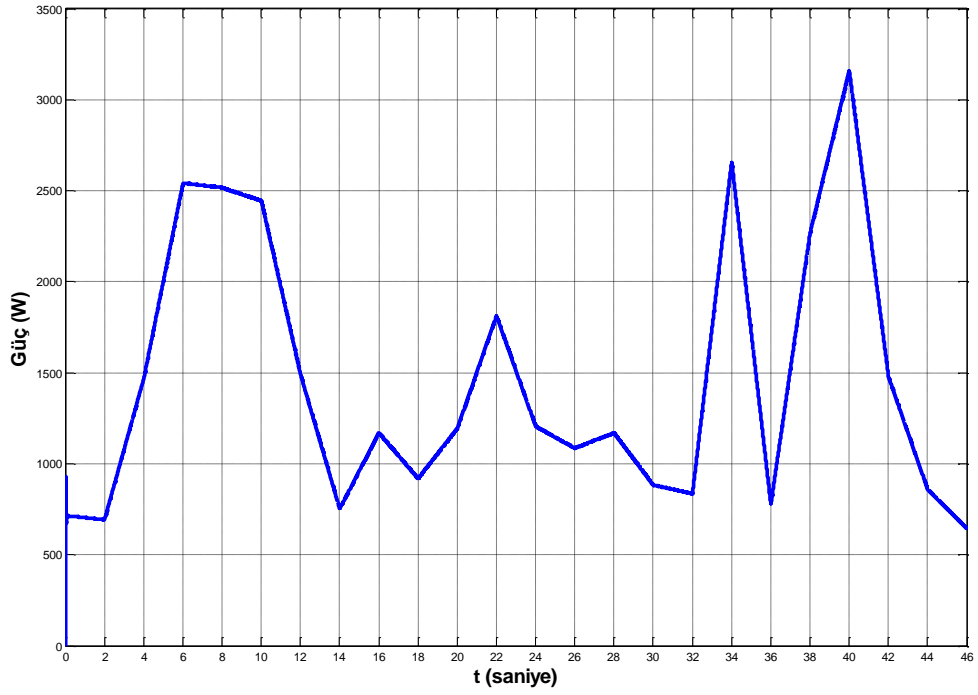
Yük talebine göre çıkış akımının dalga şekli ile bu akımın ortalama değerleri sırasıyla Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de verilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi talep edilen yük arttıkça akımda artmaktadır. Minimum yük talebi esnasında 2,87 A dolaylarında olan akım değerinin,

maksimum yük talebi esnasında 14,07 A'e kadar çıktığı gözlemlenmiştir.



