T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMAK İÇİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMASINA YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM

MOHAMED FOUZİ MOHAMED BEN OUN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. AYBABA HANÇERLİOĞULLARI

OCAK - 2021
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Mohamed Fouzi Mohamed BEN OUN tarafından hazırlanan " **Yakıt Pili Sistemlerinde Güç Verimliliğini Artırmak İçin Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmasına Yönelik Yeni Bir Yaklaşım**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **08.01.2021** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Seçil KARATAY Kastamonu Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Javad RAHEBİ İstanbul Ayvansaray Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. İzzet ŞENER .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Mohamed Fouzi Mohamed BEN OUN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ VERİMLİLİĞİNİ ARTIRMAK İÇİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİP ALGORİTMASINA YÖNELİK YENİ BİR YAKLAŞIM

MOHAMED FOUZİ MOHAMED BEN OUN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF. DR. AYBABA HANÇERLİOĞULLARI

Geleneksel elektrik üretim sistemlerinde, yakıttaki enerjiyi elektriğe dönüştürmek için ilk olarak yanma reaksiyonları kullanılır. Bu çalışmada, yakıt hücresi kontrolü ve yakıt hücresinin kontrolü için yeni bir algoritma yaklaşımı incelenmiştir. Yanma reaksiyonunun verimli bir şekilde gerçekleşmesi için yakıt ve oksitleyici iyice karıştırılmalıdır. Bundan sonra, elektrik enerjisi üretilinceye kadar bir dizi ara işlem gereklidir. Her bir ara işlem enerji kaybına neden olur, dolayısıyla verimlilik düşer. Bir yakıt pilinde, yakıtın enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek mümkündür. Yakıt ve oksitleyici farklı bölmelerde bulunur ve geleneksel üretim sistemlerinden farklı olarak birbirine karışmaz. Birleşmeleri ancak bu bölmeler arasında iyon ve elektron transferiyle gerçekleşebilir. Yakıt pili, yakıtın enerjisini doğrudan elektrik enerjisine, elektrokimyasal reaksiyon yoluyla dönüştürür. Harici yakıt (anot tarafı) ve oksitleyici (katot tarafı) ile elektrik üretir. Bunlar bir elektrolit / elektrot ünitesinde reaksiyona girer. Genelde, reaksiyon ürünleri hücreyi terk ederken, reaksiyona girecek olanlar hücre içine girer. Yakıt pilleri, gerekli yakıt ve oksitleyici akışı sağlandığı sürece süresiz olarak çalışabilir. Bu tezde, enerji üretimi için, Fotovoltaik ve yakıt pilinden oluşan hibrit modeli kullanılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Yakıt Pili, Simülasyon, Akış Hızı,Güç Verimliği,

Ocak 2021, 39 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

A NEW APPROACH FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM TO INCREASE THE POWER EFFICIENCY IN FUEL CELL SYSTEM

MOHAMED FOUZİ MOHAMED BEN OUN

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR:PROF. DR. AYBABA HANÇERLİOĞULLARI

Conventional electricity generation systems first use the combustion reaction to convert the energy in the fuel into electricity. In this study, a new algorithm approach for fuel cell control and fuel cell control is investigated. For the combustion reaction to take place efficiently, the fuel and the oxidizer must be thoroughly mixed. After that, a series of intermediate processes are required until electrical energy is generated. Each intermediate process causes energy loss, thus decreasing efficiency. In a fuel cell, it is possible to convert the energy of the fuel directly into electrical energy. The fuel and the oxidizer are located in different compartments and do not mix unlike conventional production systems. Their union can only occur by ion and electron transfer between these compartments. The fuel cell converts the energy of the fuel directly into electrical energy through an electrochemical reaction. It generates electricity with external fuel (anode side) and oxidizer (cathode side). These react in an electrolyte / electrode unit. Generally, reaction products leave the cell while those who will react enter the cell. Fuel cells can operate indefinitely as long as the required flow of fuel and oxidizer is provided. In this thesis the hybrid model that consist of Photovoltaic and fuel cell are used to generating the energy.

KEYWORDS: Fuel Cell, Simulation, Flow Rate,Power Efficiency

January 2021, 39 Page

TEŞEKKÜR

Bu bölümde, tezi hazırlayan tarafından vurgulanmak istenen çalışma ile ilgili ek bilgilerden, çalışmayı kısıtlayıcı ve / veya olumlu etkenlerden söz edilir. Bu bölüm bir sayfayı geçmemelidir. Gerekiyorsa bu bölümün son kısmında, tez çalışmasında ve tezin hazırlanmasında doğrudan katkısı bulunan kişilerle, doğrudan ilgili olmadığı halde olağan görevi dışında katkıda bulunmuş kişi ve kuruluşlara teşekkür edilmelidir. Teşekkür edilen kişilerin varsa unvanı, adı soyadı, parantez içinde görevli olduğu kuruluş ve çalışmaya olan katkısı kısa ve öz biçimde belirtilmelidir. Tez çalışması bir proje kapsamında gerçekleştirilmişse, projenin adı ve numarası ile ilgili kuruluşun adı da bu bölümde belirtilmelidir.

Mohamed Fouzi Mohamed BEN OUN

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **ix**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **x**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Yakıt Pili 1
1.2 PEM Yakıt Pilinin Çalışması 2
2. YAKIT HÜCRESİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEM MODELLEMESİ **6**
2.1 Yakıt Pili Modellemesi 6
2.2 Yakıt Pilinin Modellenmesi 9
2.2.1 Dönüştürücü Dinamikleri 9
2.2.2 Bir Yakıt Hücresi Yığınının Gerilim-Akım Polarizasyon Eğrisi 10
3. YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİNİN FİZİĞİ **18**
3.1 Yakıt Hücreleri 18
3.1.1 Harekete Geçirme 18
3.1.2 Cihaz Mimarileri 19
3.2 Açıklama 21
3.2.1 Basitleştirilmiş Model 21
3.2.2 Detaylı Model 23
4. SİMÜLASYONUN SONUÇLARI **29**
5. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR **34**
KAYNAKLAR **36**
ÖZGEÇMİŞ **39**

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Yakıt pilinin genel gösterimi 1
Şekil 1.2 PEM Yakıt Pilinin Çalışması....3
Şekil 1.3 ORR reaksiyon mekanizması 4
Şekil 1.4 ER ve LH mekanizmaları şeması 5
Şekil 2.1 Temel yakıt hücresi çalışması....7
Şekil 2.2 Yakıt hücresi sisteminin konfigürasyonu 9
Şekil 2.3 Yakıt pili sisteminin ayrıntılı blok diyagramı 9
Şekil 2.4 Dönüştürücü dinamik modeli 10
Şekil 2.5 Tekli yakıt hücresinin V-I polarizasyon eğrisi 11
Şekil 2.6 V-I polarisyonu için Simulink modeli....12
Şekil 2.7 Farklı katot basınçlarında (pca) voltaj-akım polarizasyon eğrileri....13
Şekil 2.8 Yakıt pili ve akünün deşarj eğrisi....14
Şekil 3.1 Farklı depolama mekanizmaları için enerji yoğunlukları- yatay eksenin log ölçeğinde gösterildiğine dikkat ediniz....19
Şekil 3.2 (a) fotoaktif bileşenin elektrolit içine daldırıldığı entegre bir fotoelektrokimyasal hücre (PEC) cihaz mimarisini ve (b) bağımsız olarak tasarlanmış bir elektrokimyasal hücreyi çalıştıran bağımsız olarak tasarlanmış bir fotovoltaik cihazla ayrışmış bir PV-EC cihaz mimarisini gösteren şematik 20
Şekil 3.3 Yakıt pilinin basitleştirilmiş modeli 22
Şekil 3.4 Yakıt pili voltaj bölgeleri....22
Şekil 3.5 Yakıt pilinin eşdeğer devresi 24
Şekil 3.6 Testlerdeki yığın tepkisi 28
Şekil 4.1 Simülsyon modeli....29
Şekil 4.2 Simülasyon sonuçları....29
Şekil 4.3 Gerilim vs. zaman....30
Şekil 4.4 Yakıt akış hızı....30
Şekil 4.5 Gerilim akım sonucu 31
Şekil 4.6 Giriş ve çıkış voltajı....31
Şekil 4.7 Fotovoltaik sistem özellikleri 32
Şekil 4.8 MPPT sonuçları....32
Şekil 4.9 Yakıt hücresi karakterizasyonu 33

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1 Ara reaksiyonlar 4

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

O **:** Oksijen
H **:** Hidrojen
P **:** Güç(watt)
Mw **:** Megawatt

Kısaltmalar

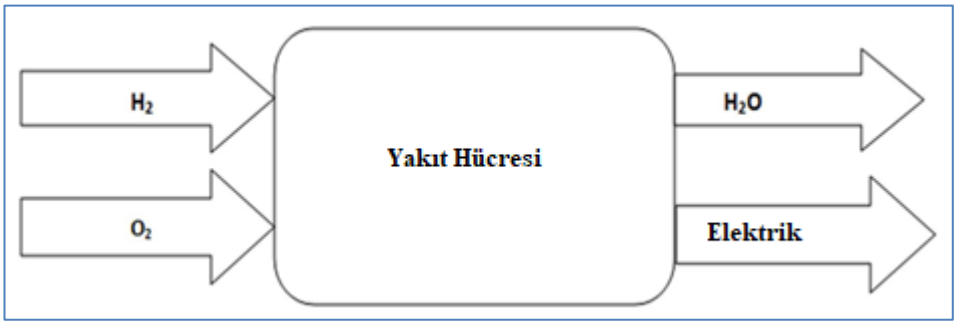
MCFC **:** Eriyik karbonat yakıt hücresi
PEM **:** Proton değişim membran yakıt hücresi
ORR **:** Oksijen azaltma reaksiyonu

1. GİRİŞ

Ulaşım için alternatif enerji kaynakları arayışını iki ana faktör tetiklemiştir. Birincisi, etkileri yaygın olarak görülen küresel ısınma sorunudur (Najjar, 2008). Sera gazı emisyonlarının daha düşük bir seviyeye indirilmesi için enerji kaynaklarının ele alınması gerekir. İkinci olarak, mevcut fosil yakıtların miktarı yakın gelecekte tükenecektir. Yenilenebilir enerji kaynakları bu sorunun tek çözümüdür.

1.1 Yakıt Pili

Yakıt pilleri hem yenilenebilir hem de yeşil bir enerji kaynağıdır (O'hayre vd., 2016). Hücreyi besleyen hidrojen gazı, güneş enerjisi ile üretilebilir. Su ve güneş ışığından hidrojen üretme araştırmasına yapay fotosentez denir (Arifin, 2012). Yapay fotosentez, bugün aktif bir araştırma alanıdır. Yakıt hücresinin yan ürünü sudur; yakıt hücresinden zararlı veya başka türlü herhangi bir salım üretilmez. PEM Yakıt Hücresinin (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) girdisi hidrojen ve oksijen gazlarıdır ve çıktı, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi güç ve yan ürünü olarak sudur.



Şekil 1.1 Yakıt pilinin genel gösterimi

Yakıt pilleri, yanma yoluyla değil, elektrokimyasal olarak enerji üretir. Bu, hücrelerin verimliliğini önemli ölçüde etkiler çünkü bir yanmalı motorda, yakıtta depolanan kimyasal enerji, Carnot verimliliğini sınırlayan bir işlem olan mekanik enerjiye dönüştürülür. Öte yandan bir yakıt hücresinde kimyasal enerji, daha yüksek verimlilikle doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür.

Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi (Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM), ulaşım ve sabit güç kaynağı alanlarında uygulamalarının bir dereceye kadar başarılı olduğu kanıtlanmış yenilikçi bir enerji kaynağıdır. PEMFC 'nin en son modeli, 2014 yılının Kasım ayında piyasaya sürülen Toyota'nın hidrojen yakıtlı arabası Mirai'dir.

1.2 PEM Yakıt Pilinin Çalışması

Bir PEMFC 'de, hücrenin anotuna hidrojen gazı verilir ve orada oksidasyon gerçekleşir. Benzer şekilde, katota oksijen verilir ve Şekil 1.2'de gösterildiği gibi indirgeme gerçekleşir. PEM yakıt hücresinde aşağıdaki yarı hücre reaksiyonları meydana gelir.

$$\text{Anodik reaksiyon: } 2H_2 \quad 4H^+ + 4e \tag{1}$$

$$\text{Katodik reaksiyon: } 4H^+ + O_2 + 4e- \quad 2H_2O \tag{2}$$

$$\text{Genel hücre reaksiyonu: } 2H_2 + O_2 \quad 2H_2O \tag{3}$$

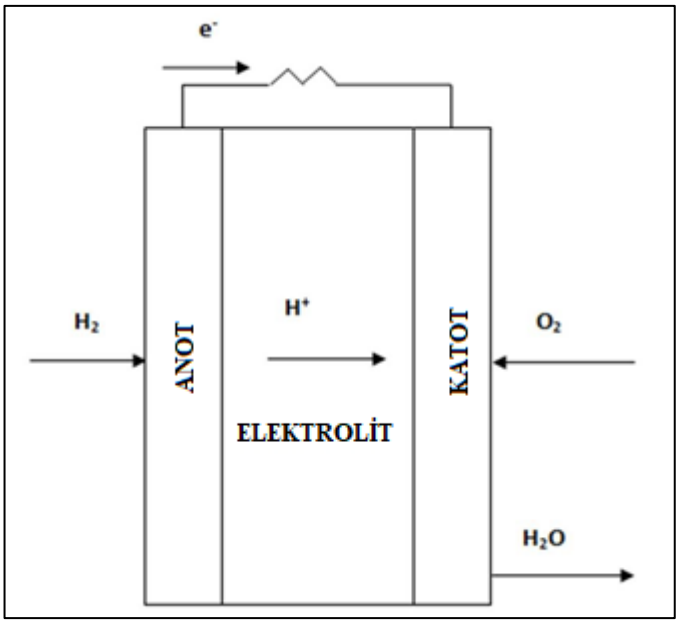
Tepkimeler aşağıdaki gibi farklı bir şekilde de gerçekleşebilir.

$$\text{Anodik reaksiyon: } H_2\ 2H^+ + 2e- \tag{4}$$

$$\text{Katodik reaksiyon: } 2H^+ + O_2 + 2e-\ H_2O_2 \tag{5}$$

$$\text{Genel hücre reaksiyonu: } H_2 + O_2H_2O_2 \tag{6}$$

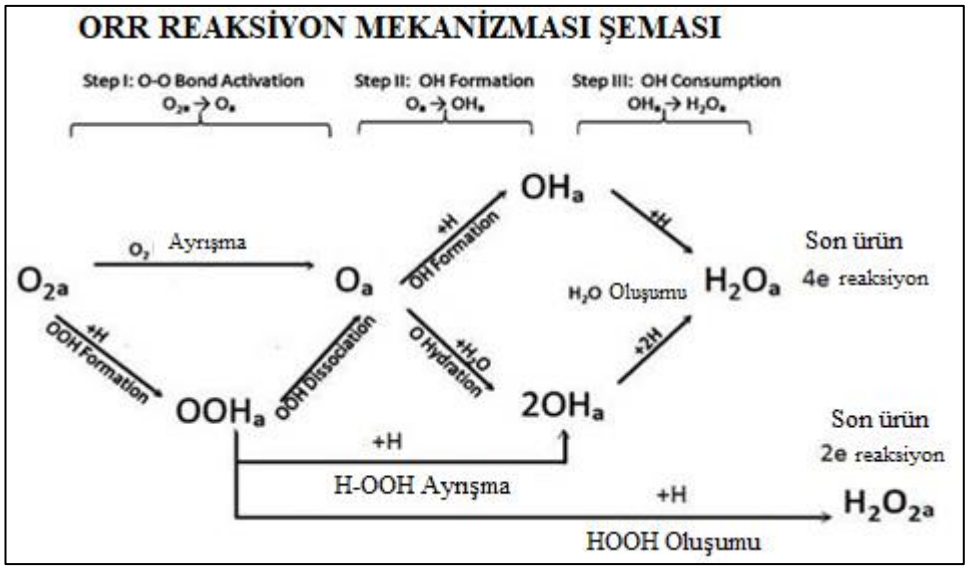
O_2 başına aktarılan elektron sayısına dayanarak, ilk mekanizma (reaksiyon (1), (2) ve (3)) 4-elektron yolu, ikinci mekanizma (reaksiyon (4), (5) ve (6)) 2-elektron yolu olarak adlandırılır. 4-elektron yolu, 2-elektron yoluna göre daha fazla tercih edilir çünkü 4-elektron yolunda iki kat enerji üretilir. Ek olarak, 2-elektron yolunun sonu, yakıt hücresindeki Nafion membranını istenmeyen şekilde bozabilen hidrojen peroksittir (Yu vd., 2011 ; Ted vd., 2013).