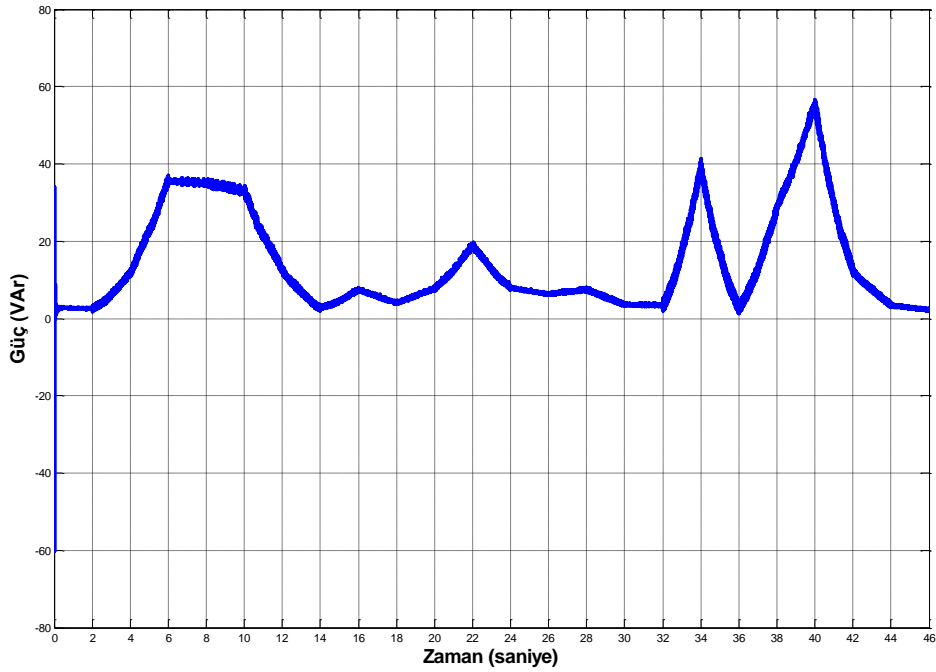
Şekil 6.18 Çıkış akımı ortalama değeri

Son olarak, Şekil 6.19'da sistem tarafından yük tarafına aktarılan aktif güç değişimleri verilmiştir. Anlık yük taleplerinden dolayı küçük farklılıklar oluşmuştur. Şekil 6.7'de de oluşturulan test sistemi tarafından karşılanması beklenen toplam yük talebi verilmiştir. Bu talepler karşılaştırıldığında oluşturulan sistem, yük talebindeki değişimlere karşı başarılı bir şekilde uyum göstererek yük talebini verimli bir şekilde takip edebilmiştir.



Şekil 6.19 Sistem tarafından yüke aktarılan aktif güç

Şekil 6.20’de ise sistemde meydana gelen reaktif güç değişimleri verilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi yük talebi arttıkça reaktif güç miktarı da artmaktadır.



Şekil 6.20 Sistemde oluşan reaktif güç

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Dünya nüfusundaki artış ve gelişen teknoloji enerji ihtiyacını giderek arttırmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı rezervleri ihtiyaç duyulan enerjiyi karşılayamaz hale gelmeden önce, çevreye zarar veren bu kaynakların yerinin doldurulması gerekmektedir. Özellikle konutlardaki yük talebinin artması ve bu artışın puant zaman aralıklarında şebekeyi zorlaması nedeniyle alternatif kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için gerekli alternatif enerji kaynakları, aynı zamanda olumsuz çevresel etkilere sebep olmamalıdır. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynakları birçok farklı alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Bu doğrultuda yapılan çalışmada Galler ülkesinin Llanelli şehrinde bir yetişkin ve beş çocuğun yaşadığı bir evin günlük güç talepleri baz alınarak bir yük modeli oluşturulmuştur. Bu modelde yük talebinin gün içinde en yüksek olduğu ve en çok değişikliği gösterdiği saatler olan 20:00 ile 22:00 arasındaki iki saatler veriler kullanılmıştır. Oluşturulan yük talebini karşılamak için YP ve batarya'nın çıkışına bir DC-DC dönüştürücü bağlanmıştır. DC-DC dönüştürücü YP ve bataryadan gelen düşük giriş gerilimini, çıkışında belli bir değere yükselterek eviriciyi beslemekte ve bu sayede evsel yükün alternatif gerilim ile beslenmesi sağlanmıştır. Simülasyon sonuçlarında ise oluşturulan modelin farklı noktalarındaki gerilim ve akım değerleri alınarak sistemin çalışması irdelenmiş ve performansı değerlendirilmiştir.

- Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda, YP'nin bir evin elektrik yükü ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede bir alternatif enerji kaynağı olduğu görülmektedir. Ancak yük talebinin çok hızlı olarak değiştiği anlarda yük uçlarındaki gerilimin kararlı hale gelmesi belli bir zaman almaktadır. Bu nedenle YP ile birlikte, anlık güç ihtiyacını karşılayabilecek batarya ile hibrit olarak kullanılması ile sistemin daha kararlı bir hale gelmesi sağlanmıştır.
- Uzak çalışmalar ve askeri alanlar, ulaşım ve taşıma, sabit güç sistemleri ve taşınabilir uygulamalar gibi uygulama alanları olan YP'nin teknolojisi geliştikçe kullanım alanları da artabilir. Evlerdeki yük talebinin anlık olarak çok fazla değişkenlik göstermemesi YP kullanımını için avantaj sağlamaktadır.
- Yakıt pillerinin evsel yüklerde kullanılmaya başlanmasıyla birlikte her bir evin şebekeden çekeceği akım da azalma gösterecektir. Bu yapının yaygınlaşması ve YP kullanımının artmasıyla, şebekeye olan bağımlılığın da ortadan kalkması söz konusu olmaktadır. Her bir kullanıcının şebekeden çektiği akım belli oranda azalacak ve böylelikle iletim ve dağıtım sisteminin kapasitesi de dolaylı olarak artırılmış olacaktır.