Şekil 1.2 PEM Yakıt Pilinin Çalışması

PEMFC sisteminin verimliliği, katotta gerçekleşen Oksijen İndirgeme Reaksiyonunun (Oxygen Reduction Reaction (ORR)) performansına bağlıdır. Bunun nedeni, katot reaksiyonundan kaynaklanan aşırı potansiyelin, PEMFC 'deki diğer verimsizliklerden çok daha büyük olmasıdır. ORR 'nin katot katalizörü üzerindeki performansı çoğunlukla yakıt hücresi sisteminin performansını belirler. Yarı hücre reaksiyonlarından, ORR işleminin reaksiyon (2) ve (5) 'de gösterildiği gibi hem 4-elektron hem de 2-elektron yolu yöntemlerinde gerçekleşebileceği görülmektedir.

ORR süreci, çeşitli ara reaksiyonlarla sonuçlanan farklı yollarda ilerleyebilir. Şekil 1.3, tüm mekanizmayı göstermektedir. Tablo 1.1'de gösterilen ara reaksiyonlar, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi genel Oksijen İndirgeme Reaksiyonunda meydana gelir. Bu ara reaksiyonlar farklı yollarda ilerler. Hidrojen peroksit molekülünün oluşumuna sebep olan yoldansa, su molekülü oluşumuna sebep olan yol tercih edilir.



Şekil 1.3 ORR reaksiyon mekanizması (Yu vd., 2013)

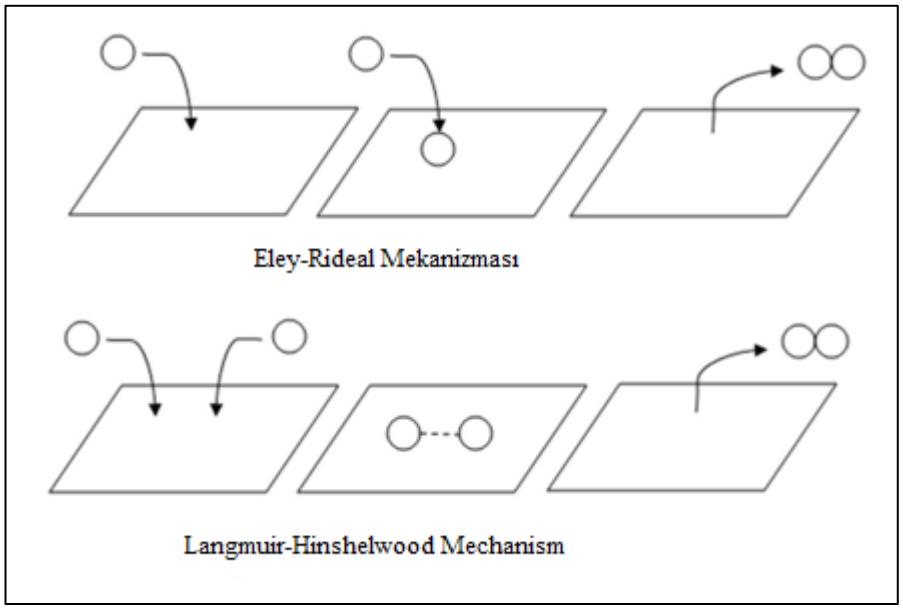
Tablo 1.1 Ara reaksiyonlar

Aşama	**Reaksiyon**
O_2 Ayrışması	$O_2 \rightarrow O$
OOH Oluşumu	$O_2 + H \rightarrow OOH$
OOH Ayrışması	$OOH \rightarrow O$
HOOH Oluşumu	$OOH + H \rightarrow H_2O_2$
HOOH Ayrışması	$OOH + H \rightarrow 2\,OH$
OH Oluşumu	$O + H \rightarrow OH$
Hidrasyon	$O + H_2O \rightarrow 2OH$
H_2O Oluşumu	$OH + H \rightarrow H_2O$

Ara reaksiyonlar, su veya hidrojen peroksit oluşturmak için beş farklı yöntemle ilerleyebilir.

- O_2 Ayrışması → OH Oluşumu → H_2O Oluşumu
- O_2 Ayrışması → O Hidrasyonu → H_2O Oluşumu
- OOH Oluşumu → OOH Ayrışması → OH Oluşumu → H_2O Oluşumu
- OOH Oluşumu → OOH Ayrışması → O Hidrasyonu → H_2O Oluşumu
- OOH Oluşumu → H_2O_2 Oluşumu

Hidrojenin bir tepken olduğu reaksiyonlarda (OOH Oluşumu, HOOH Oluşumu, HOOH Ayrışması, OH Oluşumu ve H_2O Oluşumu), hidrojen katalizör yüzeyine Langmuir-Hinshelwood (LH) yöntemi veya Eley-Rideal (EL) yöntemi olmak üzere iki farklı yoldan biriyle tepki verir.



Şekil 1.4 ER ve LH mekanizmaları şeması

Yukarıdaki Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, bu iki yöntem arasındaki fark, LH mekanizmasında, her iki atomun da aynı anda yüzeye tutunarak reaksiyona girmesi ve ardından ürünün ayrılmasıdır. ER mekanizmasında, bir atom, diğerinden daha sonra yüzeye tutunur. Diğer atom ayrılmadan önce katalizör üzerinde reaksiyona girerler ve ürünü oluşturarak yüzeyden ayrılırlar. ORR için, LH reaksiyonları katalizör yüzeyine tutunmuş H reaktantına sahipken, ER reaksiyonları H reaktantını çözeltideki H + 'dan türetir.

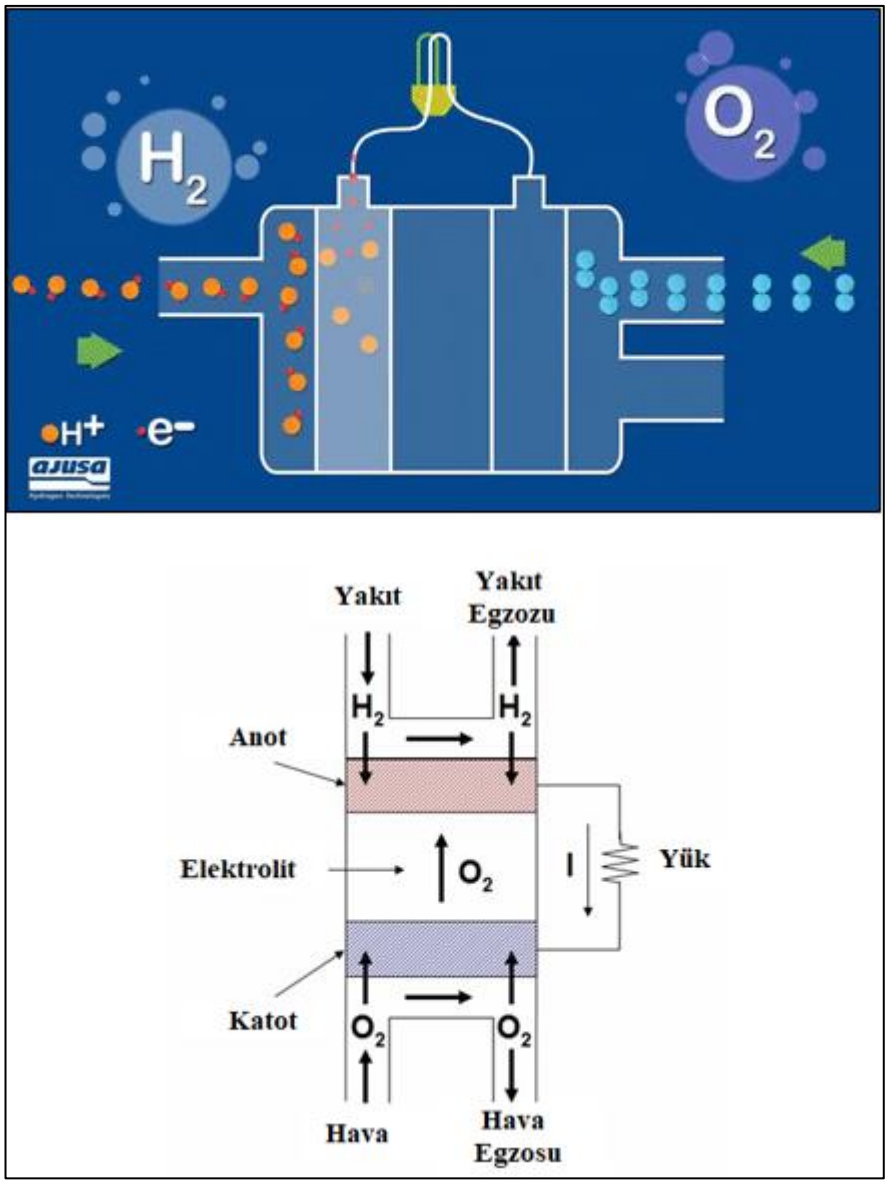
2. YAKIT HÜCRESİ VE FOTOVOLTAİK SİSTEM MODELLEMESİ

Bu bölüm, yakıt pilinin dinamik davranışını ve bir yakıt hücresi kümesinin voltaj-akım polarizasyon eğrisini önemli ölçüde etkileyen dönüştürücü ve yığının dinamiklerini incelemek için, yakıt pili ve fotovoltaik sistemin arka planını ve dinamik modelini bulundurmaktadır.

2.1 Yakıt Pili Modellemesi

19. yüzyılın buhar makinesinin yüzyılı olduğu ve 20. yüzyılın içten yanmalı motorların yüzyılı olduğu bilinir. Öte yandan, 21. yüzyıl muhtemelen yakıt pilinin yüzyılı olacak ve sonucunda yakıt pilleri, yakıt olarak hidrojen kullandıkları için, dünyaya temiz, verimli, sürdürülebilir elektrik enerjisi sağlama olanağını sunarak elektrik enerjisi üretme yolunda devrim yaratacak.

Yakıt hücresi, diğer depolama cihazlarından farklı olarak, elektriksel gücün muhafaza edilebilmesi için sürekli olarak yakıtla beslenebilmesi açısından elektrik hücresi olarak da tanımlanır. Yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu yoluyla hidrojen veya hidrojen içeren yakıtları doğrudan elektrik enerjisine, ısıya ve suya dönüştürür.



Şekil 2.1 Temel yakıt hücresi çalışması

Şekil 2.1, temel yakıt hücresi çalışmasının bir blok diyagramını göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi, doğal gaz, kömür, metanol vb. yakıtlar, yakıt elektroduna (anot) beslenir ve oksidan (oksijen) hava elektroduna (katoda) verilir. Katoda beslenen oksijen, harici elektrik devresinden elektronların oksijen iyonları üretmesine izin verir. İyonize oksijen, katı elektrolit aracılığıyla anoda gider ve hidrojen ile birleşerek su oluşturur. Anot ve katottaki kimyasal reaksiyonlar, yakıt hücrelerinin tiplerine göre biraz farklı olabilse de genel reaksiyon şu şekilde tanımlanabilir:

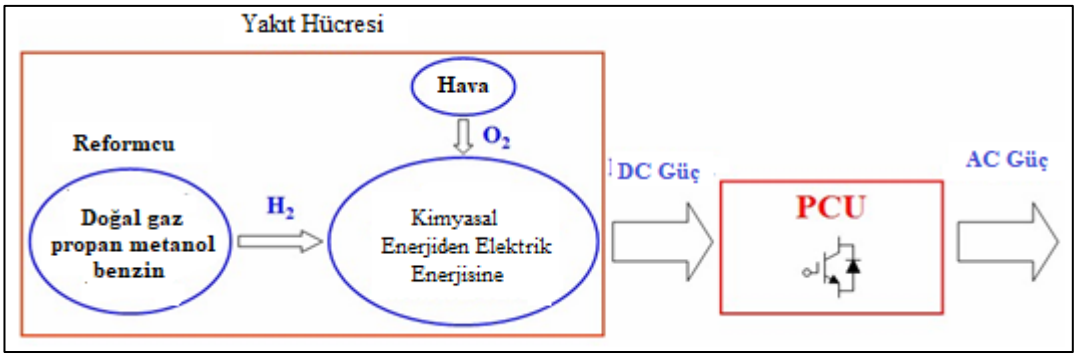
Genel reaksiyon: 2 H2 (gaz) + O2 (gaz) → 2 H2O + enerji (elektrik, ısı)

Yukarıdaki genel reaksiyonda gösterildiği gibi, Hidrojen ve oksijen gazları elektrokimyasal olarak suya ve enerjiye dönüştürüldüğünden, yakıt pillerinin ısı motorlarına göre birçok avantajı vardır: yüksek verimlilik, sessiz çalışma ve eğer yakıt hidrojen ise, atmosfere hiçbir kirletici salınmaması. Sonuç olarak, yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijen mevcut olduğu sürece sürekli olarak elektrik enerjisi üretebilir.

Kullanılan elektrolite göre sınıflandırılan birkaç yakıt hücresi türü arasında, dört tip dağıtılmış üretim sistemleri için ümit vericidir: Fosforik Asit yakıt hücresi (Phosphoric Acid fuel cell (PAFC),Katı Oksit yakıt hücresi (Solid Oxide fuel cell (SOFC), Erimiş Karbonat yakıt hücresi (Molten Carbonate fuel cell (MCFC), Proton Değişim Membranlı yakıt hücresi (Proton-Exchange Membrane fuel cell (PEMFC)).

Her türlü yakıt pili, hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu ile elektrik üretir ve oksijen, havanın sıkıştırılmasıyla kolayca elde edilebilir. Aksine, DC gücü üretmek için gerekli olan hidrojen gazı, dönüştürücü ile dolaylı olarak, doğal gaz, propan, metanol, benzin gibi yakıtlar kullanılarak veya suyun elektrolizinden elde edilir.

Otonom bir yakıt hücresi sisteminin tipik bir konfigürasyonu Şekil 2.2'de açıklanmıştır. Şekilde gösterildiği üzere, yakıt hücresi tesisi üç ana bölümden oluşur: dönüştürücü, yığın ve güç işleme birimi (Power conditioning unit PCU)). İlk olarak, dönüştürücü, yakıtlardan hidrojen gazı üretir ve ardından onu yığına besler. İkinci olarak, yığın, prosesler için gereken yüksek voltajı üretebilmek için seri halinde bağlanan birçok hücre biriminden oluşur çünkü, elektrolit, ayırıcılar ve plakalardan oluşan tek bir hücre yaklaşık olarak 0,7 V DC üretir. Son olarak, güç dönüştürücüleri içeren PCU, yakıt hücresindeki düşük voltajlı bir DC 'yi yüksek voltajlı bir DC 'ye ve/veya sinüzoidal bir AC 'ye dönüştürür.



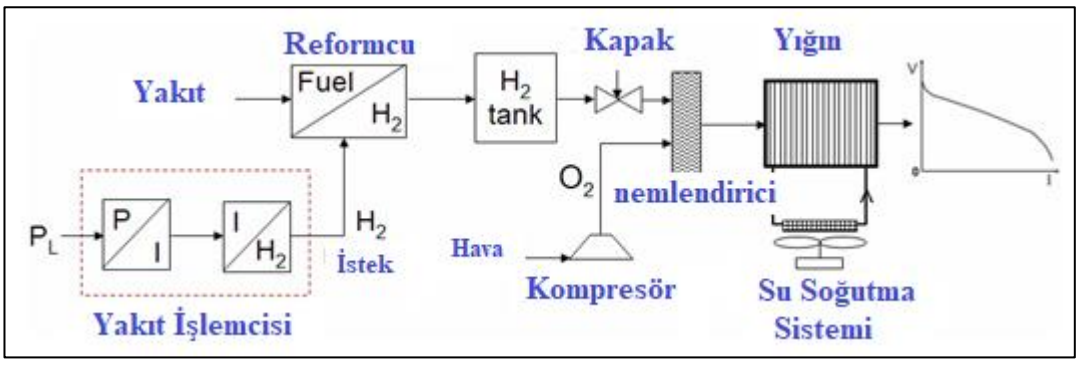
Şekil 2.2 Yakıt hücresi sisteminin konfigürasyonu

2.2 Yakıt Pilinin Modellenmesi

Bu bölümde, dönüştürücünün dinamikleri ve bir yakıt pili yığınının voltaj-akım polarizasyon eğrisi ayrıntılı olarak incelenecektir.

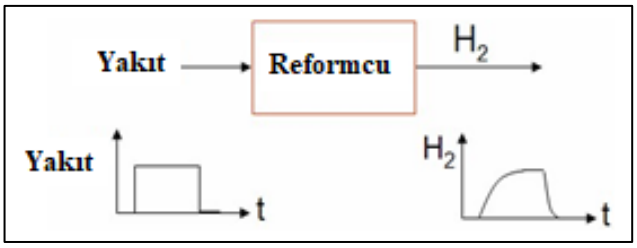
2.2.1 Dönüştürücü Dinamikleri

Yakıt hücrelerinin dinamik modellemesi için, yakıt pili sisteminin dinamik tepkisini belirleyen dönüştürücü ve yığın daha ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Şekil 2.3, yakıt pili sisteminin ayrıntılı bir blok diyagramını ve sürecini göstermektedir.



Şekil 2.3 Yakıt pili sisteminin ayrıntılı blok diyagramı

Şekilde gösterildiği gibi, yakıt pili sistemi, yakıt hücresi yığını ve hidrojen gazını elde etmek için bir yakıt işlemcisi kontrolörü, bir dönüştürücü, katottaki basınçlı oksijen akışını sağlamak için bir hava kompresörü, anottaki hidrojen akışını kontrol eden bir valf, hidrojen ve oksijen gazlarına nem eklemek için bir nemlendirici ve yığında oluşan ısıyı gidermek için bir su soğutma sistemi gibi yardımcı sistemlerden oluşur.



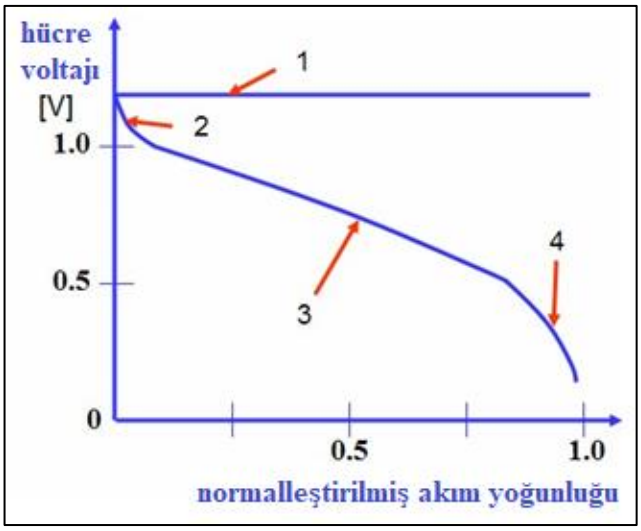
Şekil 2.4 Dönüştürücü dinamik modeli

Yukarıda belirtilen yardımcı sistemler arasında, dönüştürücü (reformer) yakıt hücresi sisteminin dinamik davranışını önemli ölçüde etkiler çünkü Şekil 2.4'te gösterildiği gibi yük akımının ihtiyacına bağlı olarak yakıtı hidrojene dönüştürmek onlarca saniye sürer. Bu nedenle, yakıt piliyle çalışan sistemlerin genel işleyişini araştırmak için, dönüştürücü dinamiklerinin dikkate alınması gerekir ve bu, ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu modeli (Hauer, 2000) veya birinci dereceden bir zaman gecikmesi modeli (Kim ve Kim, 1999) ile temsil edilebilir. Bu yazıda, dönüştürücünün dinamik modeli için birinci dereceden bir transfer fonksiyonu kullanılmıştır.

2.2.2 Bir Yakıt Hücresi Yığınının Gerilim-Akım Polarizasyon Eğrisi

Hidrojen ve oksijenden elektriksel DC gücü üreten yığının tepkisi, dönüştürücüden çok daha hızlıdır. Şekil 2.5'te gösterilen bir yakıt hücresi yığınının voltaj-akım polarizasyon eğrisi, pratik yakıt pili modeli için de dikkate alınmalıdır. Yani, yığındaki akım arttıkça hücre voltajı azalır.

Şekil 2.5, tek bir yakıt hücresinin statik voltaj-akım karakteristik eğrisini göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi, üç bölgeden oluşur: aktivasyon polarizasyonu bölgesi, ohmik polarizasyon bölgesi ve konsantrasyon polarizasyonu bölgesi. İlk olarak, aktivasyon polarizasyonu bölgesinde, küçük bir akım artışıyla bile hücre voltajı hızla düşer. İkincisi, omik polarizasyon bölgesinde, akım arttıkça hücre voltajı doğrusal olarak azalır ve yakıt hücresi bu bölgede normal olarak çalışır. Son olarak, konsantrasyon polarizasyonu bölgesinde, akım güvenli çalışmanın üst sınırını aştığında voltaj keskin bir şekilde düşer. Bu bölgedeki işlemden kaçınılmalıdır, çünkü yakıt hücresi, hidrojen açlığı nedeniyle hasar görebilir.



Şekil 2.5 Tekli yakıt hücresinin V-I polarizasyon eğrisi

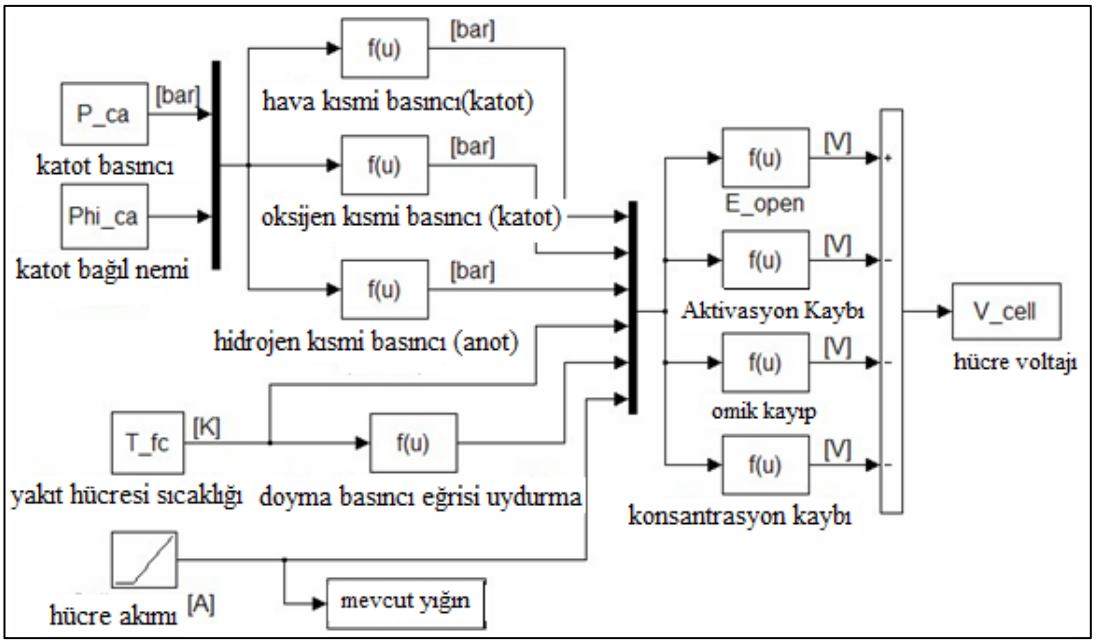
1. Teorik EMF veya ideal voltaj (1,16 V)

2. Aktivasyon Polarizasyonu Bölgesi (Reaksiyon Hızı Kaybı)

3. Ohmic Polarizasyon Bölgesi

4. Konsantrasyon Polarizasyonu Bölgesi (Gaz Taşınımı Kaybı)

Bu araştırmada, gelecek vaat eden dört yakıt pilinin Proton Değişim Membranı (PEM) yakıt hücreleri incelenmiştir. (Pukrushpan vd., 2002) 'daki elektrokimyasal sürece dayalı olarak, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi, yakıt hücresi yığınının V-I polarizasyon eğrisi için bir Simulink modeli geliştirilmiştir. Bu şekilde, yakıt hücresinin polarizasyon eğrisi, akım, yakıt hücresi sıcaklığı, buhar doygunluk basıncı ve oksijen ve hidrojenin kısmi basınçlarının regresyon modelleri kullanılarak oluşturulur. Özellikle, oksijen ve hidrojen basınçları, katot basıncı, katot bağıl nemi ve buhar doyma basıncından tahmin edilebilir.



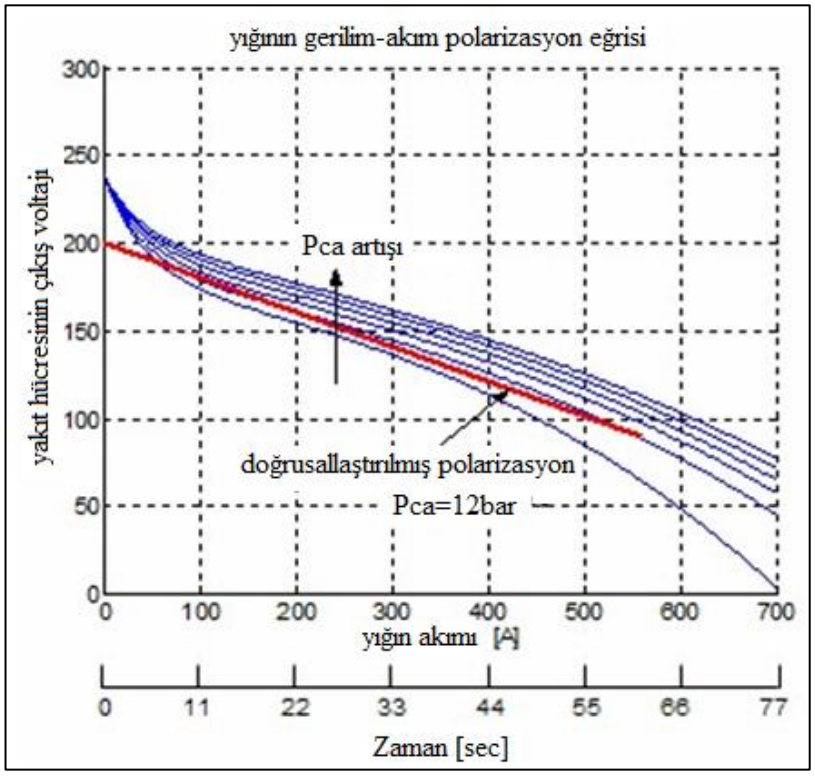
Şekil 2.6 V-I polarisyonu için Simulink modeli

Yakıt hücresi yığınının voltaj-akım polarizasyon eğrisini elde etmek için aşağıdaki varsayımlar yapılır.

- Yakıt hücresi sıcaklığı her zaman 80°C'dir.
- Gaz dağılımı düzenlidir.
- Anot bağıl nemi, katot bağıl nemine eşittir ve değeri %75'tir.
- Kanalın içi ve dışı arasındaki basınç oranı, deliğin tıkanmasına yetecek kadar büyüktür.
- Nernst denklemi uygulanır.
- Hücre kullanımı %85 'tir.

Yukarıdaki varsayımlara dayanarak, seri haldeki 250 hücre yığınının çeşitli katot basınçlarına (1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2 bar) ait polarizasyon eğrileri Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Bu şekilde gösterildiği gibi, 1,2 barlık katot basıncına (pca) karşılık

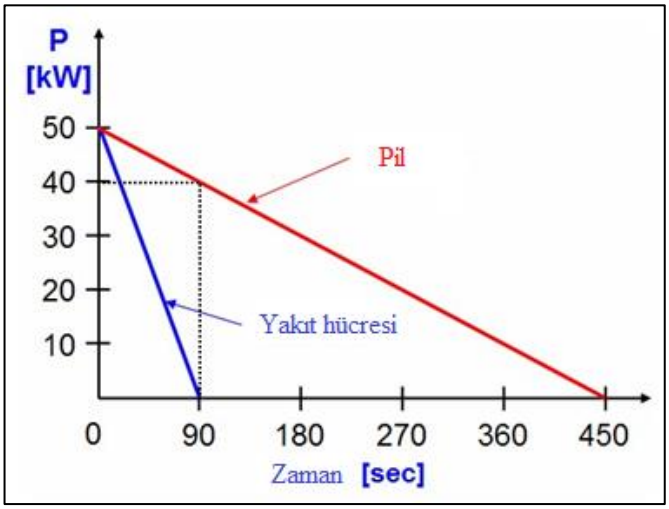
gelen doğrusallaştırılmış polarizasyon eğrisi, 50 kW 'lık bir PEM yakıt hücresi için seçilmiştir ve bu, yakıt hücresi yığınının Simulink modeli için kullanılacaktır.



Şekil 2.7 Farklı katot basınçlarında (pca) voltaj-akım polarizasyon eğrileri

Yakıt hücresinin geçiş sırasında yavaş dinamik yanıta sahip olduğuna dikkat edilmelidir. İlk çalıştırmada, yakıt hücresinin sabit duruma ulaşması 90 saniye sürer. Güç talebinde bir değişiklik olduğunda, yakıt hücresinin yeni bir kararlı duruma ulaşması 60 saniye sürer çünkü hidrojen akış hızları güç talebini karşılamak için yavaş bir şekilde ayarlanabilir (Andersen vd., 2002; Santi vd., 2002). Yakıt hücresinin böylesine yavaş karşılığını telafi etmek için, nihai kullanım ihtiyacına göre, akü gibi bir enerji depolama cihazı gerekebilir. 50 kW'lık bir PEM yakıt hücresi için bu, başlatma sırasında (90 saniye), enerji depolama gereksiniminin 4500 kJ veya 1,25 kWh olduğu anlamına gelir. Ayrıca dinamik yük değişimleri 60 saniye boyunca aküler tarafından desteklenmelidir. Kurşun asitli aküler için, şarj durumunun yaklaşık %20'si, derin deşarjı önlemek ve yakıt hücresinde uzun süreli bir arıza olması durumunda yedek kapasitenin yanı sıra uzun hizmet ömrünü garanti etmek için makul olabilir. Şekil 2.8, akü kapasitesini belirlemek için yakıt hücresi ve akü deşarj eğrisini gösterir. 90 saniye (başlangıç) için nominal akü şarj durumunun yalnızca %20'sinin deşarj

olduğu göz önüne alındığında, akülerin tüm geçişler sırasında yakıt pilini desteklemek için minimum depolama gereksinimi yaklaşık 22 500 kJ veya 6,25 kWh 'dir.



Şekil 2.8 Yakıt pili ve akünün deşarj eğrisi

P-I'nin doğrusal olmayan özelliği nedeniyle, pratik uygulamalar için maksimum güç noktası izleme (maximum power point tracking (MPPT)) denetleyicisinin uygulanması çok önemlidir. (Jiao ve Cui, 2013), matematiksel bir modele dayanan kayan modlu kontrol kullanarak bir yakıt pili ve çevirici ile MPPT'ye yeni bir yaklaşım önermiştir. Yöntemlerinde, güçlendirme kontrolünün görev döngüsünü değiştirmek için DC-DC dönüştürücüsü uygulanmıştır. Kontrolörün özellikleri simülasyonlarla doğrulanmıştır. Metottaki iyi geçiş tepkisi, düşük izleme hatası ve çalışma sıcaklığı, su içeriği ve yük değişim performansları, çok hızlı verilen sistem tepkileridir. Yöntemlerinin etkili ve ekonomik olarak uygulanabileceğini ispatlamışlardır (Jiao ve Cui, 2013).

Bir yakıt pilinin çıkış gücü, doğrusal olmayan ve özgün maksimum güç noktası (MPP) üzerine uygulanan akım veya gerilime bağlıdır. Bu iz, kağıt kontrolörünün ilk deneme raporlarını talep eden bir MPP 'dir. Yakıt hücresinin odak noktasındaki MPP 'lerin çalışma koşulları, öngörülemeyen değişiklikler olmadan doğrusal olarak değişir. Bu nedenle, çalışma durumunda, mümkün olan en yüksek sürekli güç yükünün oluştuğundan emin olmak için maksimum güç noktası izleme (MPPT) kontolörü değişimi gereklidir. Bir ara konvertörlü iki kademeli kontrol ünitesi, MPP 'lerinin yakıt hücreli enerji santrallerinden çalışmak üzere tasarlanmıştır. Dış döngü, gerçek zamanlı

veri isteyen MPP ekstremumunu tahmin etmek için uyarlanabilir bir algoritma kullanır ve ardından yakıt hücresini çalıştırmak için iç döngü olarak iç döngü ayar noktası kuvvetinin değerini tahmin eder. Yakıt hücresinin gerçek zamanlı MPP'ler olmadan çalışmaya devam edebildiği MPPT kontrol sistemi, basit ve sağlam bir kontrol ilkesi sağlar. Bu kontrol yaklaşımının simülasyonu, yakıt hücresi çalışma koşulları değişikliğine karşı stabilite açısından tatmin edici sonuçlar göstermektedir (Zhong vd., 2008).

Carreon-Bautista vd., (2015) 'te, mikrobiyal yakıt hücrelerini (MFC), verimli maksimum güç noktası izleme (MPPT) oluşturan indüktörsüz bir DC-DC (I-DCDC) dönüştürücüsü için enerji duyarlı bir güç yönetimi birimi hedefleyen diziler (EA-PMU) yapabilen bir DC yükseltme kazancı elde edildi. MFC ’lerin hasat zamanının en iyi noktasının belirlenmesi ve seçilmesi nedeniyle, MFC ’ler güç profilini değiştirir, verimliliği ve genel güç dağıtımını artırır. Şu anda, MFC serisi veya MFC uygulamasıyla ilgili ters voltaj akımı sorunları, paralel bağlantılar nedeniyle sınırlıdır; bu, hasat zamanı çoklamasına daha güvenilir bir yaklaşımdır. Ancak, her yeni MFC hasat zamanına bırakıldığında, yeni bir maksimum güç noktası (MPP) gereklidir. Önerilen dönüştürücü, verimliliği maksimize etmenin yanı sıra güç tüketimini ayarlamak için dinamik MPP uyarlamaları elde eder. Dönüştürücüler 0,18 mikron CMOS prosesinde tasarlanmış ve üretilmiştir ve 1,6 mW giriş gücüne sahip olmaları maksimum verimliliği %65 göstermektedir (Carreon-Bautista vd., 2015).

Enerji depolamak için kaynak yoktur ve yenilenebilir enerji sistemlerinde önemli bir rol oynar. Yakıt Hücresi (FC) bu teknolojilerden biridir (Karami vd., 2014). Karami vd., (2014) 'te, güç optimizasyon yöntemleri Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT), sistemleri kullanan bu hücrelere uygulanır. Perturb ve Observe (P & O) ve artan iletkenlik (IC) yöntemi simüle etmek için ve FC sistem uygulamaları için iyi olup hangisinin hangisi olduğunu belirlemek için karşılaştırılır (Karami vd., 2014).

Rambabu vd., (2012) 'da kontrol ünitesi için, rüzgâr jeneratörü (WG) maksimum güç noktası izleme (MPPT) sistemi, DC/DC dönüştürücü ve MPPT fonksiyonları için bir yöntem önerilmiştir. Yük empedansı, belirli bir rüzgâr hızı altında kaynağın empedansıyla eşleştiğinde rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemi maksimum güç

sağlayabilir. Yük ve dinamik olarak değişen rüzgâr hızı nedeniyle, maksimum güç noktası izleme (MPPT) daha karmaşık hale gelir. Rüzgâr hızı MPPT yönteminin avantajları WGA optimum güç karakteristiği veya ölçümü, gerekli bilgi olmaması ve WGA değişken hızlarında çalışmasıdır. Bu nedenle, yüksek güvenilirlik, düşük karmaşıklık ve daha az mekanik stres WG sistemi. Bu yazıda, maksimum güç noktası takibi için hibrit bir algoritma kullanılmıştır. Yöntemlerinde, elektriksel varyasyon, inverter çıkış voltajının görev döngüsü çeşitli uygulamalara göre ayarlanır (Rambabu vd., 2012).

Yakıt hücresi (FC), düşük kirlilik, düşük gürültü ve yüksek verimlilik ile karakterize edilir. Ancak, belirli bir sonuç kümesi verilen çıktı gücünü maksimize eden çalışma koşullarının tek bir operasyon noktasına FC voltaj-akım tepkisi doğrusal değildir. Buna göre, mevcut çalışmaların kontrol şemasına dayanan bir maksimum güç noktası (MPPT) izleme genişletme teorisi, maksimum güç noktasında stabilize edilmiş bir FC çıkışı önerir. Sıcaklık simülasyonu sonuçları, membrandaki su basıncındaki ani değişikliklere rağmen, hidrojenin kontrolörün maksimum güç noktasında çıkış gücünü telafi etme kabiliyetini doğrular. Ayrıca, önerilen kontrolörün geçici yanıt süresi, daha hızlı (ES) arayan kayan mod kontrolörü (SM) ve sonunun mevcut olduğu gösterilmiştir (Wang vd., 2013).

Lu ve Zahedi, (2010) 'de, yakıt hücresi güç üretim verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için yeni bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Maksimum verimlilik noktası izleme (MEPT) kontrolörü, ekstremum arama kontrol algoritmasına dayalı olarak tasarlanmıştır. Bu kapalı döngü, hızlı değişen çalışma koşulları gibi geleneksel optimizasyon yöntemleriyle kabul edilemez gibi gerçek zamanlı ve model tabanlı olmayan kontrol metodolojisini aşırı derecede bozabilir, garanti kapsamında elde edilir ve algoritmayı gözlemleyebilir.

Sistemin yakıt olarak güç üretme yeteneği sınırlıdır. Dolayısıyla (MPP) ’nin, yakıt hücresi maksimum güç noktası sistem gereksinimleri karşılığında çalışmaya zorlanması gereklidir. Yakıt hücrelerinin MPP ’si benzersiz ve sabit nokta operasyonlarıdır, yük gücü gereksinimleri yük direncine göre değişir ve çıkış voltajı değişiklikleri hesaba katılmaz. (Dargahi vd., 2009) 'da gerekli kontrollere sahip

Batarya Yakıt CEO'su hibrit güç sistemi için yeni konfigürasyon önermiştir ve analiz edilmiştir. Bu yakıt hücresi sistemi kendi MPP 'sini çalıştırır ve çıkış voltajı çalışma şekline göre sabit tutulur. Önerilen sistem simüle edilmiştir ve sonuçlar, sistemin farklı koşullar altında kabul edilebilir bir işleyiş içinde çalıştığını göstermektedir.

Cha ve Lee, (2008) 'de, tek fazlı fotovoltaik güç koşullandırma sistemi için yeni bir akış tabanlı maksimum güç noktası izleme (CMPPT) yöntemi önerilmektedir ve MPPT 'ye dayalı olarak iletkenliği artırma yöntemini değiştirecektir. Mevcut yöntem tabanlı MPPT güç koşullandırma sistemi, güneş pilinin tüm basit kontrol yapısını ve özelliklerini dizin kaynağının doğal akışını kullanır. Bu nedenle dayanıklıdır ve hızlı değişen ortamlarda hızlı tepki gösterir. Ek olarak, şebeke geriliminin fazını ve tepe gerilimini tespit etmek için tüm geçiş filtresini kullanan dijital faz kilitli döngü eklenir. DC/DC artış dönüştürücü, DC-bara voltajı, DC/AC inverter denetleyicisi, koordine halde çalışmak üzere tasarlanmıştır. Ayrıca, sahte bir güç faktörü ve akım kontrol şebekesi kullanarak senkron dönüşüm PI akım kontrolü için de kullanılır. Önerilen kontrol programının etkinliğini doğrulamak için 3kW fotovoltaik güç koşullandırma sistemi prototipi oluşturulmuş ve deneysel sonuçlar vermiştir.

Güneş enerjisi temiz, yenilenebilirdir ve dağınık, bölge nüfusunun düşük yoğunluklu karakteri uygun şekilde merkezden uzaklaştırılabilinir. Güneş enerjisi sisteminin elektrik maliyeti, şebeke elektriğinden daha pahalıdır. Bu nedenle, herhangi bir çevresel koşulun maksimum verimlilikte çalışması için bir PV sisteminin maksimum güç noktasını takip etmesi gerekir. (Zaki vd., 2012) 'de, sinir ağı geri yayılma algoritması, maksimum güce ulaşmak için PV 'nin çalışmasını kontrol etmekte kullanılır. İki hata işlevi kullanılır: İlki, klasik hata fonksiyonudur ve hata fonksiyonunu, ikincisi, değiştirilerek hata fonksiyonunun türevini dikkate alır. Sonuçlar karşılaştırılır ve tartışılır.

3. YAKIT HÜCRESİ SİSTEMİNİN FİZİĞİ

3.1 Yakıt Hücreleri

3.1.1 Harekete Geçirme

İklim değişikliğinin en kötü etkilerinden kaçınmak için küresel enerji kullanımındaki karbon yoğunluğunu azaltmaya yönelik kritik ihtiyaç abartılı olarak düşünülemez. Bunu başarmanın iki paralel yolu vardır:

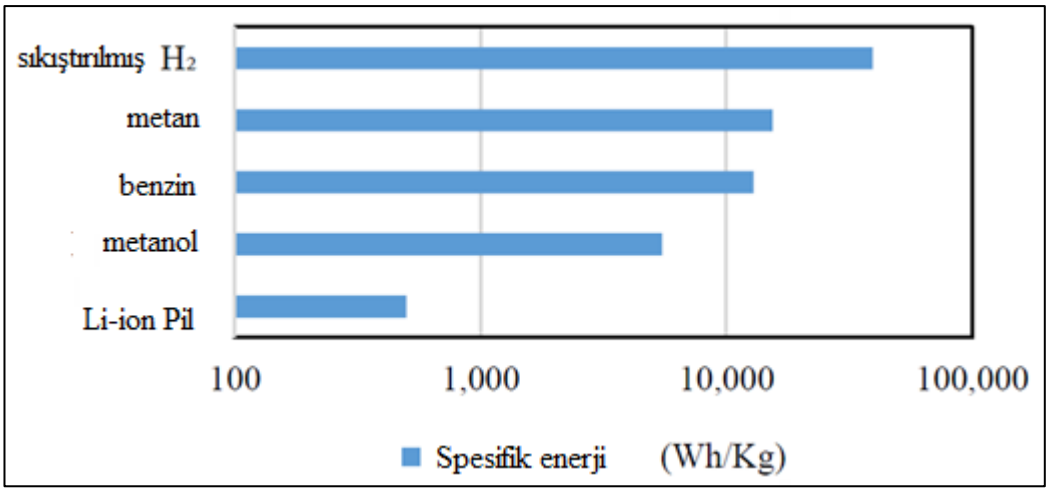
1. düşük karbonlu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması

2. karbonu atmosferden çıkarmak veya ayırmak

Güneş, rüzgâr ve hidro gibi düşük karbonlu yenilenebilir elektrik enerjisi üretim kaynaklarının, ABD'de 2025 yılına kadar %30 yenilenebilir enerji hedefini karşılaması için (Greenberg vd., 1996), bunların güvenilir depolama sistemleriyle güçlendirilmesi gerekecektir. Büyük çaptaki yeniden ağaçlandırma çabaları, devamlı sera gazı emisyonlarını azaltmaya yardımcı olurken, süreci tersine çevirmek için daha hızlı ve verimli bir yaklaşım gereklidir.

Yukarıdaki zorlukları ele alabilen bir çözüm, güneş yakıtları üretebilen verimli, istikrarlı ve uygun maliyetli yapay fotosentez sistemlerinin geliştirilmesinde yatmaktadır. 'Güneş yakıtları' terimi, özellikle enerji üretiminde kullanılacak kimyasallar imal etmek için ortak bileşiklerin elektrolizi işleminde fotovoltaik etkiden yararlanarak, güneş enerjisi yardımıyla, yenilenebilir yakıt üretimini ifade eder. Hidrojen gazının su elektrolizi ile üretilebileceği iyi bilinmektedir. Benzer şekilde, çeşitli hidrokarbon türleri ve karbon monoksit (hidrokarbonlar üretmek için bir öncül), karbon dioksit elektrolizinden üretilebilir. Geçtiğimiz yarım yüzyılda fotovoltaik (Photovoltaic (PV)) ve elektrokimyada önemli ilerlemeler görüldü. Çoğu araştırma, elektrokimya bilimine veya bunların fiziksel entegrasyon teknolojisine odaklanırken, güneş yakıtı üretimi için bu iki sistemin verimli elektriksel bağlantısına bakan nispeten daha az çalışma vardır.

Güneş yakıtlarının bir başka umut verici yönü, enerji depolama mekanizmaları olarak uygulanmalarında yatmaktadır. Aküler gibi diğer depolama biçimleriyle karşılaştırıldığında, yakıtlar - özellikle sıvı hidrojen ve hidrokarbonlar, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, önemli ölçüde daha yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle muazzam bir potansiyele sahiptir. Sıvı hidrojen ve hidrokarbonlar gibi yakıtlar şeklinde depolanan elektrokimyasal enerjinin muazzam bir depolama potansiyeline sahip olduğu bu şekilden anlaşılmaktadır. Bu, lityum iyon piller gibi geleneksel depolama mekanizmalarına kıyasla daha büyük enerji yoğunluklarına sahip olduklarını kanıtlamaktadır. Ek olarak, sıvı yakıtlar veya sıkıştırılmış gazlar şeklinde kolay sevkiyat sağlarlar ve günümüz enerji altyapısında önemli bir değişiklik gerektirmezler.



Şekil 3.1 Farklı depolama mekanizmaları için enerji yoğunlukları- yatay eksenin log ölçeğinde gösterildiğine dikkat ediniz

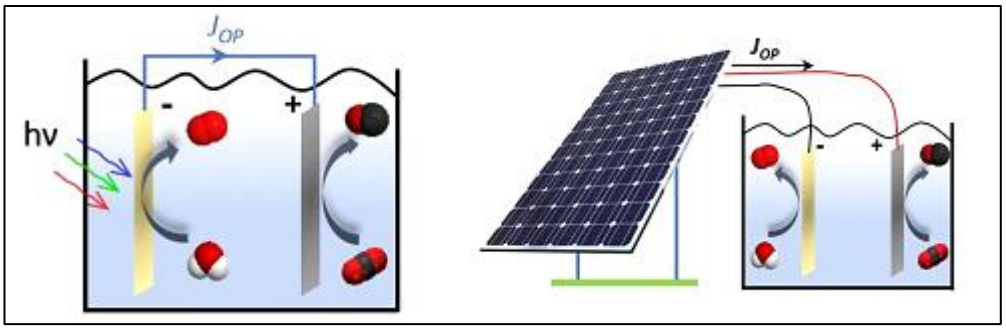
3.1.2 Cihaz Mimarileri

Güneş enerjisi ile yakıt üretim cihazları genel olarak iki mimariye ayrılabilir:

i. Fotoelektrokimyasal hücre (Photoelectrochemical Cell (PEC))
ii. Fotovoltaik elektrokimyasal cihaz (Photovoltaic electrochemical device (PV-EC)).

Bu iki tip sistemin cihaz şemaları Şekil 3.2'de verilmiştir. PEC 'ler, reaksiyona giren elektroliti içeren çözeltiye batırılmış bir fotoaktif malzemeden oluşur ve elektroliz reaksiyonunu yürütme potansiyeli, tipik olarak elektrot-elektrolit bağlantısındaki

aydınlatma altında elde edilir. Öte yandan bir PV-EC, bir fotovoltaik sistemin, istenen gaz ürününü üretmek için bağımsız olarak tasarlanmış bir elektrolizörü çalıştıran, tamamen ayrışmış bir cihazdır. Bu iki uç nokta arasında başka cihaz stratejileri de mümkündür ve bunların sınıflandırması literatürde çokça tartışılmıştır (Jacobsson vd., 2014).



Şekil 3.2 (a) fotoaktif bileşenin elektrolit içine daldırıldığı entegre bir fotoelektrokimyasal hücre (PEC) cihaz mimarisini ve (b) bağımsız olarak tasarlanmış bir elektrokimyasal hücreyi çalıştıran bağımsız olarak tasarlanmış bir fotovoltaik cihazla ayrışmış bir PV-EC cihaz mimarisini gösteren şematik

PEC tipi cihazlar 45 yılı aşkın süredir geliştirme aşamasındadır ve birçok belgelenmiş dezavantaja sahiptir (Jacobsson vd., 2014):

i. Tek bağlantılı bir cihazdan istenen reaksiyonları yürütmek için yeterince büyük fotovoltajların elde edilmesindeki sınırlamalar;

ii. Koruyucu katmanların ve/veya uyumlu elektrokatalizörlerin kullanılmasını gerektiren, cihaz tasarımını ve üretilebilirliğini zorlaştıran potansiyel olarak aşındırıcı elektrolit çözeltisindeki fotoaktif bileşenin malzeme uyumluluğu ve

iii. Cihaz uygulaması için mevcut malzeme seçimini sınırlayan, doğal tasarım ve imalattan kaynaklanan optik kayıplar,

iv. Malzeme işlemenin cihaz yapısı ile uyumluluğu. Bildirilen PEC'lerin çoğu, su parçalama için >1,23 V ve karbondioksit parçalama için >1.34 V'lik gerekli yüksek voltajları elde edebilmek için çok bağlantılı III-V güneş pilleri kullanmıştır (Cox vd., 2014; Jia vd., 2016; Zhou vd., 2016). Bu tür III-V cihazlarının üretimi zordur, çok pahalıdır ve henüz ticari olarak temin edilemez.

Bununla birlikte, PV-EC cihaz tasarımı, yüksek kaliteli elektrokatalizörlerin ve ticari olarak temin edilebilen bileşenlerin, tasarıma kolayca dahil edilebilmesinin yanısıra, optik ve elektrik bileşenlerinin ayrılması daha fazla malzeme seçimine izin verdiği ve hafif aktif bileşenlerin işleme uyumlulukları ve çözelti kararlılığı endişelerini ortadan kaldırdığı için, PEC'lere göre birçok avantaj sunar. Düşük maliyetli ve güvenilir silikon tabanlı ve ince tabaka PV hücreleri ve modülleri halihazırda yaygın olarak mevcuttur ve ihtiyaç duyulan akımı ve gerilimi bağımsız olarak sağlayacak şekilde kolayca yapılandırılabilir. Elektrolitik reaksiyonları yürütmek için yeterli olan fotovoltaj elde etmek için seri bağlı güneş pillerinin, hem H2O bölünmesi hem de CO2 azaltımı yaptığı yakın zamanda ispat edilmiştir (Ochedi vd., 2020). Paralel bağlı hücreler veya modüller, elektrolizör alanından bağımsız olarak mevcut akım yoğunluğunu artırır. PV-EC mimarisi, tek bağlantılı fotoaktif bileşenli PEC yaklaşımlarının ulaşamadığı uygun yüksek voltajların elde edilebilmesi için seri bağlı güneş enerjisi sistemi konfigürasyonlarına izin verir. Bu nedenle, uygun elektrokatalizörlere sahip bir PV-EC sistemi, yakıtlar ve diğer endüstriyel kimyasallar dahil olmak üzere farklı türlerin verimli ve pratik güneş enerjisi sistemli üretimini vaat eder.

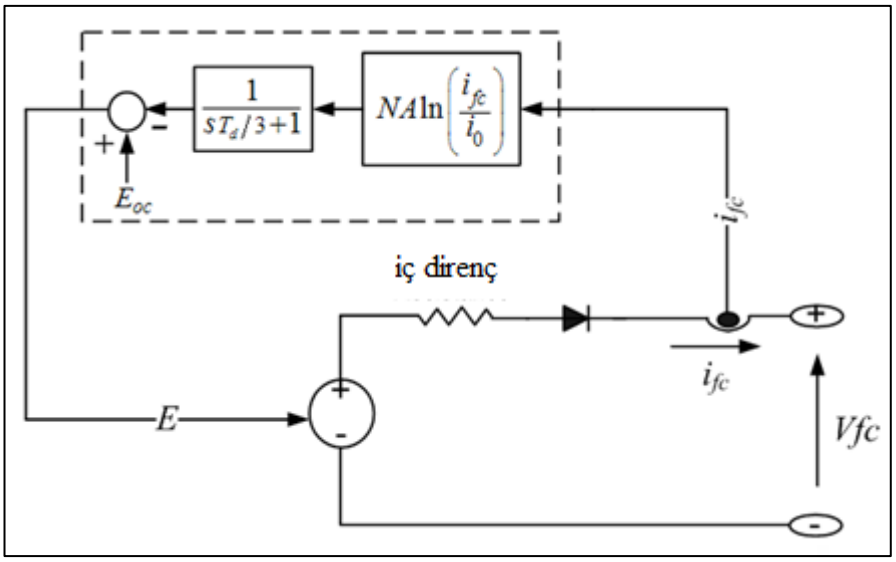
3.2 Açıklama

Yakıt Hücresi Yığını bloğu, hidrojen ve hava ile beslenen en popüler yakıt hücresi yığını tiplerini temsil edecek şekilde parametrelendirilmiş genel bir model oluşturur.

Blok, yığın modelinin iki versiyonunu temsil eder: basitleştirilmiş bir model ve ayrıntılı bir model. Blok iletişim kutusundaki model detay seviyesi altındaki maskede seviyeyi seçerek iki model arasında geçiş yapabilirsiniz.

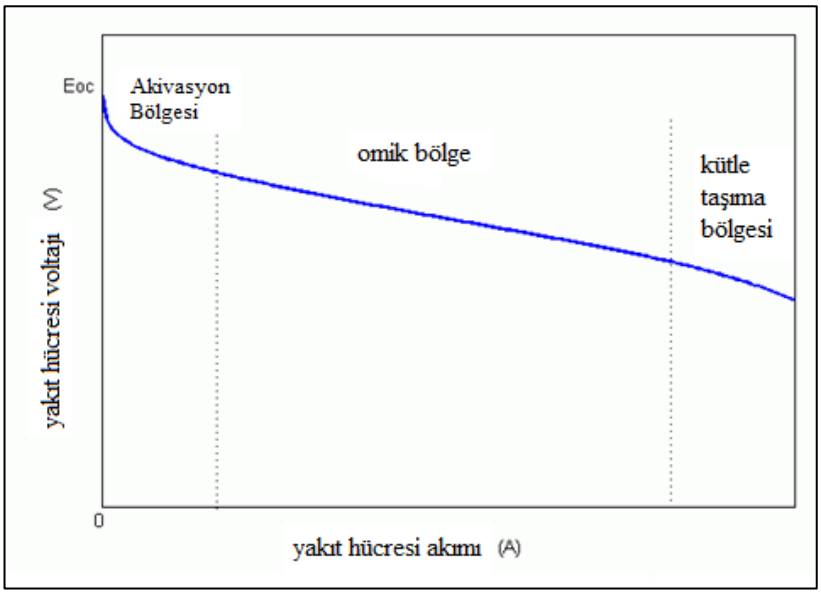
3.2.1 Basitleştirilmiş Model

Bu model, Şekil 3.3 'te gösterilen bir yakıt hücresi yığınının eşdeğer devresine dayanmaktadır.



Şekil 3.3 Yakıt pilinin basitleştirilmiş modeli

Basitleştirilmiş model, nominal sıcaklık ve basınç koşullarında çalışan belirli bir yakıt hücresi yığınını temsil eder. Eşdeğer devrenin parametreleri, üretici veri sayfasından elde edilen polarizasyon eğrisine göre değiştirilebilir. Hesaplanacak parametreler için maskeye 0 ve 1 A'daki gerilim değerini, nominal ve maksimum çalışma noktalarını girmeniz yeterlidir. Negatif akımın yığına akmasını önlemek için bir diyot kullanılır. Tipik bir polarizasyon eğrisi üç bölgeden oluşur. Bu senaryo Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Yakıt pili voltaj bölgeleri

İlk bölge, elektrot yüzeylerinde meydana gelen kimyasal reaksiyonların yavaşlığından kaynaklanan aktivasyon voltaj düşüşünü temsil eder. Sıcaklığa ve çalışma basıncına, elektrot tipine ve kullanılan katalizöre bağlı olarak, bu bölge aşağı veya yukarı genişler. İkinci bölge, yakıt hücresi yığınının iç direncinden kaynaklanan direnç kayıplarını temsil eder. Son olarak, üçüncü bölge, yakıt kullanıldıkça tepkimeye giren maddelerin konsantrasyonundaki değişiklikten kaynaklanan kütle taşıma kayıplarını temsil eder (Tremblay ve Dessaint, 2009).

3.2.2 Detaylı Model

Ayrıntılı model, yakıt ve havanın basınçları, sıcaklığı, bileşimleri ve akış hızları gibi parametreler değiştiği sıradaki belirli bir yakıt hücresi yığınını temsil eder. Blok iletişim kutusundaki Sinyal değişimi bölmesinde hangi parametrelerin değiştirileceğini seçebilirsiniz. Bu değişiklikler, açık devre voltajını (E_{oc}), değişim akımını (i_0) ve Tafel eğimini (A) etkiler. E_{oc}, i_0 ve A aşağıdaki gibi değiştirilir.

$$E_{oc} = K_c E_n \tag{7}$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2}+P_{O_2})\Delta v}{Rh} e^{\frac{-\Delta G}{RT}} \tag{8}$$

$$A = \frac{RT}{zaF} \tag{9}$$

Aşağıdaki koşullarda:

$R = 8{,}3145\ J/(mol\ K)$

$F = 96485\ A\ s/mol$

z = Hareketli elektronların sayısı

E_n = Nernst voltajı. Hücrelerin termodinamik voltajıdır ve yığın içindeki reaktanların ve ürünlerin sıcaklıklarına ve kısmi basınçlarına bağlıdır (V)

α = Yük aktarım katsayısı. Kullanılan elektrotların ve katalizörlerin türüne bağlıdır.

PH_2 = Yığın içindeki kısmi hidrojen basıncı (Pa)

PO_2 = Yığın içindeki kısmi oksijen basıncı (Pa)

k = Boltzmann sabiti = 1,38 × 10–23 J/K

h = Planck sabiti = 6,626 × 10–34 J s

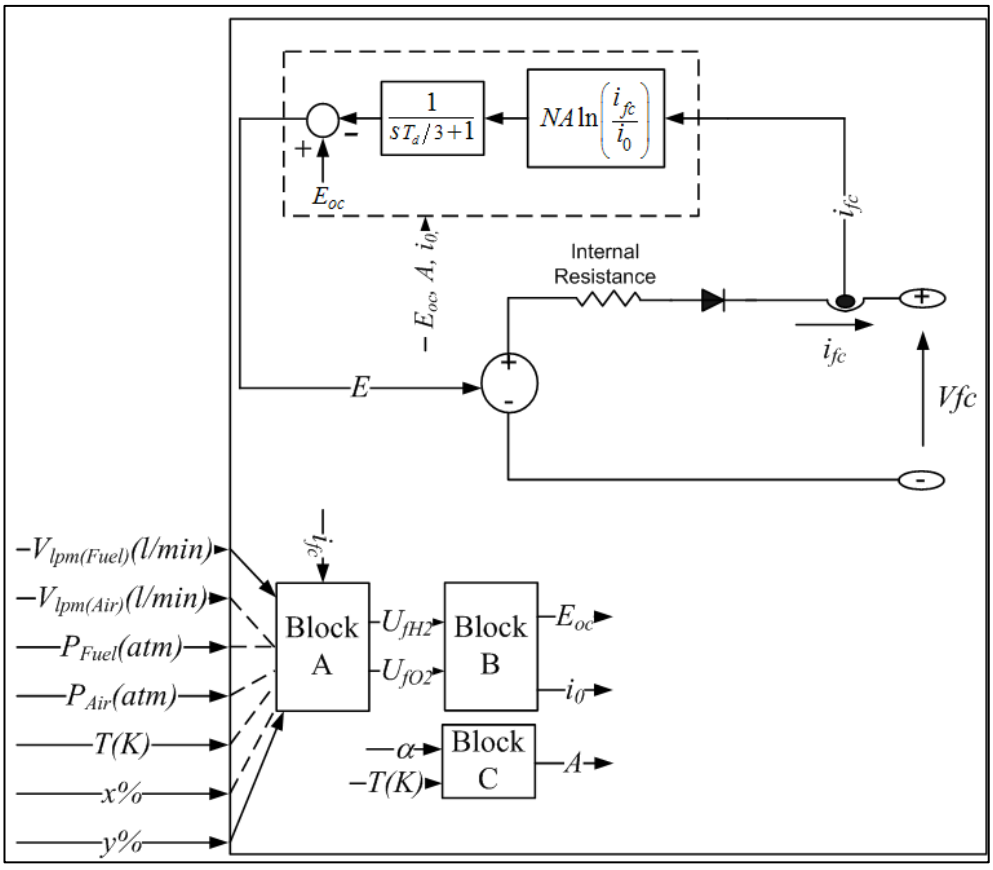
Δv = Aktivasyon bariyeri hacim faktörü (m3). Aktivasyon bariyerinin büyüklüğü (ΔG), Δv = 1 m^3 varsayılarak hesaplanır.

ΔG = Aktivasyon bariyerinin büyüklüğü. Kullanılan elektrot ve katalizör türüne bağlı olarak değişir (J / mol)

T = İşlemdeki sıcaklık (K)

K_c = Nominal çalışma koşulunda gerilim sabiti

Eşdeğer devre, E_{oc}, i_0 ve A parametrelerinin Şekil 3.5'te gösterildiği gibi bağlantılı olması dışında basitleştirilmiş modelle aynıdır.



Şekil 3.5 Yakıt pilinin eşdeğer devresi

Hidrojen (U_{fH2}) ve oksijenin (U_{fO2}) dönüşüm (kullanım) oranları Blok A'da aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$\begin{cases} U_{fH_2} = \dfrac{n^r_{H_2}}{n^{\text{in}}_{H_2}} = \dfrac{60000RTNi_{fc}}{zFP_{\text{fucl}}V_{lpm(\text{fucl})}x\%} \\ U_{fO_2} = \dfrac{n^r_{O_2}}{n^{\text{in}}_{O_2}} = \dfrac{60000RTNi_{fc}}{2zFP_{\text{air}}V_{lpm(\text{air})}y\%} \end{cases} \quad (10)$$

Aşağıdaki koşullarda:

P_{fuel} = Yakıtın mutlak giriş basıncı (atm)
P_{air} = Havanın mutlak giriş basıncı (atm)
$V_{lpm(fuel)}$ = Yakıt debisi (l/min)
$V_{lpm(air)}$ = Hava debisi (l/min)
x = Yakıttaki hidrojen yüzdesi (%)
y = Oksitleyicideki oksijen yüzdesi (%)
N = Hücre sayısı

60000 sabiti, modelde kullanılan litre/dakika akış hızının m^3/sn'ye dönüştürülmesinden gelir (1 litre/dk = 1/60000 m^3/sn).

Kısmi basınçlar ve Nernst voltajı Blok B'de aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$\begin{cases} P_{H_2} = \left(1 - U_{f_{H_2}}\right) x\% P_{\text{fucl}} \\ P_{H_2O} = \left(w + 2y\% U_{f_{O_2}}\right) P_{\text{air}} \\ P_{O_2} = \left(1 - U_{f_{O_2}}\right) y\% P_{\text{air}} \end{cases} \quad (11)$$

ve

$$E_n = \begin{cases} 1.229 + (T - 298)\dfrac{-44.43}{zF} + \dfrac{RT}{zF}\ln\left(P_{H_2}P_{O_2}^{1/2}\right) & \text{when } T \le 100^{\circ}C \\ 1.229 + (T - 298)\dfrac{-44.43}{zF} + \dfrac{RT}{zF}\ln\left(\dfrac{P_{H_2}P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}}\right) & \text{when } T > 100^{\circ}C \end{cases} \quad (12)$$

Aşağıdaki koşullarda:

P_{H2O} = Yığın içindeki kısmi su buharı basıncı (atm)

w = Oksitleyicideki su buharı yüzdesi (%)

Kısmi gaz basınçlarından ve Nernst geriliminden, açık devre geriliminin (E_{oc}) ve değişim akımının (i_0) yeni değerleri hesaplanabilir.

Blok C, Tafel eğiminin (A) yeni değerini hesaplar.

α, ΔG, ve K_c parametreleri, yığının düşük ısıtma değeri (low heating value (LHV)) verimliliği, yakıt ve hava bileşimi, besleme basınçları ve sıcaklıklar gibi bazı ek parametrelerle birlikte nominal çalışma koşullarındaki polarizasyon eğrisine göre hesaplanır. Üreticinin veri sayfasından kolayca elde edilebilirler.

Gazların nominal dönüşüm oranları aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$U_{f_{H_2}} = \frac{\eta_{\text{nom}} \Delta h^0(H_2O(\text{gas}))N}{zFV_{\text{nom}}}$$
$$U_{f_{O_2}} = \frac{60000RT_{\text{nom}}NI_{\text{nom}}}{2zFP_{\text{air}_{\text{nom}}}V_{lpm(\text{air})_{\text{nom}}} \cdot 0.21} \quad (13)$$

Aşağıdaki koşullarda:

η_{nom} = Yığının nominal LHV verimliliği (%)
$\Delta h^0(H_2O(gas))$ = 241,83 × 103 J/mol
V_{nom} = Nominal voltaj (V)
I_{nom} = Nominal akım (A)
$V_{lpm(air)nom}$ = Nominal hava debisi (l/min)
P_{airnom} = Nominal mutlak hava giriş basıncı (Pa)
T_{nom} = Nominal işlem sıcaklığı (K)

Bu dönüşüm oranlarından, gazların nominal kısmi basınçları ve Nernst voltajı türetilebilir. Eoc, i_0 ve A 'nın bilindiği ve yığının nominal durumda, sabit dönüşüm veya kullanım oranlarında çalıştığını varsayarak, α, ΔG ve Kc belirlenebilir.

Yığın girişinde yakıt veya hava yoksa, yığının sabit bir gaz dönüştürme oranında çalıştığı varsayılır (nominal dönüşüm oranı), yani gazların beslemesi akıma göre ayarlanır, böylece her zaman, herhangi bir yükte yığının ihtiyaç duyduğundan biraz daha fazlası sağlanmış olur.

Yığının sağlayabileceği maksimum akım, ulaşılabilen maksimum yakıt ve hava akış hızlarıyla sınırlıdır. Bu maksimum akımın ötesinde, yığının voltaj çıkışı, daha fazla akım çekildikçe aniden azalır.

Yakıt hücresinin dinamikleri, iletişim kutusunda bulunan Yakıt Hücresi Dinamikleri bölmesindeki akış dinamikleri parametreleri (en yüksek kullanım ve ilgili voltaj aşımı) ve yanıt süresinin nitelendirilmesiyle görüntülenebilir.

Yanıt süresi (T_d) @ %95, elektrot/elektrolit arayüzünde yüklerin birikmesi nedeniyle "çift katmanlı şarj" fenomenini modellemek için kullanılır. Bu, eşdeğer devrelerde gösterildiği gibi yalnızca aktivasyon voltajını ($NA\ln(i_{fc}/i_0)$) etkiler.

Oksijen tükenmesinin (hava kompresörü gecikmesinden dolayı) hücre çıkış voltajı üzerindeki etkisini modellemek için pik kullanım ($U_{fO2(peak)}$) ve karşılık gelen voltaj düşüklüğü (V_u) kullanılır. Bu etkiye bağlı olarak Nernst voltajı aşağıdaki şekilde modifiye edilir.

$$E_n = \begin{cases} E_n - K\left(U_{f_{O_2}} - U_{f_{O_2}^{(\text{nom})}}\right) & U_{f_{O_2}} > U_{f_{O_2}^{(\text{nom})}} \\ E_n & U_{f_{O_2}} \leq U_{f_{O_2}^{(\text{nom})}} \end{cases} \tag{14}$$

Aşağıdaki koşullarda:

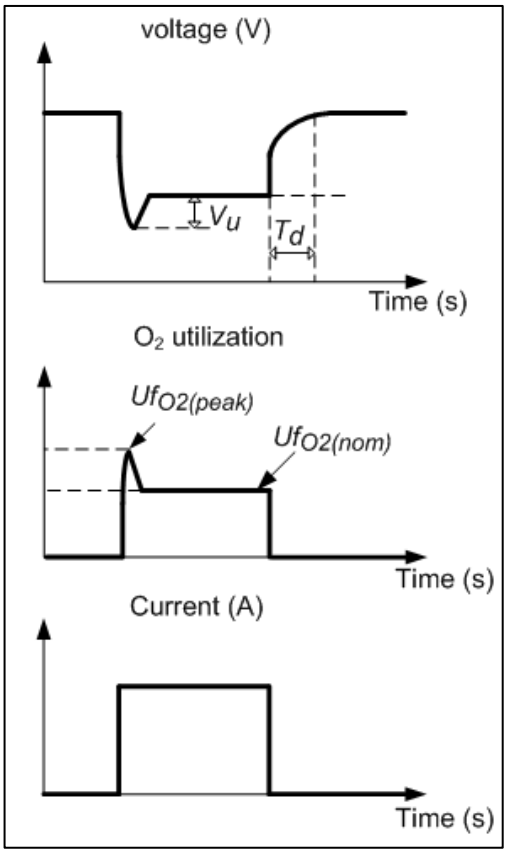
K = Gerilim altında kalma sabiti

$U_{fO2(nom)}$ = Nominal oksijen kullanımı

K aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$K = \frac{V_u}{K_c\left(U_{fO_2(\text{peak})} - U_{fO_2(\text{nom})}\right)} \tag{15}$$

Dinamiklerini doğru bir şekilde temsil etmek için mevcut adım ve kesinti testleri gerçek bir yığın üzerinde yapılmalıdır. Şekil 3.6, bu testlerden ve gerekli parametrelerden (T_d, $Uf_{O2(peak)}$ ve V_u) oluşan yığın tepkisini gösterir. Bu senaryo Şekil 3.6 'da gösterilmektedir.

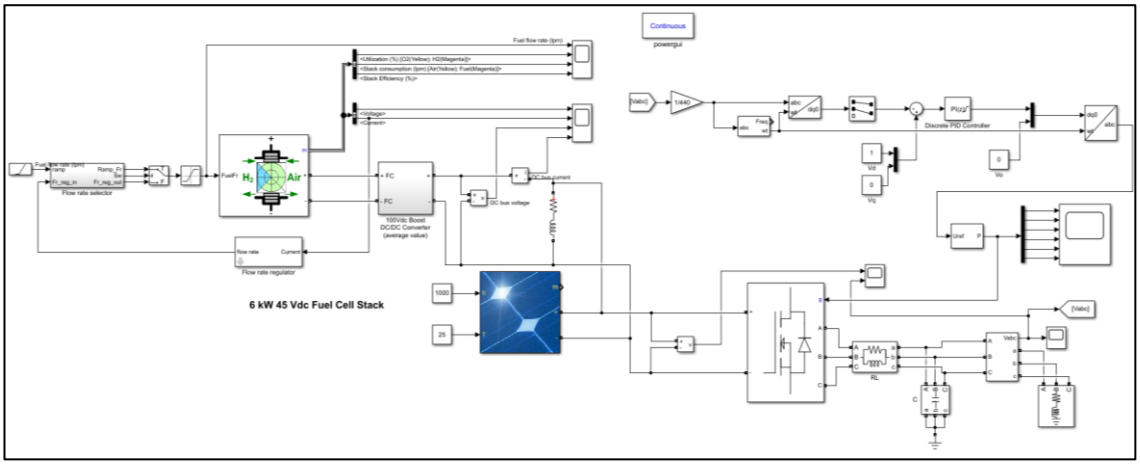


Şekil 3.6 Testlerdeki yığın tepkisi

Tepki süresi (T_d) yakıt hücresi yığınının kendisine bağlıdır ve genellikle veri sayfasında verilir. Akış dinamikleri için parametreler ($Uf_{O2(peak)}$ ve V_u) harici ekipmanın (kompresör, regülatör ve yükler) dinamiklerine bağlıdır ve değerleri kullanıcı uygulamasına göre değiştiği için üreticiler tarafından sağlanamamaktadır. Simülasyon için, yığın nominal geriliminin %60 ila %70'i arasında $Uf_{O2(peak)}$ ve %2-5 arasında V_u değerleri olduğunu varsayınız.

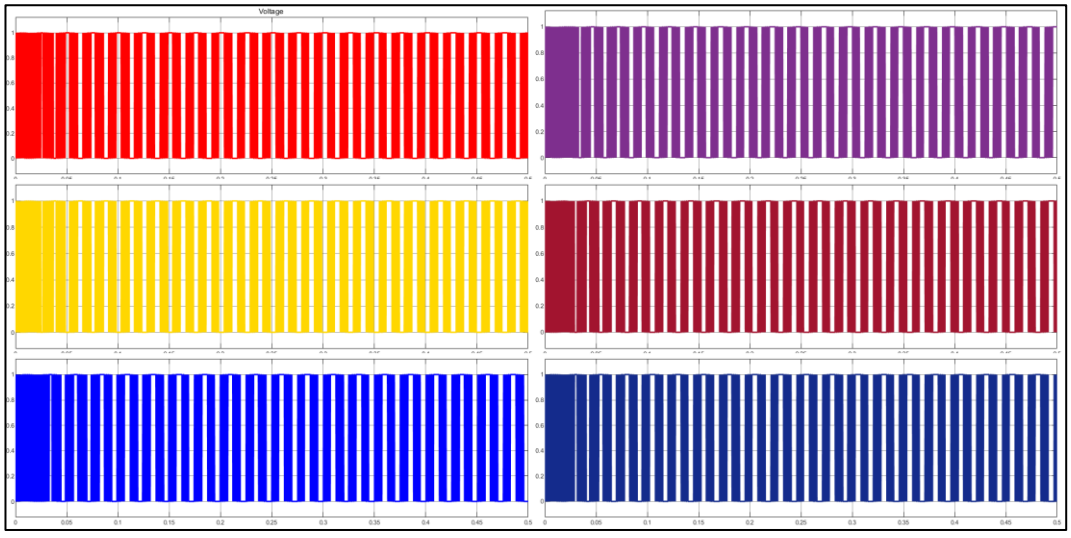
4. SİMÜLASYONUN SONUÇLARI

Simulink modeli MatLAP2020 programlaması ile algoritmanın uygulaması Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



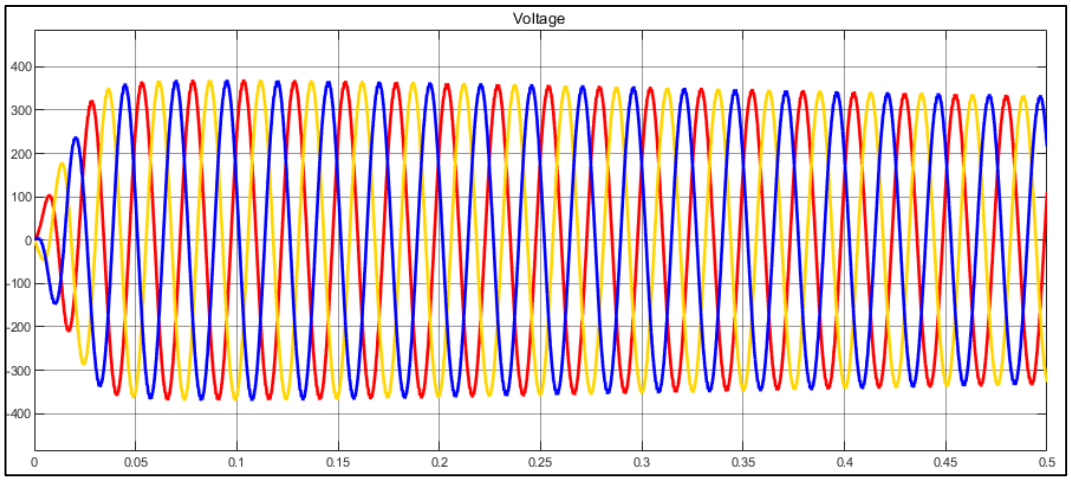
Şekil 4.1 Simülsyon modeli

Simulasyon sonuçları Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Simülasyon sonuçları

Zamana karşı gerilim Şekil 4.3 'te gösterilmektedir.



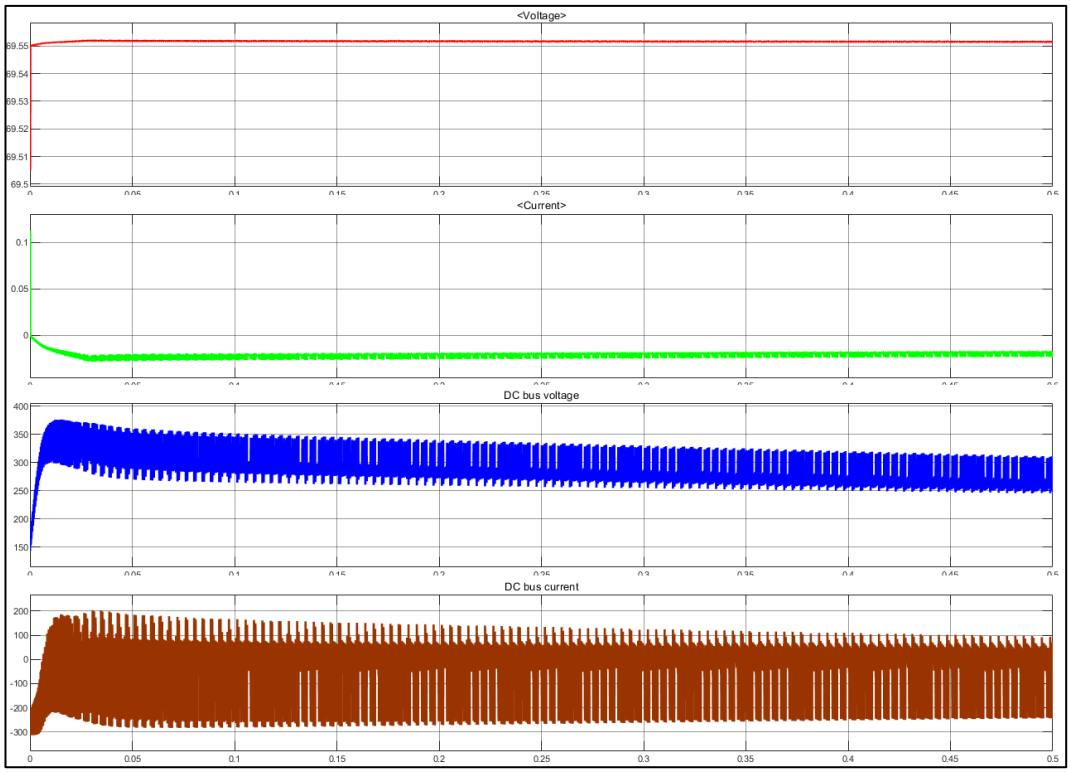
Şekil 4.3 Gerilim vs. zaman

Yakıt akış hızı sonucu Şekil 4.4 'te gösterilmektedir.



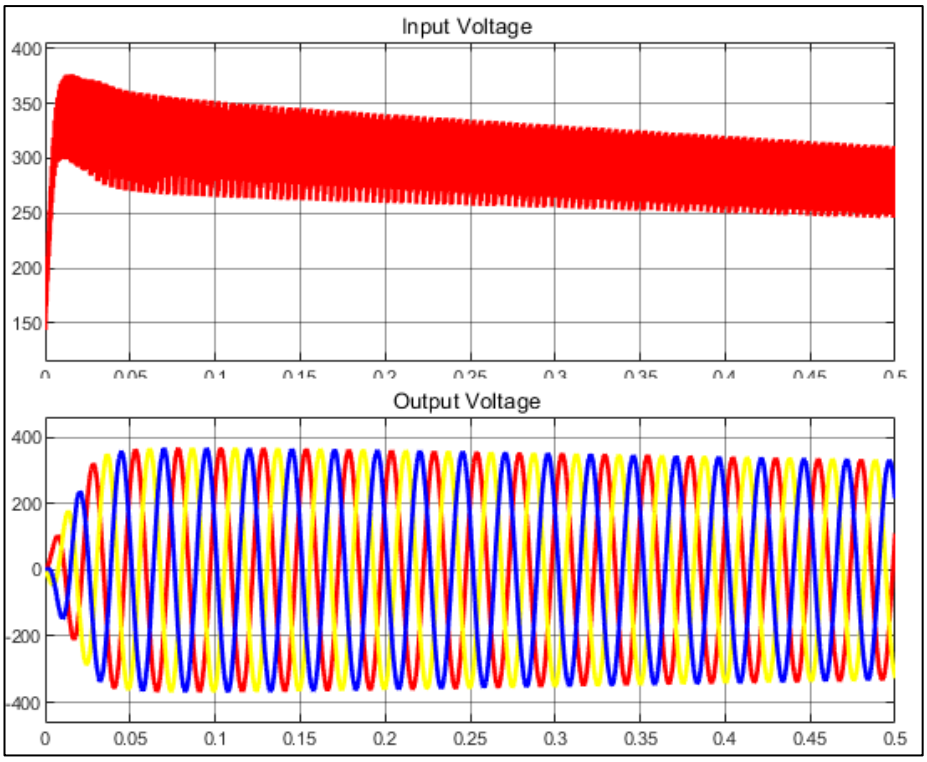
Şekil 4.4 Yakıt akış hızı

Gerilim akım sonucu Şekil 4.5 'te gösterilmektedir.



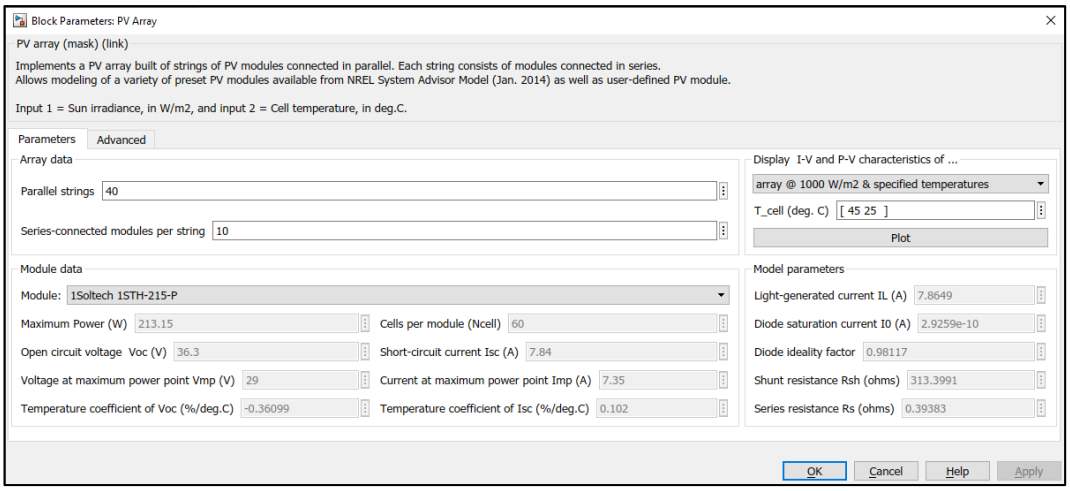
Şekil 4.5 Gerilim akım sonucu

Giriş ve çıkış voltajı sonucu Şekil 4.6 'da gösterilmiştir.



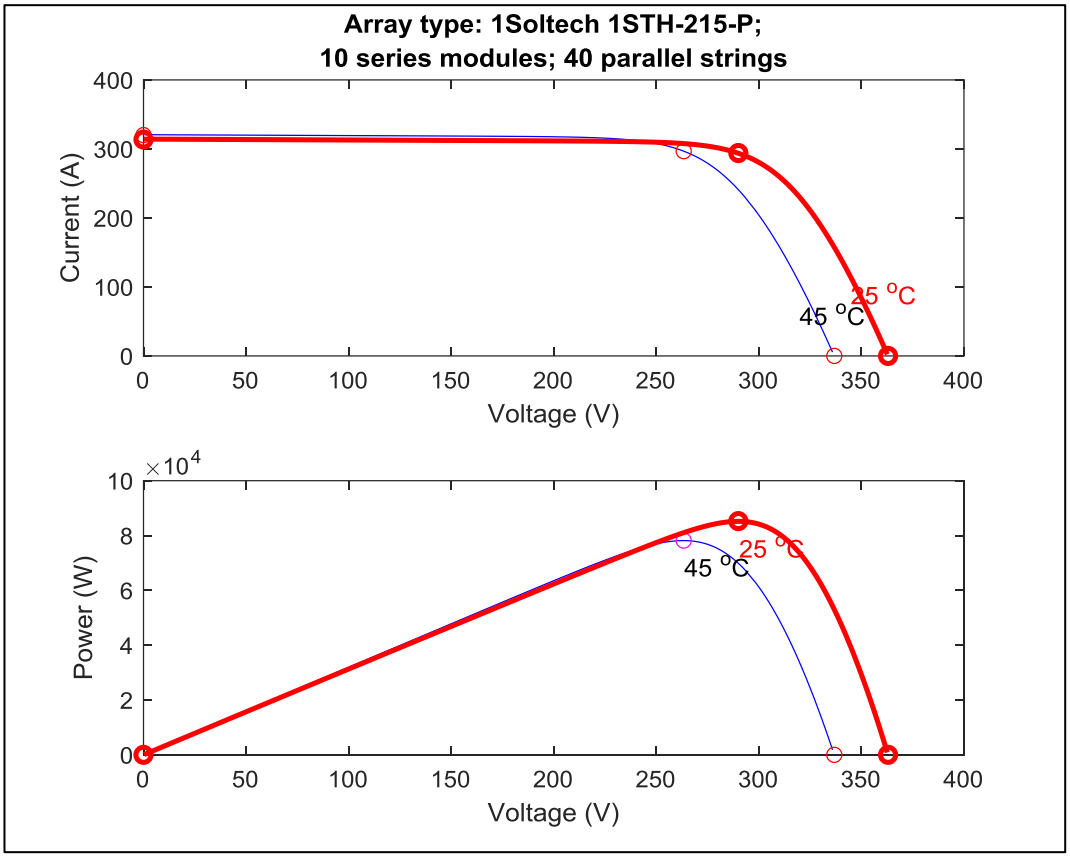
Şekil 4.6 Giriş ve çıkış voltajı

Fotovoltaik sistem özellikleri Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



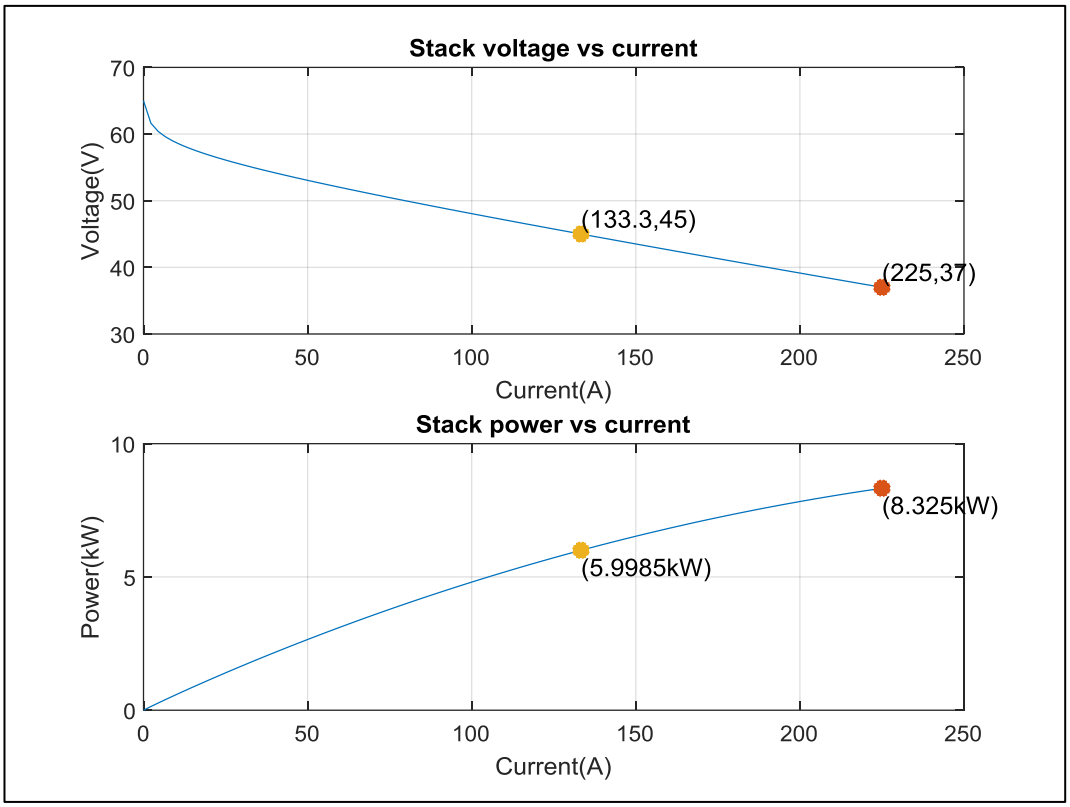
Şekil 4.7 Fotovoltaik sistem özellikleri

MPPT sonuçları şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 MPPT sonuçları

Yakıt hücresi karakterizasyonu Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9 Yakıt hücresi karakterizasyonu

5. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Yakıt hücresi, bir yakıtın (genellikle hidrojen) ve bir oksitleyici maddenin kimyasal enerjisini bir çift redoks reaksiyonu yoluyla elektriğe dönüştüren elektrokimyasal bir hücredir. Yakıt pilleri, kimyasal reaksiyonu sürdürmek için sürekli bir yakıt ve oksijen kaynağına ihtiyaç duyması bakımından çoğu bataryadan farklıdır, oysa bir bataryada, akış pilleri hariç, kimyasal enerji genellikle metallerden ve çoğunlukla bataryada zaten mevcut olan iyon veya oksitlerden gelir. Yakıt hücreleri, yakıt ve oksijen sağlandığı sürece sürekli olarak elektrik üretebilir.

Pek çok yakıt hücresi türü vardır, ancak hepsi bir anot, bir katot ve iyonların, genellikle pozitif yüklü hidrojen iyonlarının (protonlar), yakıt hücresinin iki tarafı arasında hareket etmesini sağlayan bir elektrolitten oluşur. Anotta bir katalizör, yakıtın, iyonları (genellikle pozitif yüklü hidrojen iyonları) ve elektronları üreten oksidasyon reaksiyonlarına girmesine neden olur. İyonlar elektrolit vasıtasıyla anottan katoda hareket eder. Aynı zamanda elektronlar anottan katoda, doğru akım elektriği üreten harici bir devreden geçerek ulaşırlar. Katotta başka bir katalizör, iyonların, elektronların ve oksijenin reaksiyona girerek su ve muhtemelen başka ürünler oluşturmasına neden olur. Yakıt hücreleri, kullandıkları elektrolitin türüne ve proton değişim membranlı yakıt hücreleri (PEM yakıt hücreleri veya PEMFC) için 1 saniye ile katı oksit yakıt hücreleri (SOFC) için 10 dakika arasında değişen başlangıç süresi farkına göre sınıflandırılır. İlgili bir teknoloji, yakıtın yeniden şarj edilerek yenilenebildiği akış pilleridir. Bireysel yakıt hücreleri, yaklaşık 0,7 volt gibi nispeten küçük elektrik potansiyelleri üretir, bu nedenle hücreler, bir uygulamanın gereksinimlerini karşılamak adına yeterli voltajı oluşturabilmek için "istiflenir" veya seri olarak yerleştirilir. Elektriğe ek olarak, yakıt pilleri su, ısı ve yakıt kaynağına bağlı olarak çok az miktarda nitrojen dioksit ve diğer emisyonlar üretir. Bir yakıt hücresinin enerji verimliliği genellikle %40 ile %60 arasındadır; ancak atık ısı bir kojenerasyon planında tutulursa, %85'e varan verimlilikler elde edilebilir.

Son yıllarda yakıt pillerinde araştırma ve geliştirme faaliyetlerine hız verilmiştir. Proton değişim membranı teknolojisinde önemli gelişmeler olmasına rağmen, performans, kararlılık ve güvenilirlik içten yanmalı motorların yerini almak için yeterli

değildir ve yakıt hücresi sistemlerinin maliyeti, kabul edilebilir ticari ürün haline gelmesi için hala çok yüksektir. Çözülmesi gereken en önemli problem, performanslarının iyileştirilmesi ve maliyetlerinin düşürülmesidir. PEM yakıt hücrelerinde, yakıt hücresi membranının dehidrasyonunu önlemek için hidrojen ve hava nemlendirmesi gerekebilir. Yüksek akım debisinde ohmik ısınma, polimer membranda kuruma sorunlarına neden olur ve membrandan iyonik taşınmayı yavaşlatır. Hava tarafında su oluşması nedeniyle bazı yakıt hücresi yığınlarında nemlendirme gerekli değildir. Genel yakıt hücresi sistemlerinde, yakıt hücresi girişlerinde hava veya hidrojen veya hem hava hem de hidrojen için nemlendirme gerekir. Proton değişim membranlarındaki protonik iletkenlik için su içeriği çok önemlidir. Membran dehidrasyonu veya kuruma meydana gelirse, önemli ohmik kayıplar nedeniyle elektrik performansı düşer.Gelecekte, evrişimli sinir ağı, bu yöntemin uygulanması için bir cihaz olarak kullanılabilir. Bu yöntemle yakıt hücresinin gücü artacaktır.

KAYNAKLAR

Andersen, G. K., Klumpner, C., Kjaer, S. B., & Blaabjerg, F., (2002). A new green power inverter for fuel cells," in 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. *Proceedings* (Cat. No. 02CH37289), vol. 2, pp. 727–733.

Arifin, K., Majlan, E. H., Daud, W. R. W. & Kassim, M. B., (2012). "Bimetallic complexes in artificial photosynthesis for hydrogen production: A review," Int. J. *Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 4, pp. 3066–3087.

Carreon-Bautista, S., Erbay, C., Han, A. & Sanchez-Sinencio, E., (2015). An inductorless DC–DC converter for an energy aware power management unit aimed at microbial fuel cell arrays," IEEE *J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 1109–1121.

Cha, H. & Lee, S., (2008). Design and implementation of photovoltaic power conditioning system using a current based maximum power point tracking," *in 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1–5.

Cox, C. R., Lee, J. Z., Nocera, D. G., & Buonassisi, T., (2014). Ten-percent solar-to-fuel conversion with nonprecious materials," Proc. *Natl. Acad*. Sci., vol. 111, no. 39, pp. 14057–14061.

Dargahi, M., Rouhi, J., Rezanejad, M. & Shakeri, M., (2009). Maximum power point tracking for fuel cell in fuel cell/battery hybrid power systems," *Eur. J. Sci*. Res., vol. 25, no. 4, pp. 538–548.

Greenberg, S., Mills, E., Lockhart, D., Sartor, D. & Lintner, W., (1996). The US Department of Energy's In-House Energy Management Program: Meeting the Challenges of Federal Energy Management. *Energy Eng*., vol. 93, no. 2, pp. 9–129.

Hauer, K. H., (2000). Dynamic interaction between the electric drive train and fuel cell system for the case of an indirect methanol fuel cell vehicle, in Collection of Technical Papers. 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (*IECEC*)(Cat. No. 00CH37022), vol. 2, pp. 1317–1325.

Jacobsson, T. J., Fjällström, V., Edoff, M., & Edvinsson, T., (2014). Sustainable solar hydrogen production: from photoelectrochemical cells to PV-electrolyzers and back again, *Energy Environ*. Sci., vol. 7, no. 7, pp. 2056–2070.

Jia, J. et al. (2016). "Solar water splitting by photovoltaic-electrolysis with a solar-to-hydrogen efficiency over 30%," Nat. *Commun*., vol. 7, no. 1, pp. 1–6.

Jiao, J. & Cui, X., (2013). Adaptive control of MPPT for fuel cell power system," J. Converg. Inf. *Technol*., vol. 8, no. 4.

Karami, N., El Khoury, L., Khoury, G. & Moubayed, N., (2014). Comparative study between P&O and incremental conductance for fuel cell MPPT in *International Conference on Renewable Energies for Developing Countries*, pp. 17–22.

Kim, Y. H. & Kim, S. S., (1999). An electrical modeling and fuzzy logic control of a fuel cell generation system," *IEEE* Trans. Energy Convers., vol. 14, no. 2, pp. 239–244.

Lu, J. & Zahedi, A., (2010). Maximum efficiency point tracking control for fuel cell power systems," *in 2010 International Conference on Power System Technology*, pp. 1–6.

Najjar, Y. S. H., (2008). Modern and appropriate technologies for the reduction of gaseous pollutants and their effects on the environment, Clean Technol. Environ. *Policy*, vol. 10, no. 3, pp. 269–278.

O'hayre, R., Cha, S. W., Colella, W. & Prinz, F. B., (2016). Fuel cell fundamentals. *John Wiley & Sons*.

Ochedi, F. O., Yu, J., Yu, H., Liu, Y. & Hussain, A., (2020). Carbon dioxide capture using liquid absorption methods: a review," *Environ. Chem*. Lett., pp. 1–33.

Pukrushpan, J. T., Peng, H. & Stefanopoulou, A. G., (2002). Simulation and analysis of transient fuel cell system performance based on a dynamic reactant flow model," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, vol. 36290, pp. 637–648.

Rambabu, C., Kumar, M. S. & Harish, N. S., (2012). Design Of MPPT Based Hybrid Wind And Fuel-Cell Energy System," *Int. J. Comput. Sci. Commun*. Networks, vol. 1, no. 3, pp. 297–304.

Santi, E., Franzoni, D., Monti, A., Patterson, D., Ponci, F. & Barry, N., (2002). A fuel cell based domestic uninterruptible power supply," in APEC. *Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition* (Cat. No. 02CH37335), vol. 1, pp. 605–613.

Ted, H. Y., Liu, W. G., Sha, Y., V Merinov, B., Shirvanian, P. & Goddard, W. A., (2013). The effect of different environments on Nafion degradation: Quantum mechanics study, J. *Memb*. Sci., vol. 437, pp. 276–285.

Tremblay, O. & Dessaint, L. A., (2009). A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles," in 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 1722–1729.

Wang, M. H., Yau, H. T. & Wang, T.-Y., (2013). Extension sliding mode controller for maximum power point tracking of hydrogen fuel cells," *in Abstract and Applied Analysis*, 2013, vol.

Yu, T. H. et al., (2013). Finding correlations of the oxygen reduction reaction activity of transition metal catalysts with parameters obtained from quantum mechanics," J. Phys. *Chem*. C, vol. 117, no. 50, pp. 26598–26607.

Yu, T. H., Sha, Y., Liu, W. G., V Merinov, B., Shirvanian, P. & Goddard, W. A., (2011). Mechanism for degradation of Nafion in PEM fuel cells from quantum mechanics calculations," J. Am. *Chem*. Soc., vol. 133, no. 49, pp. 19857–19863.

Zaki, A. M., Amer, S. I. & Mostafa, M., (2012). Maximum power point tracking for PV system using advanced neural networks technique, *Int. J. Emerg. Technol*. Adv. Eng., vol. 2, no. 12, pp. 58–63.

Zhong, Z., Huo, H., Zhu, X., Cao, G., & Ren, Y., (2008). Adaptive maximum power point tracking control of fuel cell power plants, *J. Power Sources*, vol. 176, no. 1, pp. 259–269.

Zhou, X. et al., (2016). "Solar-driven reduction of 1 atm of CO_2 to formate at 10% energy-conversion efficiency by use of a TiO_2-protected III–V tandem photoanode in conjunction with a bipolar membrane and a Pd/C cathode," *ACS Energy Lett*., vol. 1, no. 4, pp. 764–770.

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Mohamed Fouzi Mohamed Ben Oun
Doğum Yeri ve Yılı : Janzour,1983
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : Arapça ve Türkçe

Eğitim Durumu

Lise : Elektrik ve Mekanik Meslekler Enstitüsü /Janzour,2000
Lisans : Janzour Teknoloji ve Mühendislik / Janzour,2005