- Yakıt pillerinin ultra-kapasitörler ile birlikte son kullanıcı noktalarında kullanılması, reaktif güç kompanzasyonuna da katkı sağlayacaktır. Böylelikle şebekeden çekilecek reaktif güç miktarında azalma görülecektir. Bu da hatlardaki elektriksel kayıpların azalmasını sağlayacak ve hatların aktif güç taşıma kapasitesini artıracaktır.
- Günümüzde elektrik fiyatlarının artış göstermesi ve ilerleyen yıllarda da petrol bazlı yakıtların tükenmeye başlamasıyla birlikte bu artışın daha da ivme kazanacağı dikkate alındığı zaman, yakıt pillerinin kullanılması küresel ekonomiye ciddi anlamda fayda sağlayacaktır. Her bir kullanıcının enerji ihtiyacını karşılamak için yapması gereken harcama azalma gösterecektir.
- Petrol bazlı yakıtlar kullanarak enerji üretmenin çevreye verdiği bir takım zararlar vardır. Artan enerji ihtiyacı göz önüne alındığı zaman bu olumsuz etkinin daha da artması beklenmektedir. Ancak yakıt pilleri gibi temiz ve güvenilir alternatif enerji kaynaklarının kullanılmasıyla birlikte bu etkinin de azalma göstereceği bir gerçektir.
- Evlerde yaşayan birey sayılarının, kullandıkları cihazların ve kullanma periyotlarının her bir ev için farklılık göstermesi nedeniyle şebekeden çekilen yük miktarı da farklılık göstermektedir. Bu durum yakıt pilleri için bir dezavantajdır. Çünkü yakıt pillerinin ömürleri yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı değişkenlik göstermektedir. Özellikle aşırı ve ani yüklenme durumları yakıt pillerinin ömürlerini ve performansını azaltmaktadır.
- Yakıt pillerinin günümüzdeki yatırım ve kurulum maliyetleri oldukça yüksektir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan YP 15.000 USD'dan daha yüksek bir ücrete sahiptir. Bu nedenle evsel yüklerde kullanılması henüz tam olarak yaygınlaşmamıştır. Yapılan yatırımların yakıt pillerinin de ömürleri dikkate alındığında ekonomik olmadığı bir gerçektir. Ancak gelişen teknoloji ve artan enerji talebi doğrultusunda yakıt pillerinin maliyetlerinin ilerleyen yıllarda azalması beklenmektedir. Bu durum gerçekleştiği takdirde yakıt pilleri tam anlamıyla verimli olarak kullanılmaya başlanacaktır.

Yapılan bu tez çalışmasında YP'nin, bir evin elektrik ihtiyacını yüksek oranda karşılayabildiği anlaşılmaktadır. Ancak yükün ani olarak değiştiği durumlarda YP yetersiz kalmakta ve hızlı bir şekilde bu güç ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu nedenle ani yük değişimlerine hızlı cevap verebilen elemanlar ile kullanılarak sistemin performansının artması sağlanmıştır.

Yakıt pillerinin evlerde kullanılması ile birlikte şebekeye olan bağımlılık azalacak ve ekonomiye de katkı sağlanacaktır. Ancak YP, maliyeti yüksek bir eleman olduğu için evsel yüklerde kullanılması günümüzde yaygınlaşmamıştır. Bu nedenle ileriye dönük bir ekonomik analizin yapılmasının gerekli ve faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yüksek teknolojiye sahip olan YP'nin evlerde kullanılmaya başlanabilmesi için, bu alandaki teknik desteğin yeterli olması gerekmektedir. Olası bir arıza durumunda sisteme müdahale edebilecek, arızayı giderebilecek veya bakım yapabilecek nitelikte teknik ekibin yetersiz olduğu da bir gerçektir.

KAYNAKLAR

Bedir, F. ve Alınak, M.O., (2004), “Yakıt Hücre Sistemlerinin Çalışma Prensipleri ve Denizaltı Sistemlerdeki Tasarımı”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3:31-37.

Bıyıköğlü, A., (2003), “Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu”, G.U. Journal of Science, 16(3):523-542.

Bodur,H., (2010), Güç Elektroniği, Birsen Yayınevi, İstanbul

Boynueğri, A.R., (2010), “Rüzgar Türbinlerinden Kaynaklanan Gerilim Dalgalanmalarının SVC Kullanılarak Azaltılması”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Çelik, Y., (2007), “Yakıt Pilleri Uygulamaları için Düşük Maliyetli ve Yüksek Verimli DC-DC Dönüştürücü Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F., (2003), “Türkiye Enerji Profili ve Hidrojen”, 2. Ulusal Hidrojen Kongresi, 9 Temmuz 2003, Ankara.

Doğan, İ.M., (2008), “Güneşin Yakıt Pillerinde Enerji Kaynağı Olarak Kullanılması”, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Erdinç, O., (2008), “Dalgacık Dönüşümü/Bulanık Mantık Tabanlı Enerji Yönetim Stratejisi Kullanılarak Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitörlü Hibrit Taşıt Sisteminin Modellenmesi ve Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Jiang, W. ve Fahimi, B., (2010), “Active Current Sharing and Source Management Fuel Cell–Battery Hybrid Power System”, IEEE Transactions on Industry Applications, 57:752-761.

Jin, K., Ruan, X., Yang, M. ve Xu,M., (2009), “A Hybrid Fuel Cell Power System”, IEEE Transactions on Industry Applications, 56:1212-1222.

Kekezoğlu, B., (2007), “Şebekeden Bağımsız Çalışan Hibrit Enerji Sistemlerinde Risk Değerlendirmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kılıçoğlu, A.E., (2008), “PEM Yakıt Pilinin Deneysel Olarak İncelenmesi ve Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

Knight, I. ve Kreutzer, N., (2006), "Three European Domestic Electrical Consumption Profiles", Welsh School of Architecture, Cardiff.

Mert, M.E., (2005), "Nikel Kaplı Gümüş, Bakır Ve Çinko Elektrotlarda Bazik Ortamda Hidrojen Eldesi", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Mohan,N., Udeland,T., ve Robbins, W., (1995), Power Electronics: Converters, Applications and Design, 2nd ed. New York: Wiley.

Noyan, Ö.F., (2003), "Hidrojenin Özellikleri", 2. Ulusal Hidrojen Kongresi, 9 Temmuz 2003, Ankara.

Oğuz, A.E., (2006), "Hidrojen Yakıt Pilleri ve PEM Yakıt Pili Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Onar, Ö.Ç., (2006), "Rüzgar Türbini/Yakıt Hücresi/Ultra-Kapasitör Hibrid Güç Üretim Sisteminin Dinamik Modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özkan, G., (2007), "Yakıt Pilleri Uygulamaları için Dijital Kontrollü D.A.-D.A. Dönüştürücü Devre Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Sarıkurt, T., (2010), "Yenilenebilir Enerji Sistemleri İçin Çok Katlı Evirici Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.

Sarıtaş, F., (2004), "Hidrojenin Alternatif Enerji Kaynağı Olarak Gelecekteki Önemi, Uygulama Alanları ve Yakıt Hücrelerindeki Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Tanrioven, M. ve Alam, M.S., (2006), "Modeling, Control, and Power Quality Evaluation of a PEM Fuel Cell-Based Power Supply System for Residential Use", IEEE Transactions on Industry Applications, 42:1582-1589.

Türe, İ.E., (2003), "Güneş Enerjisi ile Hidrojen Üretimi", 2. Ulusal Hidrojen Kongresi, 9 Temmuz 2003, Ankara.

Ural, Z. ve Gençoğlu, M.T., (2009), "Konutsal Uygulama İçin Bir Yakıt Pili Sisteminin Tasarımı", Kaynak Elektrik, 246:98-103.

Veziroğlu, T.N., (2003), “Hidrojen Enerji Sistemi, Türkiye ve Dünya”, 2. Ulusal Hidrojen Kongresi, 9 Temmuz 2003, Ankara.

Vural, B., (2010), “Elektrikli Taşıtlarda Enerji Yönetim Stratejisinin, Gç Dnştrclerinin ve Bağlantı Topolojilerinin Performans ve Verimlilik zerine Etkisi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Wang, J., Peng, F.Z., Anderson, J. ve Buffenbarger, R., (2004), “Low Cost Fuel Cell Converter System for Residential Power Generation”, IEEE Transactions on Industry Applications, 19:1315-1322.

Yıldızbilir, F., (2006), “Yakıt Pili İle Elektrik Enerjisi retimi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

İnternet Kaynakları

[1] Wikipedia, 2010, <http://www.wikipedia.org/>.

[2] American History, 2010, <http://americanhistory.si.edu/>.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 13.03.1987

Doğum yeri Fatih - İstanbul

Lise 1997-2004 Nişantaşı Anadolu Lisesi

Lisans 2004-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2008-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Makineleri ve
Güç Elektroniği Programı

Çalıştığı Kurum

2010-Devam Ediyor. YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi