

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

PEM YAKIT PİLLERİNİN
MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Ümit UYSAL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

DANIŞMAN
Prof. Dr. Selim SİVRİOĞLU

GEBZE
2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

PEM YAKIT PİLLERİNİN
MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Ümit UYSAL
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

GEBZE
2009

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI: PEM Yakıt Pillerinin Modellenmesi ve Simülasyonu

YAZAR ADI : Ümit Uysal

Hızla artan enerji ihtiyacı, sınırlı miktarda olan fosil yakıtlar ve çevreye dostu enerji arayışları yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Polimer elektrolit yakıt pilleri yüksek güç yoğunluğu, yüksek güç dönüşüm verimleri, düşük sıcaklıkta çalışmaları gibi özellikleri sayesinde geniş kullanım alanları bulmaktadır. PEM yakıt pillerinin davranışı oldukça nonlineerdir ve sıcaklık, reaksiyon basıncı, membran suyu, reaksiyon konsantrasyonu, elektriksel yük gibi birçok değişik faktöre bağlıdır. PEM yakıt pillerinin matematiksel olarak modellenmesi ile yakıt pili davranışını tahmin etmek, performansını arttırmak ve güç tahrik sistemi uygulamalarında enerji kaynağı olarak kullanılma potansiyelini ortaya çıkarmak açısından önemlidir.

Bu çalışmada ilk olarak PEM yakıt pilleri, süperkapasitörler ve konvertörler hakkında genel bilgiler verildi. Daha sonra her bir sistem için ayrı modeller oluşturularak sistemin tasarımı yapıldı. Son bölümde polimer elektrolit yakıt pili simülasyonu gerçekleştirilerek yakıt pilinin karakteri hakkında yorumlar yapıldı. Yine bu bölümde tasarım çalışmaları yapıldı. İlk tasarım olarak yakıt piline konvertör eklenerek çıkış gerilimi düzenlendi ve güç ihtiyacını hangi durumda karşılayabileceği belirlendi. İkinci tasarım çalışmasında ise yakıt pilinin ana enerji kaynağı, süperkapasitörün ise enerji depolamak için kullanıldığı bir yapı ele alındı. Yakıt pilinin güç ihtiyacını karşılayamadığı anlık durumlarda aradaki toplam güç farkını süperkapasitörün karşılaması, güç ihtiyacının düşük olduğu durumlarda ise yakıt pilinin süperkapasitörü şarj etmesi incelenmiştir.

SUMMARY

THESIS TITLE : Modeling and Simulation of PEM Fuel Cells

AUTHOR NAME : Ümit Uysal

The energy demand which is increasing rapidly, limited fossil fuels and researches for environmentally friendly energy, increase the attention to the renewable energy sources. Fuel cells which use hydrogen as fuel, is one example of renewable energy sources. Polymer electrolyte (PEM) fuel cell has a huge field of usage with properties such as high power density, high power conversion density and working at low temperature. PEM fuel cell behavior is quite nonlinear and its behavior depends on such as temperature, pressure, membrane dryness, reaction concentration, electrical load. Mathematical modeling of PEM fuel cell is important as estimating fuel cell behavior, improving performance and ability to use energy source in power drive system applications.

Firstly, in this study, some general information about Polymer electrolyte fuel cells, supercapacitors and converters were given. And then, the design of system was created for each part by planning own models. In the last section, some comments were given for fuel cell character by simulating Polymer electrolyte fuel cell. And designing studies were made here, either. For first design, output voltage has been regulated by adding converters to the fuel cell and also the power demand conditions which could be supplied have been determined. In the second design, a construction in which fuel cell was used as main energy source and super-capacitor was used as energy storage, has been considered. The cases that when the fuel cell could not supply power requirement, super-capacitor meet the difference and when the power requirement was low, the fuel cell has charged the supercapacitor were studied.

TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmam süresince beni yönlendiren, değerli bilgisiyle bana yardımcı olan hocam Prof. Dr. Selim Sivrioğlu'na en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Hayatım boyunca beni hiç yalnız bırakmayan ve desteklerini esirgemeyen anne ve babama, bana yardımcı olan değerli arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Saygılarımla

Ümit Uysal

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜRLER	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. YAKIT PİLLERİ	3
2.1. Yakıt Pili Çeşitleri	6
2.2. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)	7
2.2.1. PEM Yakıt Pili Çalışma Prensibi	8
2.2.2. PEM Yakıt Pili Yapısı	9
2.2.3. PEM Yakıt Pili Avantaıları ve Dezavantaıları	15
2.2.4. Yakıt pili Uygulamaları	16
3. SÜPERKAPASİTÖRLER	22
3.1. Süperkapasitörlerin Karakteristikleri	24
4. DC-DC KONVERTÖRLER	26
4.1. İzolesiz Temel Dc-Dc Konvertörler	27
4.1.1. Artıran Tip (Boost) Konvertör	27
4.1.2. Azaltan Tip (Buck) Konvertör	29
4.1.3. Artıran-Azaltan Tip (Buck-Boost) Konvertör	31
4.2. İzoleli Dc-Dc Konvertörler	33
4.2.1. Geri Dönüşlü (Fly-Back) Konvertörler	33
4.2.2. İtme-Çekme (Push-Pull) Konvertörler	34
4.2.3. Yarım Köprü (Half Bridge) Konvertörler	35
4.2.4. Tam Köprü (Full Bridge) Konvertörler	36
5. PEM YAKIT PİLİNİN MODELLENMESİ	38
5.1. Modellenen PEM Yakıt Pili Sistemi	38
5.2. PEM Yakıt Pili Gerilimi	41
5.2.1. Tersinir Hücre Voltajı	41

5.2.2. Aktivasyon Voltaj Düşüşü	43
5.2.3. Ohmik Voltaj Kayıpları	44
5.2.4. Konsantrasyon Voltaj Düşüşü	45
5.2.5. Dinamik Hücre Modeli	46
5.2.6. PEM Yakıt Pili Gerilim Model Yapısı	47
5.3. PEM Yakıt Pili Akış Modeli	50
5.4. PEM Yakıt Pili Termal Modeli	53
5.5. PEM Yakıt Pili Toplam Sistem Modeli	59
6. SÜPERKAPASİTÖR MODELLENMESİ	61
6.1. Süperkapasitör Şarj ve Deşarj Kontrolü	65
7. ARTIRAN TİP (BOOST) KONVERTÖR MODELLEME	67
7.1. Artıran Tip Konvertör Kontrolü	73
8. PEM YAKIT PİLİ SİMÜLASYONLARI	76
8.1. Tek Hücre Simülasyonları	76
8.2. Yığın (Stack) Simülasyonları	83
8.2.1. Yığın Sisteminin Termal Cevabı	85
8.3. Sistem Dizayn Çalışması	87
8.3.1. Dizayn 1: Yakıt Pili ve Konvertör Sisteminin Uygulanan Yüke Tepkisi	87
8.3.2. Dizayn 2: Pem Yakıt Pili ve Süperkapasitör Sisteminin Uygulanan Yüke Tepkisi	91
9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
10. KAYNAKLAR	96
11. ÖZGEÇMİŞ	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

PEM	:Polimer Elektrolit yakıt Pili	
A	:PEM yakıt pili membran aktif alanı	$[cm^2]$
l	:membran kalınlığı	$[\mu m]$
P_{H_2}	:Hidrojen basıncı	$[atm]$
P_W	:Valf sonrası basınç	$[atm]$
P_{BPR}	:Karşı basınç	$[atm]$
P_{O_2}	:Oksijen basıncı	$[atm]$
n	:PEM yakıt pili hücre sayısı	
$B, \xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \psi$	:PEM yakıt pili parametrik katsayıları	
J_{max}	:Maksimum akım yoğunluğu	$[mA/cm^2]$
V_{FC}	:PEM yakıt pili hücre gerilimi	$[V]$
i_{FC}	:PEM yakıt pili hücre akımı	$[A]$
E_{Nernst}	:Nernst gerilimi	$[V]$
V_{act}	:Aktivasyon voltaj düşüşü	$[V]$
V_{ohmic}	:Ohmik voldtaj düşüşü	$[V]$
V_{con}	:konsantrasyon voltaj düşüşü	$[V]$
V_{stack}	:Yığın (Stack) gerilimi	$[V]$
ΔG	:Gibbs serbest enerjisi	$[J/mol]$
ΔH	:Entalpi değişimi	$[J/mol]$
T	:Sıcaklık	$[Kelvin]$
T_{ref}	:Referans sıcaklık	$[Kelvin]$
ΔS	:Entropi değişimi	$[J/mol.K]$
$W_{elektrik}$	:Elektriksel enerji	$[J/mol]$
Q	:Elektriksel yük	$[C]$
E	:Elektriksel gerilim	$[V]$
F	:Faraday sabiti	$[C]$

R	:Üniversal gaz sabiti	$[J/K.mol]$
c_{O_2}	:Oksijen konsantrasyonu	
R_M	:Membranın eşdeğer direnci	$[\Omega]$
ρ_M	:Membran öz direnci	$[\Omega/cm]$
τ	:Zaman katsayısı	
C	:Sistemin eşdeğer kapasitansı	$[Farad]$
R_a	:Sistemin eşdeğer direnci	$[\Omega]$
V_a	:Anot hacmi	$[m^3]$
V_C	:Katot hacmi	$[m^3]$
$\dot{m}_{H_2,in}$	:Hidrojenin giriş debisi	$[mol/s]$
$\dot{m}_{H_2,out}$	:hidrojenin çıkış debisi	$[mol/s]$
$\dot{m}_{O_2,in}$	:Oksijenin giriş debisi	$[mol/s]$
$\dot{m}_{O_2,out}$	:Oksijenin çıkış debisi	$[mol/s]$
k_a	:Anot debi sabiti	$[mol / s.atm]$
k_C	:Katot debi sabiti	$[mol / s.atm]$
FR_{H_2}	:Hidrojenin akış oranı	$[mol/s]$
PC_{H_2}	:Hidrojenin saflık oranı	
CF_{H_2}	:hidrojenin akış dönüşüm faktörü	
C_t	:Termal kapasitans	$[J/C]$
Q_{stack}	:PEM yakıt hücresinin ısı absorpsiyonu	$[J/s]$
P_{tot}	:PEM yakıt piline verilen toplam güç	$[W]$
P_{elec}	:Elektriksek olarak tüketilen güç	$[W]$
Q_{cool}	:Soğutma ısı kaybı	$[W]$
Q_{loss}	:PEM yakıt pili yüzeyinden ısı kaybı	$[W]$
UA_{HX}	:Isı değiştirgeci boyut parametresi	$[W/C]$
$T_{CW,in}$	:Isı değiştirgeci giriş sıcaklığı	$[K]$
$T_{CW,out}$	: Isı değiştirgeci çıkış sıcaklığı	$[K]$

h_{cond}	: Isı değiştirgeci iletim katsayısı	$[W/C]$
h_{conv}	: Isı değiştirgeci taşınım katsayısı	$[W/A.^{\circ}C]$
R_t	: Hücresinin ısısal direnci	$[^{\circ}C/W]$
C	: Ortalama özgül ısı	$[kJ/K]$
m	: paralel hücre sayısı	
n	: seri hücre sayısı	
C_{sistem}	: Modül eşdeğer kapasitans	$[F]$
R_{sistem}	: Modül eşdeğer direnci	$[Ohm]$
V_{sistem}	: Modül gerilimi	$[V]$
I_{sistem}	: Modül akımı	$[A]$
C	: Kapasitans	$[F]$
V_{SC}	: Süperkapasitör gerilimi	$[V]$
i_{SC}	: Süperkapasitör akımı	$[A]$
i_0	: Süperkapasitörde biriken net akım	$[A]$
R_1	: şarj direnci	$[Ohm]$
R_2	: Deşarj direnci	
	$[Ohm]$	
E_{SC}	: Süperkapasitörde biriken enerji	
	$[Joule]$	
$V_{SC,ILK}$	: Süperkapasitörün bařlangıçtaki gerilimi	$[V]$
$V_{SC,SON}$	: Süperkapasitörün son gerilimi	$[V]$
L	: İndüktans	$[Henry]$
C	: Kapasitans	$[Farad]$
ΔI_L	: İndüktans akımı	$[A]$
V_s	: Konvertör giriş gerilimi	$[V]$
V_0	: Konvertör çıkış gerilimi	$[V]$
D	: Doluluk oranı	
R	: Direnç	$[Ohm]$
f	: Frekans	$[Hz]$

$I_{L,\max}$:Maksimum indüktans akımı $[A]$

$I_{L,\min}$:Minimum indüktans akımı $[A]$

$I_{C,\max}$:Maksimum kapasitans akımı $[A]$

$I_{C,\min}$:Minimum kapasitans akımı $[A]$

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Yakıt Pili'nin yapısı	3
Şekil 2. 2. Yakıt hücresi ve Yığın (Stack) gösterimi	4
Şekil 2. 3. Yakıt pili sistemi	5
Şekil 2. 4. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili'nin yapısı	9
Şekil 2. 5. Nafion tipi membran malzemesinin yapısı	10
Şekil 2. 6. Gaz Difüzyon Tabakası	12
Şekil 2. 7. PEM yakıt pili elektrot yapısı	13
Şekil 2. 8. PEM yakıt pillerinde kullanılan gaz akış kanalları	15
Şekil 2. 9. Ballard 250 kW PEM yakıt pili sabit uygulaması	17
Şekil 2. 10. Vaillant firmasının ürettiği PEM yakıt pili	18
Şekil 2. 11. Honda'nın PEM yakıt pili kullandığı otomobil	19
Şekil 2. 12. PEM yakıt pilinin kullanıldığı çeşitli araçlar	20
Şekil 2. 13. Casio'nun dizüstü bilgisayarlar için üretmiş olduğu PEM yakıt pili	21
Şekil 3. 1. (a) Süperkapasitör'ün yapısı (b) Süperkapasitör devre modeli	22
Şekil 3. 2. Çeşitli depolama araçlarının karşılaştırılması	23
Şekil 3. 3. Süperkapasitör modülü ve süperkapasitörlerin bağlantıları	24
Şekil 3. 4. Süperkapasitör voltajını etkileyen unsurlar	25
Şekil 4. 1. Artıran tip konvertörün devre şeması ve anahtarın iletim ve kesim durumu	28
Şekil 4. 2. Azaltan tip konvertörün devre şeması ve anahtarın iletim ve kesim durumu	30
Şekil 4. 3. Artıran azaltan tip (buck-boost) konvertör devre şeması ve anahtarın iletim ve kesim durumu	32
Şekil 4. 4. Geri dönüşlü (Fly-back) konvertör (a) Devre yapısı (b) Dalga şekilleri	34
Şekil 4. 5. İtme-çekme konvertör devre yapısı	35
Şekil 4. 6. Yarım köprü konvertör devre yapısı	36
Şekil 4. 7. Tam köprü çevirici konvertör devre yapısı	37
Şekil 5. 1. Modellenen Yakıt Pili Sistemi	39
Şekil 5. 2. PEM yakıt pili gerilim simülasyon bloğu	48
Şekil 5. 3. Nernst denklemi simülasyon bloğu	48

Şekil 5. 4. Ohmik voltaj düşüşü simülasyon bloğu	49
Şekil 5. 5. Aktivasyon voltaj düşüşü simülasyon bloğu	49
Şekil 5. 6. Konsantrasyon voltaj düşüşü simülasyon bloğu	49
Şekil 5. 7. PEM yakıt pili anot tarafı simülasyon blok yapısı	52
Şekil 5. 8. PEM yakıt pili katot tarafı simülasyon blok yapısı	53
Şekil 5. 9. PEM yakıt pili termal model yapısı	54
Şekil 5. 10. PEM yakıt pili termal model simülasyon blok yapısı	59
Şekil 5. 11. PEM yakıt pili toplam sistem modeli	60
Şekil 6. 1. Süperkapasitör eşdeğer devresi şeması	61
Şekil 6. 2. Süperkapasitörlerin bağlantı şekilleri	62
Şekil 6. 3. Süperkapasitör simülasyon modeli	64
Şekil 6. 4. Süperkapasitör şarj-deşarj kontrolü ve sisteme uygulanması	65
Şekil 6. 5. Süperkapasitör şarj vedeşarj kontrol modeli	66
Şekil 7. 1. Artıran tip konvertör devre yapısı	67
Şekil 7. 2. Tepeden tepeye akım değişimi grafiği	70
Şekil 7. 3. Diyot üzerindeki ortalama akım grafiği	70
Şekil 7. 4. Kapasitör akımı dalga şekilleri	71
Şekil 7. 5. Atıran tip (Boost) konvertör simülasyon modeli	73
Şekil 7. 6. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) yapısı	74
Şekil 7. 7. Darbe genişlik modülasyonu karşılaştırma işaretleri	74
Şekil 7. 8. Artıran tip konvertörün kontrol simülasyon modeli	75
Şekil 8. 1. PEM yakıt piline giriş olarak lineer olarak artan yük uygulaması	76
Şekil 8. 2. Sabit basınç ve sıcaklıkta PEM yakıt pilinin polarizasyon eğrisi	77
Şekil 8. 3. Sabit basınç, farklı sıcaklıkta PEM yakıt pili polarizasyon eğrisi	78
Şekil 8. 4. PEM yakıt pili sabit basınç, farklı sıcaklık için Güç-Akım grafiği	79
Şekil 8. 5. Sabit sıcaklık, farklı basınçlarda PEM yakıt pili polarizasyon eğrisi	80
Şekil 8. 6. Sabit sıcaklık, farklı basınçlarda PEM yakıt pili Güç-Akım grafiği	81
Şekil 8. 7. Talep edilen yük	82
Şekil 8. 8. Hücrenin talep edilen yüke tepkisi	82
Şekil 8. 9. Yığın'ın talep edilen yüke verdiği tepkinin simülasyon modeli	83
Şekil 8. 10. Talep edilen yük	83
Şekil 8. 11. PEM yakıt pilinin geçici durumlara tepkisi	84
Şekil 8. 12. Yığın'ın talep edilen termal cevap modeli	85
Şekil 8. 13. Termal model için yük talebi	86

Şekil 8. 14. PEM yakıt pili yığının sıcaklık değişimi	86
Şekil 8. 15. Yakıt pili ve konvertör sisteminin simülasyon bloğu	87
Şekil 8. 16. Talep edilen yük	88
Şekil 8. 17. PEM yakıt pili ve konvertör sisteminin yük ihtiyacına verdiği cevap	89
Şekil 8. 18. Talep edilen yeni yük	89
Şekil 8. 19. PEM yakıt pili ve konvertör sisteminin artan yük ihtiyacına verdiği cevap	90
Şekil 8. 20. PEM yakıt pili ve süperkapasitör simülasyon bloğu	91
Şekil 8. 21. Talep edilen yükün zaman göre değişimi	92
Şekil 8. 22. Yük ihtiyacına cevap veren PEM yakıt pili ve süperkapasitörün gerilimi	93
Şekil 8. 23. Yük talebi karşısında PEM yakıt pili ve süperkapasitör güç değişimleri	94

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2. 1. Yakıt pillerinin sınıflandırılması ve özellikleri	7
Tablo 3. 1. Süperkapasitör ve diğer depolama araçlarının karşılaştırılması	24
Tablo 4. 1. DC-DC Konvertörlerin sınıflandırılması	26
Tablo 5. 1. Modellenen yakıt pili parametreleri	39
Tablo 6. 1. Modellenen süperkapasitörün özellikleri	63

1 GİRİŞ

Sanayileşme ve nüfus artışıyla birlikte enerji ihtiyacının artmasıyla fosil yakıtlara olan talep artmıştır. Bunun sonucu olarak da hava kirliliği, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi ciddi sorunlar ortaya çıkmıştır. Bunun yanında, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve hızla tükenmesi alternatif enerji kaynakları arayışını doğurmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları bu tedbir, endişe ve sorunlara çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Hidrojen enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biridir. Hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleri de bu enerjinin en önemli kullanım alanlarından[1].

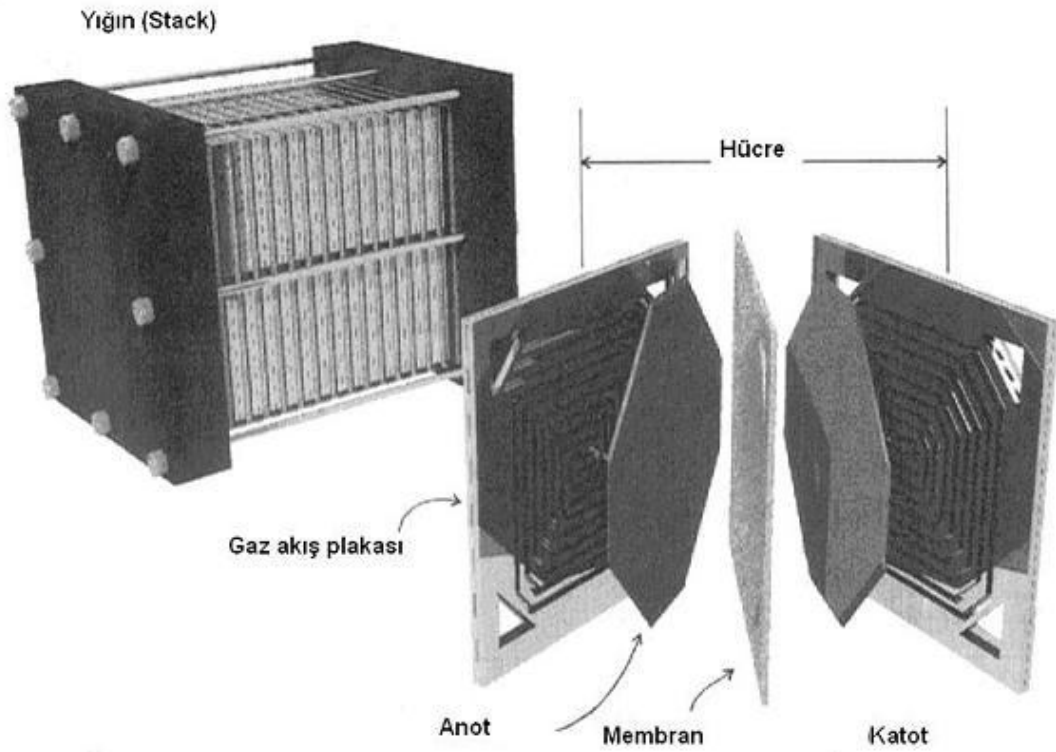
Kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren ve hidrojeni yakıt olarak kullanan yakıt hücreleri, enerji dönüşüm teknolojilerinden biridir. Yakıt pilleri, yakıt olarak kullanılan hidrojen ile oksijenin elektro-kimyasal reaksiyonu sonucunda enerji üretirler. Yakıt pillerinde kimyasal enerji, ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü olmadan, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu kimyasal süreçte içten yanmalı motorlarda olduğu gibi yanma evresi olmadığından temiz enerji kaynağıdırlar. Çevreye zararı olan atık maddeler üretmezler. Ayrıca, elektrik enerjisinin yüksek verimlilik ile elde edilmesine olanak sağlarlar. Polimer elektrolit membran yakıt pilleri yüksek enerji yoğunlukları ve düşük işletme sıcaklıkları gibi özellikleri sayesinde yenilenebilir enerji kaynağı uygulamaları için diğer yakıt pillerine tercih edilirler. PEM yakıt pillerinin davranışı oldukça nonlineerdir ve sıcaklık, reaksiyon basıncı, membran suyu, reaksiyon konsantrasyonu, elektriksel yük gibi birçok değişik faktöre bağlıdır. PEM yakıt pillerinin matematiksel olarak modellenmesi ile yakıt pili davranışını tahmin etmek, performansını arttırmak ve güç tahrik sistemi uygulamalarında enerji kaynağı olarak kullanılma potansiyelini ortaya çıkarmak açısından önemlidir.

Yakıt pili üzerindeki çalışmalarda hücre düzeyinde, yığın (stack) düzeyinde ve sistem düzeyinde yapılmaktadır. Hücre düzeyinde yapılan çalışmalar daha çok

membran ve gaz difüzyon tabakası geliştirmeye yöneliktir. Yığın düzeyinde yapılan çalışmalarda ise akış plakalarının geliştirilmesi, termal analizlerin yapılması ve gaz basıncının yığın üzerine etkileri incelenmektedir. Bu tezde yakıt pili, yakıt besleme ünitesi, sıcaklık kontrol ünitesi, güç dönüşüm üniteleri, enerji depolama birimleri birlikte kullanılacak şekilde “sistem düzeyinde” incelenecektir.

Enerji depolama sistemlerinden biri olan süperkapasitörler çok büyük miktarlardaki gücü çok hızlı bir biçimde verebilme özelliğine sahiptir. Yakıt pili ve süperkapasitör kaynaklarının birlikte kullanılmasıyla hem verimi artırmak hem de kaynaklardan birinin olmaması veya azalması durumunda diğerinin sistemin enerji ihtiyacını karşılaması amaçlanmaktadır. Bunun için PEM yakıt pili, süperkapasitör, dc-dc konvertörler modellenmiş, simülasyonu yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Bu sistemlerin modellenmesi ve simülasyonları için Matlab/Simulink yazılımı kullanılmıştır

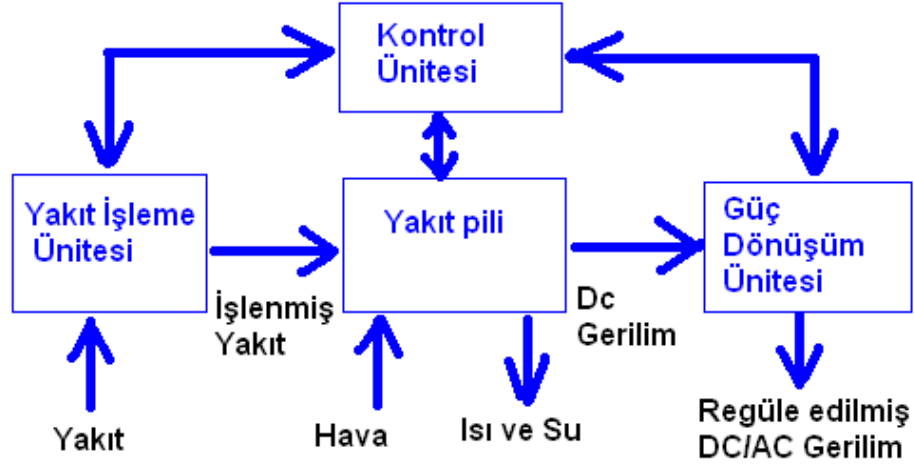
Yakıt pillerinde her bir anot-elektrolit-katot grubu “Membran Elektrot Grubu” ya da “Yakıt Hücresi” olarak adlandırılmaktadır. Bir yakıt hücresinde oluşan gerilim 1 Volt’un altında olduğundan çok sayıda hücre Şekil 2.2 de gösterildiği gibi seri olarak bağlanarak talep edilen yüksek gerilim elde edilir. Temel olarak anot, katot ve elektrolitten oluşan yakıt pillerinde yakıt ve hava akışını yönlendiren, hücreler arası bağlantıyı sağlayan kısımlar vardır. Hücreler arası bağlantı elektrotlarla temas halinde bulunan “Akım Toplayıcı Plakalar (bipolar plaka) ile sağlanır. Bu plakalarda iyi bir ısıl ve elektriksel iletkenliğe, mekanik dayanıklılığa ve kimyasal olarak kararlılığa sahip olan grafitten yapılmaktadır. Ancak grafitin işleme güçlüğü ve yüksek maliyeti nedeni ile çelik ve benzeri karbon içerikli metaller alternatif olarak kullanılmaktadır. Pek çok yakıt pili uygulamasında gaz dağıtım kanalları da bu plakalar üzerinde yer alır. Bu dağıtım kanalları farklı akış biçimleri ve değişik geometride yapılabilir.



Şekil 2. 2. Yakıt hücresi ve Yığın (Stack) gösterimi

Pek çok enerji üreticinde olduğu gibi yakıt pillerinde de yakıt pilini tamamlayan yada bir sisteme dönüştüren ekipman yada ilave üniteler kullanılması gerekmektedir. Bu şekildeki yani yakıt pili ve yardımcı üniteler ile birlikte oluşan sistem “Yakıt Pili Sistemi” şeklinde adlandırılabilir.

Şekil 2.3'te gösterilen yakıt pili sistemi, temel olarak 4 ünitelerden oluşmaktadır. Bunlar; yakıt işleme ünitesi, güç üretim ünitesi (yakıt pili grubu-modül), güç dönüşüm ünitesi, kontrol ünitesidir[3].



Şekil 2. 3. Yakıt pili sistemi

Yakıt işleme ünitesi; yakıtın yakıt piline gönderilmesi öncesinde hazırlandığı, eğer direkt hidrojen kullanılmıyorsa, kullanılan yakıttan hidrojenin ayrıştırıldığı ve koşullandırıldığı ünite.

Güç üretim sistemi olarak isimlendirilen bölüm bir veya birden fazla yakıt pili yığınının meydana gelebilmektedir. Sistemde güç üretiminin gerçekleştirildiği ünite.

Güç dönüşüm ünitesinde hücrede üretilen doğru akım ticari kullanım için düzenlenir ya da dönüştürücüler yardımı ile alternatif akıma çevrilir.

Kontrol sistemi ünitesinde, sistemin tüm işleyişi denetlenir ve kontrol edilir. Bu ünite yakıt pili sıcaklık kontrolü, yakıt-hava debi kontrolü, gerilim-akım çıktı kontrolü, atık ısı, atık su kontrolü, soğutucu akışkan kontrolü gibi işlemleri gerçekleştirir.

2.1 Yakıt Pili Çeşitleri

Yakıt pilleri uygulamada, çalışma sıcaklığı, elektrolit tipi ve yakıt tipine göre çeşitli isimler alır. Yakıt pilinin çalışma sıcaklığı 150 °C 'den düşükse, "düşük sıcaklık yakıt pili", 150°C ile 500°C arasında çalışan yakıt pilleri “orta sıcaklık yakıt pili”, 500 ile 1000 °C arasında ise "yüksek sıcaklık yakıt pili" olarak adlandırılmaktadır. Düşük sıcaklık yakıt pilleri hidrojen gibi basit yakıt ve platin gibi iyi ve pahalı katalizör gerektirmelerine karşı, yüksek sıcaklık yakıt pilleri hidrokarbon yakıt ve daha ucuz katalizör kullanabilme potansiyeline sahiptir. Yakıt pillerinde kullanılan elektrolit çeşidine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılır[1].

- Proton değişim zarlı yakıt pilleri (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)
- Doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC)
- Alkali yakıt pilleri (Alkaline Fuel Cells, AFC)
- Fosforik asitli yakıt pilleri (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)
- Erimiş karbonat yakıt pilleri (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC)
- Katı oksit yakıt pilleri (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

Tablo 2. 1. Yakıt pillerinin sınıflandırılması ve özellikleri [4]

Yakıt Pilleri	Proton Değişim zarlı Yakıt Pili	Alkali Yakıt Pili	Fosforik Asit Yakıt Pili	Erimiş Karbon Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili
Özellikler					
Kullanılan Elektrolit	Polimer iyon değişim zarı	Potasyum hidroksit (KOH)	Fosforik Asit	Karbonat	Zirkonyum
Elektrolitteki Taşıyıcı	H^+	OH^-	H^+	CO_3^{2-}	O_2^{2-}
Sıcaklık	80–100 °C	80 °C	200 °C	600–700 °C	1000 °C
Verimleri	% 45	% 40–80	% 37–42	% 45–60	% 60–70
Güç Yoğunluğu (W/kg)	350–1500	35–105	120–180	30–40	15–20
Yakıt Türü	Hidrojen (H_2), Hidrokarbonlar	H_2	H_2 , Hidrokarbonlar	H_2 , Hidrokarbonlar	H_2 , Hidrokarbonlar
Pil Materyali	Karbon Tabanlı	Karbon Tabanlı	Grafit Tabanlı	Nikel, çelik	Seramik
Kullanılan Katalizör	Platin	Platin	Platin	Nikel	Perovskites
Uygulama Alanları	Ulaşım araçları Askeri Sistemler	Uzay Çalışmaları	Ticari uygulamalar (Oteller, Hastaneler)	Elektrik Santralleri	Ticari ve Sanayi alanda Elektrik Santralleri

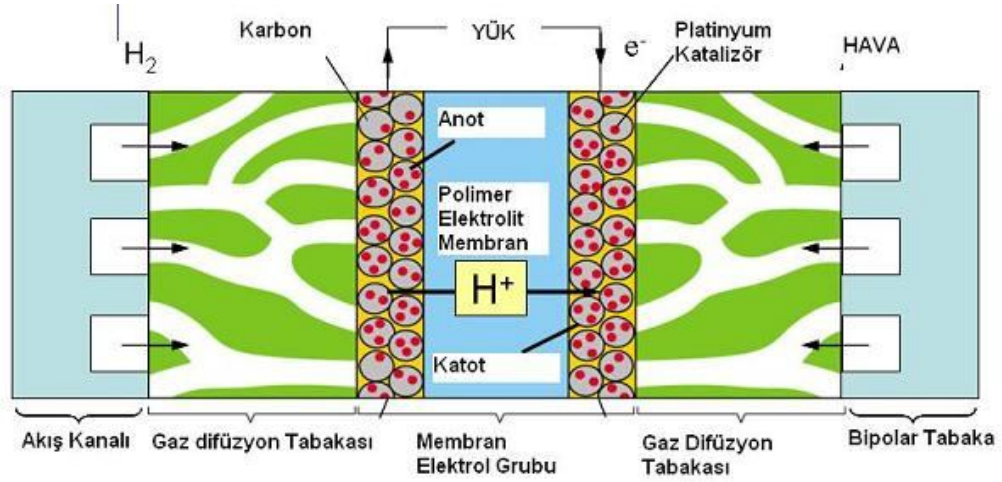
2.2 Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pilleri (PEMYP)

Polimer elektrolit membran yakıt pili yüksek güç yoğunluğu ve yüksek enerji dönüşüm verimi, az yer kaplaması, hafiflik ve düşük çalışma sıcaklığı nedeniyle özellikle taşıtlarda ve taşınabilir cihazlarda tercih edilmektedir. Saf hidrojenin yakıt olarak kullanıldığı bu tip yakıt hücreleri platin katalizör bulunan iki elektrotun ortasındaki polimer elektrolit membrandan oluşmaktadır.

Polimer elektrolit membran yakıt pillerinin ilk uygulaması 1960'lardaki Gemini uzay uçuşları sırasındaki destek güç kaynağı olarak kullanılmasıdır. Bunu izleyen dönemde bu teknolojiye gelişmeler, temel tasarımdaki belirgin yeni düzenlemelerin olduğu 1980'lerin sonuna kadar durmuştur. Günümüzde geleneksel olan yeni üretim yöntemleri 1990'ların başında uygulanmaya başlanmıştır. PEM yakıt hücrelerinde üstesinden gelinmesi gereken en önemli engel katalizör olarak pahalı bir soy metal olan platinin fazla miktarda kullanılmasıdır. PEM yakıt hücrelerinin ilk örneklerinde yüksek miktarlarda kullanılan Platinyum (Pt), yakıt hücrelerinin yaygın olarak kullanılamamasının önemli etkenlerdendir. Bu nedenle, PEM yakıt hücrelerinin yeniden düzenlenmesinde özellikle elektrotlardaki platin miktarının azaltılmasına odaklanılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde PEM yakıt pili, o günden bu güne büyük bir gelişme göstererek 2002 yılında US Environmental Protection Agency (EPA) ve CARB (California Air Resources Board) tarafından ilk ticari yakıt pilli araba kabul edilen Honda FCX teknolojisine ulaşılmıştır[5].

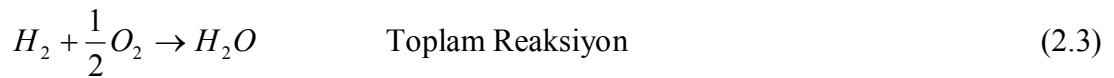
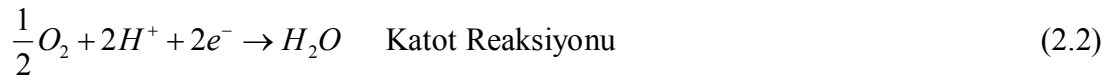
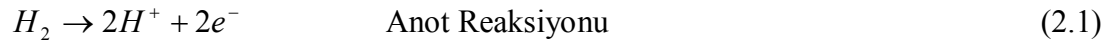
2.2.1 PEM Yakıt Pili Çalışma Prensipleri

PEM yakıt pilinde hidrojen; anot gaz kanalından gaz difüzyon tabakasına, gaz difüzyon tabakasından da katalizör katmanına gönderilir. Burada karbon üzerine platin tutturulmuş katalizör yardımıyla hidrojenin yükseltgenmesi yapılır. Ortaya proton iyonları (H^+) ve elektronlar (e^-) çıkar. Protonlar polimer elektrolit membran üzerinden, elektronlar ise dış devreden dolaşarak katot tarafına gönderilir. Katotta oksijenin indirgenme reaksiyonu gerçekleşir. Membran üzerinden gelen protonlar ve dış devreden gelen elektronlar oksijen ile reaksiyona girerek su oluşturur ve ısı açığa çıkar[23]. Eğer anotta serbest kalan elektronlar dış devreye bağlanmış yük üzerinden katoda aktarılırsa, talep edilen yük ihtiyacı karşılamak için doğru akım karakterli elektrik akımı oluşur. Şekil 2.4'te PEM yakıt pilinin yapısı verilmiştir.



Şekil 2. 4. Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili'nin yapısı

Proton değişim zarlı yakıt pillerinin çalışması esnasından katot, anot ve pil de toplam meydana gelen kimyasal reaksiyon aşağıda verilmiştir.



2.2.2 PEM Yakıt Pili Yapısı

Bir PEM yakıt pili temel olarak dört bölümden oluşur. Bunlar;

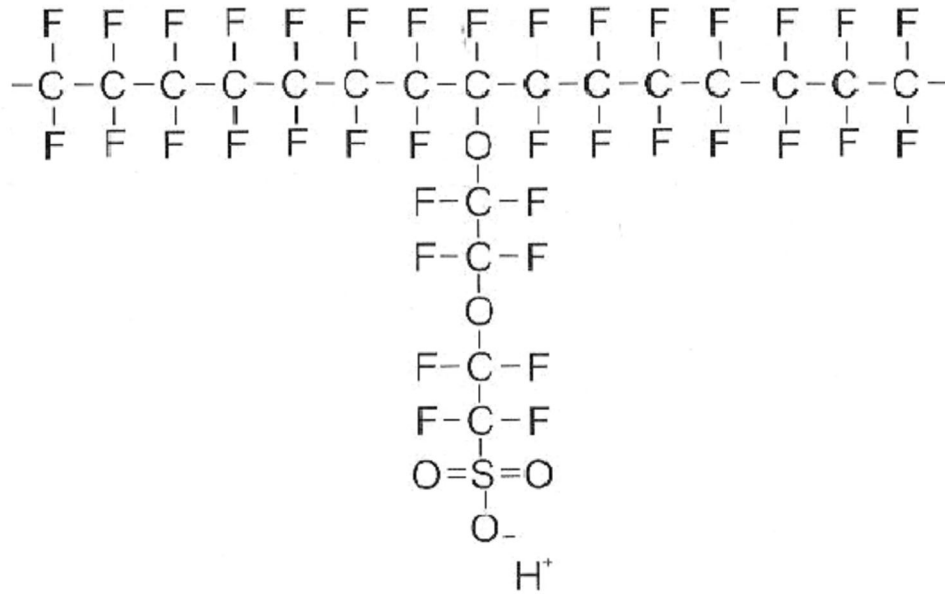
- Polimer elektrolit membran
- Gaz Difüzyon Tabakası (GDT),
- Katalizör Tabakası
- Gaz akış plaklarından oluşmaktadır.

Son plakalar genellikle paslanmaz çelik veya alaşımlı alüminyumdan üretilmiş olup PEM yakıt pili yığını bir arada tutar. Gaz akış plakaları genellikle grafit malzemeden üretilmekte olup reaktantların GDT'e, ürünlerin ise GDT'den

aktarımında ve elektronların dış devreye iletilmesinde görev alırlar. Gaz akış plakalarda gazların aktığı kanallar serpantin, tarak ve spiral akış özelliği gösterecek şekilde tasarlanmaktadır.

2.2.2.1 Polimer Elektrolit Membran

Polimer elektrolit membran proton iletimine izin vererek H^+ taşımalarını sağlarken elektron iletimini engeller. Dış devreden gelen elektronlar ve membran üzerinde geçen H^+ , oksijenle reaksiyona girer. Yakıt pilinde hidrojen ve oksijenin doğrudan bir birine karışmasını engelleyen membran, bir polimer kalıp içerisinde negatif iyonların tutulduğu bir asidik elektrolit olarak karakterize edilebilir. En geniş kullanılan membran materyali DuPont üretimi olan Nafion'dur. Bu materyalin polimer yapısı Şekil 2.5'te gösterilen poli(tetrafluoroetilen) bir omurga içerir. Bu omurga, uçları sülfonik asit gruplarıyla biten yan zincirlere sahiptir. Kalınlıkları $51\mu m$ - $254\mu m$ arasında değişir.



Şekil 2. 5. Nafion tipi membran malzemesinin yapısı

İyi bir membrandan beklenen özellikler

- Kimyasal etkilere dayanıklılık
- Mekanik olarak güçlü oldukları için ince yapılabilmeleri
- Asit özellikte olmaları
- Büyük miktar su tutabilmeleri
- İyi su tutabildikleri takdirde, H^+ iyonları serbestçe dolaşabileceğinden, iyi proton ileticisi olmalı.

Bu özelliklerin tamamı membranın su miktarı ile doğrudan ilgilidir. Membrandaki maksimum su miktarı membranın ön işlemine ve membranın dengesi için kullanılan suyun fazına oldukça bağlıdır.

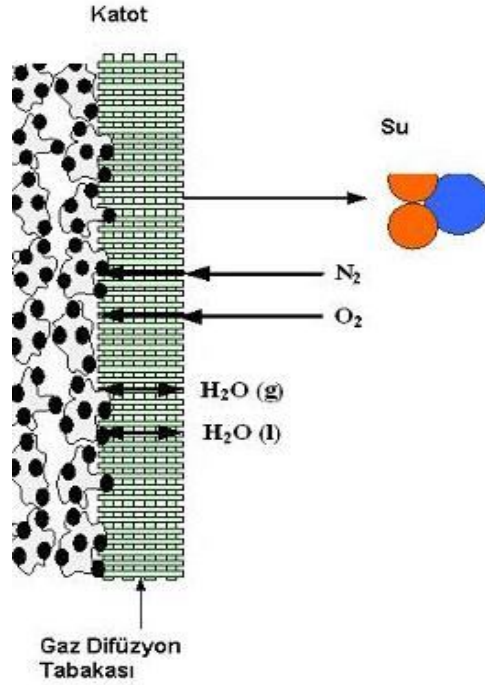
İnce bir membran için elektro ozmatik çekme nedeniyle anot kuruma etkisine karşı koymak için su geri difüzyonu yeterli olabilir. Fakat kalın bir membranda, kuruma özellikle yüksek akım yoğunluklarında anot tarafında oluşur. Reaktant türlerinin, elektrokimyasal reaksiyonlara katılmasından önce karışmalarını önlemek için membran reaktant türleri için geçirimsiz olmalıdır. Bununla birlikte membranın gözenekli yapısından dolayı küçük miktarda gaz membranın içine nüfuz eder.

Membranın en büyük dezavantajı sonlu bir iyon iletim oranına sahip olmasıdır. Ayrıca membran direnci direnç kayıpları içerisindeki en büyük etkidir. Bu direnç sıcaklığa ve sulama oranına göre değişiklik gösterebilir. Membranın diğer bir dezavantajı da yakıt ve oksitleyici gazların karşıt geçişleridir. Bu durumda hidrojen ve oksijen bir dış akım üretmeden reaksiyona girer ve performans düşer.

2.2.2.2 Gaz Difüzyon Tabakası

Bir yakıt pilinde polimer elektrolit membran – katalizör bileşimiyle iki taraftan temas halinde bulunan gözenekli gaz difüzyon katmanları sandviç görünümünde bir yapı oluşturur. Şekil 2.6 da gösterilen gaz difüzyon katmanında

materyal olarak karbon esaslı kağıtlar, keçeler ve kumaşlar kullanılabilir. Makro gözenekten mikro gözeneğe doğru değişen bir kombinasyon iyi performans sağlar.



Şekil 2. 6. Gaz Difüzyon Tabakası

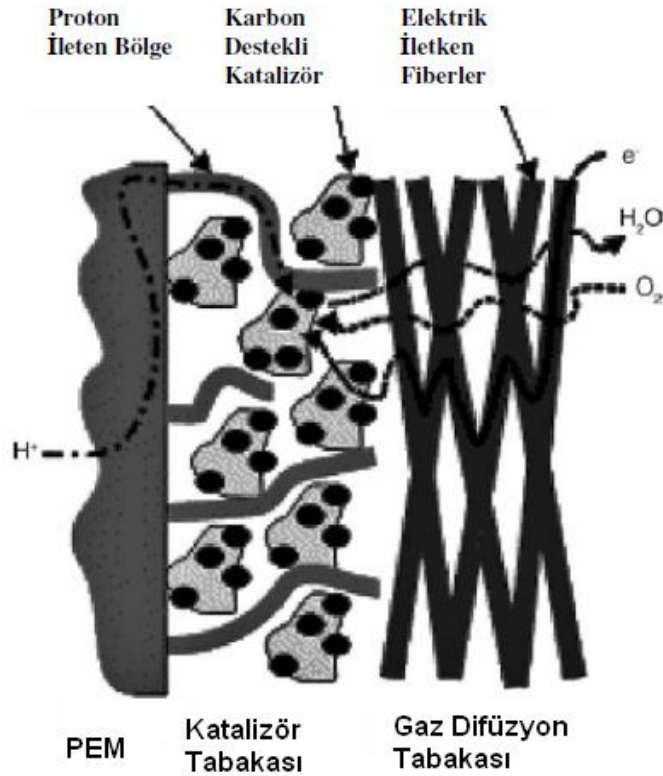
Bu katman, politetrafluoroetilen gibi su sevmez bir materyal içerir. Bu materyalin görevi gaz difüzyon katmanının gözenekleri arasında su birikintilerinin oluşmasını önlemektir. Böylece gazlar, katalizör alanları ile serbestçe temas kurabilirler. Genelde kalınlıkları 300–400µm arasında değişmektedir. Gaz difüzyon katmanına katalizör tutturularak gaz difüzyon elektrotu diye bilinen yapı oluşturulur. Bu uygulama, değerli materyallerin efektif olmayan kullanımı ve elektrot ile membran arasında zayıf temas oluşturması sebebiyle yerini seri üretime daha uygun olan ince film elektrotlarına bırakmıştır.

Geleneksel karbon esaslı gaz difüzyon katmanlarına ek olarak sinter veya ağ tipi metalik materyaller de kullanılabilir. Metalik materyal kullanılması durumunda karbon kağıtlarda olduğu gibi destek konulması gerekmez. Ayrıca gaz difüzyon katmanları basınç altında olduğundan materyaller kolayca deforme olabilirler. Bu deformasyon düşük gözeneklilik ve daha zayıf kütle transferine neden olur. Metalik materyal kullanılması durumunda yüksek basınçlarda performansta düşme olmadan

çalışır. Fakat metalik materyallerin de iletkenliklerinin az olması ve ucuz metallerde korozyon oluşması gibi problemleri vardır.

2.2.2.3 Elektrotlar

PEM yakıt pillerinde kullanılan elektrotlar aslında membran ve gözenekli karbon yapısının arasına sıkıştırılmış ince bir katalizör tabakasıdır. Bu tabaka elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleştiği kısımdır ve Pt mikrokristaller içerir. Günümüzde Pt hem anot hem de katot reaksiyonları için uygun katalizör olarak belirlenmiştir. Ancak pahalı olduğundan birçok yöntem kullanılarak en az miktarda kullanılmaya çalışılmaktadır. PEM yakıt pili geliştirme çalışmalarının ilk yıllarında kullanılan Pt katalizör miktarı çok fazla iken, 1990'ların sonunda bu miktar düşürülmüştür. Burada asıl önemli olan kullanılan katalizörün miktarı değil yüzey alanıdır. Bu nedenle geniş yüzey alanına sahip küçük partiküllerin kullanılması gerekmektedir. Şekil 2.7 de PEM yakıt pili elektrot yapısı verilmiştir.



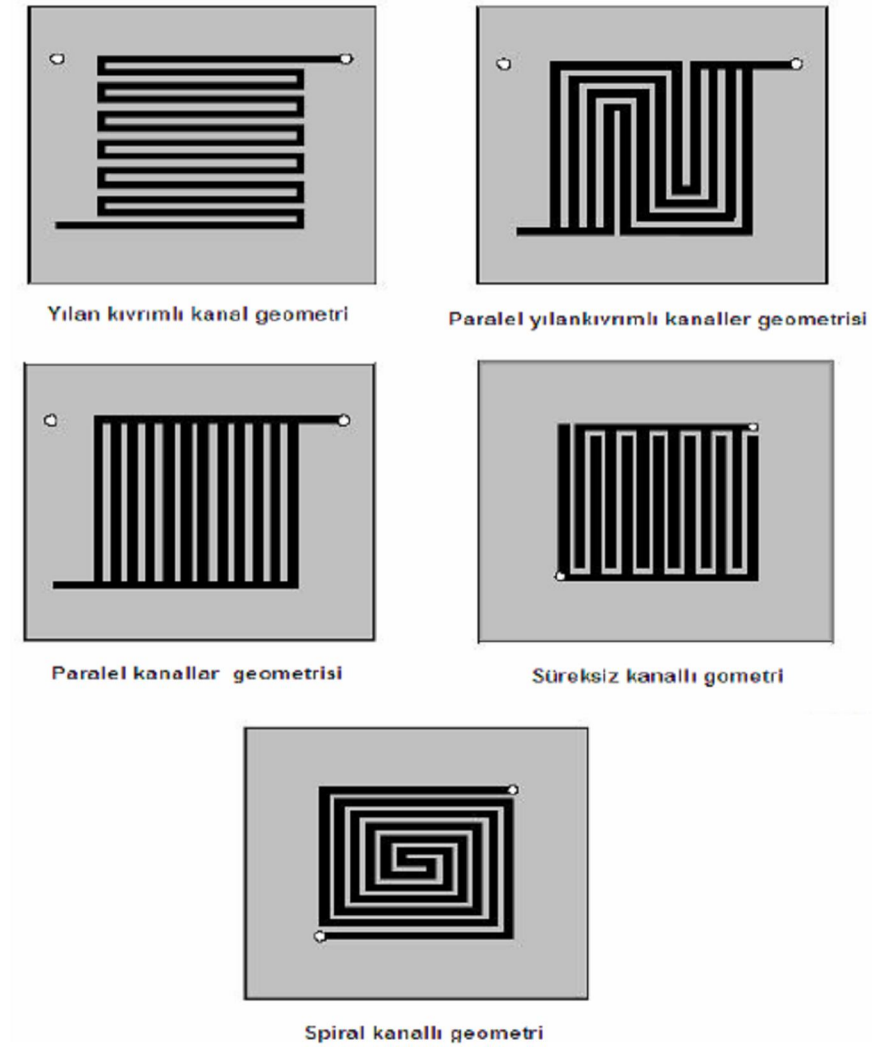
Şekil 2. 7. PEM yakıt pili elektrot yapısı

Proton transferi ve reaksiyon gazlarının iletimi sırasında oluşacak voltaj kayıplarını en aza indirmek için katalizör tabakasının belirli bir incelikte olması gerekmektedir. Aynı zamanda aktif yüzey alanı genişletilmelidir

Platin kullanımını azaltmak için, polimerin çözünebilir formu karbon destek yapısının gözeneklerine yerleştirilmiştir. Böylece katalizör ile katı polimer elektrolit arasındaki ara yüzey artırılmış olmaktadır. Polimer çözeltisini katalizörle birleştirmek için iki yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde, katalizör tabakası gözenekli karbon yapının üzerine biriktirilir ve bu yapı daha sonra membran ile birleştirilir. İkinci yöntemde ise önce katalizör tabakası membranın üzerine biriktirilir ve daha sonra ve daha sonra karbon destek yapısıyla birleştirilir. Katalizör tabakasının membrana veya karbon destek yapısına biriktirilmesi için püskürtme, sıçratma, elektrolitik biriktirme, buharlaştırarak biriktirme gibi birçok yöntem geliştirilmiştir.

2.2.2.4 Gaz Akış Kanalları

Gaz akış kanalları, akışkanların yakıt hücresine girip, sistemde dolaştıktan sonra çıktıkları kanallardır. Gaz kanallarını anot ve katot gaz kanalları olarak ikiye ayırabiliriz. Anot gaz kanalından, hidrojen bakımından zengin yakıt girmektedir. Katot gaz kanalından ise, oksijen içeriği fazla olan akışkan girmektedir. Membran elektrot grubu ile gaz difüzyon tabakası gaz akış kanalları arasına yerleştirilir. Gazların elektrotlara dağıtımını ve üretilen suyun yakıt pili dışına atılmasını sağlarlar. Elektriksel olarak yakıt pilleri birbirine bağlarken mekanik olarak da destek sağlar. Ayrıca bitişik hücrelerin gazlarını birbirinden ayırır. Bu sebeple gazlar ayrı yüzeye sahip aynı plaklarda dolaştığı için çift kutuplu plakalar olarak da adlandırılır[6].



Şekil 2. 8. PEM yakıt pillerinde kullanılan gaz akış kanalları [6]

Şekilde 2.8 de görüldüğü gibi gaz akış kanallarının gaz difüzyon tabakasına bakan kısımlarında çeşitli akış kanalları bulunur. Bunların kanalların geometrisi kütle transferi için oldukça önemlidir.

2.2.3 PEM Yakıt Pilinin Avantajları ve Dezavantajları

PEM Yakıt Pilinin Avantajları;

- Termal enerji sistemlerine oranla daha yüksek verimle çalışırlar

- Yakıt pilinde meydana gelen emisyon miktarı, diğer yakıtlara göre ihmal edilecek kadar azdır. Yan ürün olarak bir tek su oluşmaktadır. Yakıt pillerinde CO, NOX, yanmamış hidrokarbonlar ve kirletici diğer maddeler oluşmazken, oksitleyici olarak hava kullanıldığında ihmal edilecek kadar az miktarda azot atıklar ve hidrokarbonlar kullanıldığında ise çok düşük miktarda CO₂ oluşur.
- Fosil ve alternatif yakıtların kullanımının kolaylığı nedeniyle yakıt esnekliğine sahiptir,
- Hareketli parçanın az olması sebebiyle servis süresi azdır sürekli bir gözetleme gerekmez, sessiz çalışırlar.
- Basit bir yapıya sahiptirler. İstenilen boyutta ve kapasitede üretilebilirler
- Modülerdirler. Gerekli görülen her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilirler.
- Yakıt pillerinde elektrik üretiminin yanı sıra yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir

Yakıt Pili Dezavantajları;

- Yakıt pili kullanımı çok farklı disiplinlerin bir araya gelmesini ve ileri teknoloji kullanılmasını gerektiren sistemlerdir.
- Yeni bir teknoloji olması sebebiyle maliyetler yüksektir.

2.2.4 Yakıt pili Uygulamaları

Polimer elektrolit yakıt pilleri günümüzde çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Bunlar alanlar aşağıdaki şekilde gruplanabilir.

- Sabit uygulamalar
- Otomotiv uygulamaları
- Taşınabilir uygulamalar

2.2.4.1 Sabit Uygulamalar

Dünyada hastaneler, okullar, ofis binaları, güç santralleri gibi birçok yerde güç desteği sağlamak için şebekeye bağlı yakıt pilleri kullanılmaktadır. Elektrik şebekesinin ulaşamadığı yerlerde ise bağımsız güç üreten yakıt pilleri kullanılmaktadır.

Günümüzde kullandığımız termik güç santrallerinde verimin düşük olmasının temel nedeni kullanılan yakıtlardan, önce ısı enerjisi elde edilmesi sonra da ısı enerjisinin elektriğe dönüştürülmesidir. Bu dönüşüm sırasında büyük enerji kaybı olur. Yakıt pillerindeyse böyle bir sorun yoktur. Hareketli parçası bulunmayan yakıt pillerinde elektrik doğrudan üretilir. Herhangi bir alışılmış yanma süreci ya da dönen makineler olmaması nedeniyle de enerji verimini düşürecek bir kayıp söz konusu değildir.

Şekil 2.9 da verilen Ballard firmasına ait PEM yakıt pili sabit uygulaması gösterilmiştir. Bu ünite 250kW güç sağlamakla birlikte yakıt pilinden üretilen ısıyı kullandığı için verim artışı sağlanmıştır[7].



Şekil 2. 9. Ballard 250 kW PEM yakıt pili sabit uygulaması [7]

Polimer elektrolit yakıt pilleri sessiz ve temiz olması sebebiyle evsel uygulamalarda sıcak su, ısıtma ve güç üretmek için kullanılabilir.



Şekil 2. 10. Vaillant firmasının ürettiği PEM yakıt pili

Şekil 2.10 da Vaillant firmasının üretmiş olduğu doğalgazla çalışan pem yakıt pili 1kW ile 4.5kW arasında güç üretmektedir. Bu yakıt pili aynı zamanda evin ısıtma ihtiyacını da karşılamaktadır.

2.2.4.2 Ulaşım Araçları

Günümüzde ulaşımda kullandığımız içten yanmalı motorlar yakıt olarak petrol kullanılır. Yakıtın yanması çevre için zararlı emisyonlara neden olur ve mekanik ekipmanlardaki kayıpların fazla olması nedeniyle verimleri düşüktür. Yakıt pillerinde ise emisyonlar çok düşüktür ve mekanik parçaların olmaması nedeniyle verimleri içten yanmalı motorlara göre yüksektir. Güç kaynağı olarak yakıt pillerinin kullanıldığı taşıtların kısımları temel olarak; yakıt pili, elektrik motoru, elektronik güç kontrolü ve yakıt tankından oluşmaktadır. 1990'lı yılların başında hemen hemen

bütün büyük otomobil şirketleri yakıt pilleriyle çalışan otomobillere yönelik araştırma programı başlatmışlardır.



Şekil 2. 11. Honda'nın PEM yakıt pili kullandığı otomobil [8]

Şekilde 2.11 de görülen Honda firmasının ürettiği araç fosil yakıtlı motor yerine hidrojenli yakıt pili kullanılmıştır. 100kW güç üreten yakıt pili sıkıştırılmış hidrojen kullanmaktadır. Tank yakıt kapasitesi 3,92 kg ve bu yakıtla 386 km yol alabilmektedir. Bu araç havaya su buharı verdiği ve çok düşük CO_2 emisyonu ürettiği için sera gazlarının artışı yavaşlatacaktır.

Otomotiv uygulamalarda yüksek güç yoğunluğuna sahip olması nedeniyle en çok tercih edilen yakıt pili polimer elektrolit yakıt pilidir. Yüksek güç yoğunluğu sayesinde oldukça küçük boyutlarda üretilebilir ve çalışma sıcaklığı ortalama $80^{\circ}C$ 'dir. Ayrıca kullanılan katı elektrolitin üretim maliyeti diğer yakıt pillerinde uygulanan sıvı elektrolitlere göre daha düşük olması diğer bir avantajıdır.

Polimer elektrolit yakıt pillerinin kullanım alanları otomobil otobüs, motosiklet, forklift, motorlu bisiklet gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Şekil 2.12 de çeşitli araçlara uygulanmış polimer elektrolit yakıt pili uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 2. 12. PEM yakıt pilinin kullanıldığı çeşitli araçlar

Özellikle Asya ülkelerinde yaygın kullanım alanına sahip iki zamanlı motosikletler büyük miktarda zararlı emisyonlar salmaktadır. Bu ülkelerde yakıt pilli motosikletlerin kullanımı çevre açısından çok olumlu sonuçları doğuracaktır.

2.2.4.3 Taşınabilir Uygulamalar

Yakıt pilleri birçok uygulama gibi taşınabilir uygulamalarda da kullanılmaktadır. Yakıt pilleri taşınabilir uygulamalarda bataryalarla yarışmaktadır. Bataryaları belirli bir süre kullanıldıktan sonra şarj etmek ya da şarj edilemeyen türde ise atmak zorunda kalırız. Yakıt pilleri ise yakıt sağlandıkça sürekli çalıştırmak mümkündür. Bataryaların içeriğinde zararlı kimyasal maddeler bulunduğu için

evreyeye zarar verir. Yakıt pilleri ise zararlı maddeler iirmediği ve salmadığı iin evre dostudur.

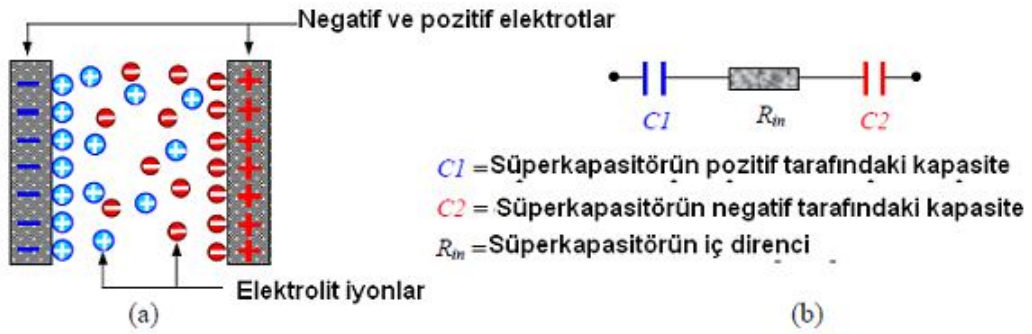


Şekil 2. 13. Casio'nun dizüstü bilgisayarlar iin üretmiş olduğu PEM yakıt pili

Şekil 2.13 de casio'nun üretmiş olduğu PEM yakıt pili dizüstü bilgisayarlara enerji sağlamak iin kullanılmaktadır. Bu PEM yakıt pili kullanıma göre 8 ile 16 saat arası güç sağlayabilmektedir[9].

3 Süperkapasitörler

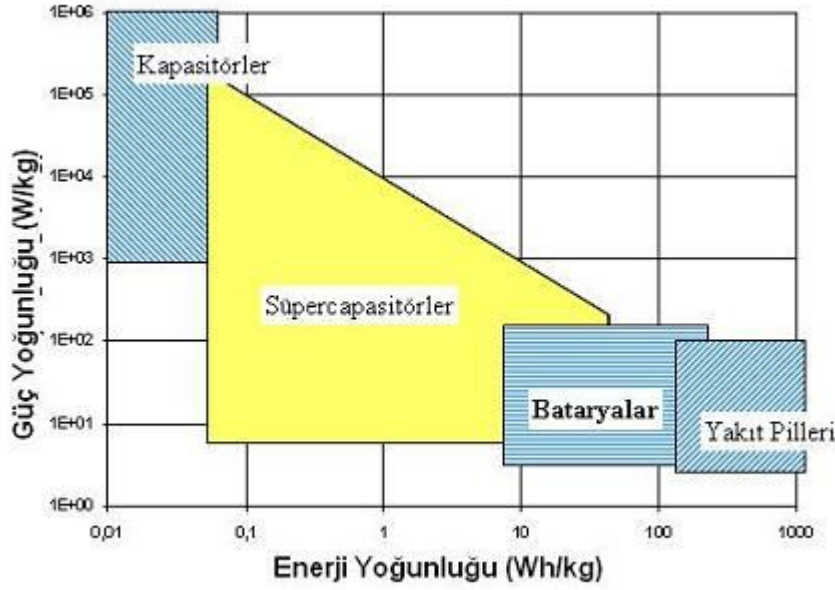
Günümüzde birçok firmanın üretmekte olduğu Süperkapasitörler pratikte ilk olarak 1979 yılında bilgisayar teknolojisinde kullanılmıştır. Süperkapasitör terimi teknolojiye gelişmeler ve elektrot malzemelerindeki ilerlemeler sayesinde kapasitörlerin enerji yoğunluğunun büyük ölçüde artırılmasını ifade etmektedir. Dielektrik kapasitörlerden farklıdır çünkü bir iletken elektrot ve bir iletken iyonik elektrolit arasındaki ara yüzde polarize sıvı tabakasında enerji depolarlar (ilk nesil süperkapasitör). Elektrotlar yüksek yüzey alanına sahip, nano metre seviyede çapı olan gözenekli malzemeden üretilirler. Süperkapasitörlerde kullanılan elektrotların yüzey alanları sıradan kapasitörlerde kullanılanlardan çok çok büyüktür. Elektrik yükü mikro gözeneklerde veya katı elektrod malzemesi ve elektrolit ara yüzünde yakınında depolanır. Bu tür süperkapasitörler yaygın olarak simetrik dizayn edilir. Pozitif ve negatif elektrotların her biri aynı kapasitansa sahip benzer malzemeden (aktif karbon malzeme) yapılırlar[10]. Şekil 3.1 de süperkapasitörün yapısı ve eşdeğer devre modeli verilmiştir.



Şekil 3. 1. (a) Süperkapasitör'ün yapısı (b) Süperkapasitör devre modeli

İkinci nesil süperkapasitörlerde yine simetrik dizayn kullanılmakla birlikte sıvı elektrolit yerine organik elektrolit kullanılmıştır. Organik elektrolit yüksek çalışma voltajı (2,5-3V) ve yüksek enerji yoğunluğunu mümkün kılar. Üçüncü nesil süperkapasitörler ise negatif elektrot aktif karbon malzemeden, pozitif elektrot ise nikel hidroksit içeren aktif malzeme bileşeninden üretilir. Bu teknoloji asimetrik dizayn olarak bilinir. Boyutları aynı olmasına rağmen pozitif elektrottaki kapasitans negatif elektrottaki kapasitansın önemli ölçüde büyüktür. Bu asimetrik dizayn;

kapasitansı simetrik dizayndakine göre yaklaşık iki kat artırmıştır. Sonuç olarak sıvı elektrolitli karbon/karbon plakalı simetrik dizayna göre asimetrik dizaynda enerji yoğunluğu 4–5 kat artmıştır. Bu süperkapasitörler hibrit elektrikli araçlar, güç kalitesini artıran sistemlerde, batarya ve yakıt pillerine destek ve bağımsız güç sistemleri uygulamalarında kullanılmaktadırlar.



Şekil 3. 2. Çeşitli depolama araçlarının karşılaştırılması

Süperkapasitörler sıradan kapasitörlere göre daha fazla enerji depo etme yeteneğine sahiptir ve bataryalardan daha fazla güç verebilir. Şekil 3.2’de süperkapasitörlerin enerji ve güç kapasitelerini gösterilmiştir. Tablo 3.1’de ise sıradan kapasitörler, bataryalar ve süperkapasitörlerin zaman sabiti, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu ve ömürleri verilmiştir. Süperkapasitörler enerjiyi çok çabuk depolama ve boşaltma, geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilirler. Diğer avantajları ise şarj durumunun terminal volatji ölçülerek kolayca hesaplanabilir, kendi kendine boşalma hızı çok düşüktür, şarj verimliliği %99’a yaklaşır ve minimum bakım gerektirir[11].

Tablo 3. 1. Süperkapasitör ve diğer depolama araçlarının karşılaştırılması

Parametreler	Kapasitörler	Süperkapasitörler	Bataryalar
Zaman sabiti [s]	<0.1	0.2 - 10	>100
Enerji yoğunluğu [kJ/kg]	0.1 - 0.5	0.5 - 30	>100
Güç Yoğunluğu [kW/kg]	>10	0.5 - 1	0.1 - 0.5

Birçok uygulamada gerekli voltaj seviyesine ulaşmak için birden fazla süperkapasitör seri bağlanarak modüller oluşturulur. Şekil 3.3 de gösterildiği gibi günümüzde 14, 28 ve 42V olarak standart modüller mevcuttur. Bu bağlantı modülün toplam eşdeğer seri direncini (ESR) artırır. Eğer ESR azaltılmak isteniyorsa seri bağlanmış kapasitör dizileri paralel bağlanmalıdır. Her bir süperkapsitördeki kapasite ve direnç değişimi modülde eşit olmayan voltaj dağılımı oluşturur. Her bir süperkapsitör gerilimi paralel süperkapasitördeki elektrolitin gerilim dayanımından daha büyük olması modülü bozacak kadar zararlı olabilir. Bu yüzden süperkapasitör modülünden faydalanılacaksa gerilim dengeleme devresi gereklidir.



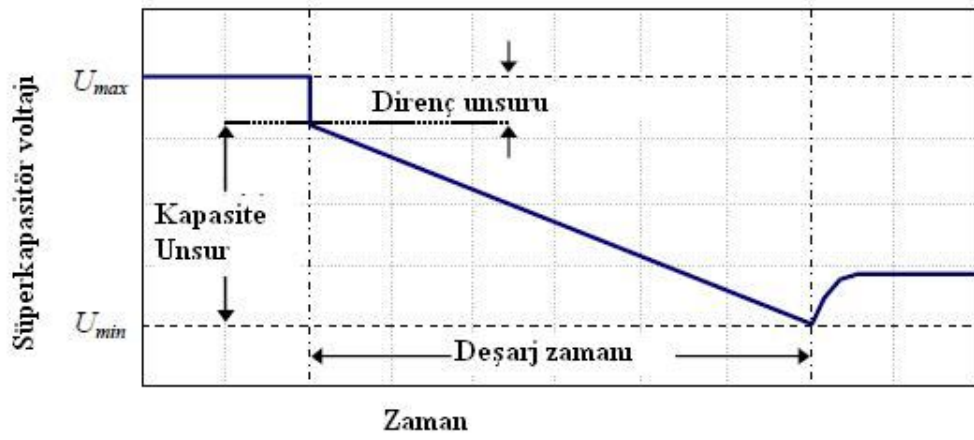
Şekil 3. 3. Süperkapasitör modülü ve süperkapasitörlerin bağlantıları

3.1 Süperkapasitörlerin Karakteristikleri

Süperkapasitörler oldukça hızlı şekilde şarj ve deşarj olabilirler. Gerçek şarj ve deşarj akım limitleri süperkapasitör boyutuna ve iç kayıplarına bağlıdır. Tipik küçük kapasitörler 10A üzerinde ve büyük kapasitörler ise 1000A üzerinde akım verebilir Süperkapasitörün iç direnci ani boşalmayı önler. Gerçekte birçok

süperkapasitörün 1 ile 2 saniye arasında zaman sabiti vardır ve direnç devresindeki tamamen boşalma ortalama 5 saniye sürer[11].

Süperkapasitörün voltajı kapasite unsuruna ve direnç unsuruna bağlıdır. Kapasite unsuru kapasitör içerisindeki şarj ve deşarj enerjisi yüzünden voltajı ifade eder. Direnç unsuru ise süperkapasitör iç direncine bağlı voltaj değişimleri ifade eder. Şekil 3.4’de sabit akımda boşalma için iki unsurun göstermektedir. Şarj profili de benzerdir, şarj süresine bağlı olarak süperkapasitör gerilimi artar.



Şekil 3. 4. Süperkapasitör voltajını etkileyen unsurlar

4 DC-DC Konvertörler

Girişindeki doğru akım gerilimini istenilen düzeyde doğru akıma dönüştüren sistemlerdir. İdealde pasif elemanlar bulundurup enerji dönüşüm işlemini kayıpsız olarak yaparlar. Gerçekte ise verimleri %70 ile %95 arasında değişir[12].

Bu konvertörlerin genel çalışma prensibi belirli bir periyot içerisinde yarı iletken anahtarın iletme girmesi ve çıkmasıyla giriş geriliminden farklı bir çıkış geriliminin elde edilmesi prensibine dayanır.

Dc-Dc konvertörler anahtarlama güç kaynakları ve doğru akım motor sürüş sistemlerinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Hibrid elektrikli araç uygulamalarında ise genellikle farklı gerilim seviyesine sahip doğru akım sistemlerin birbirlerine bağlanması amacıyla kullanılırlar[13].

Dc-Dc konvertörler yapısal olarak Tablo 4.1 de verildiği gibi izoleli ve izolesiz olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Her iki grupta da değişik güçlerdeki azaltan tipte (buck) ,artıran tipte (boost) ya da her iki işlemi birlikte yapan artıran azaltan tipte (buck-boost) yapıları görmek mümkündür.

Tablo 4. 1. DC-DC Konvertörlerin sınıflandırılması

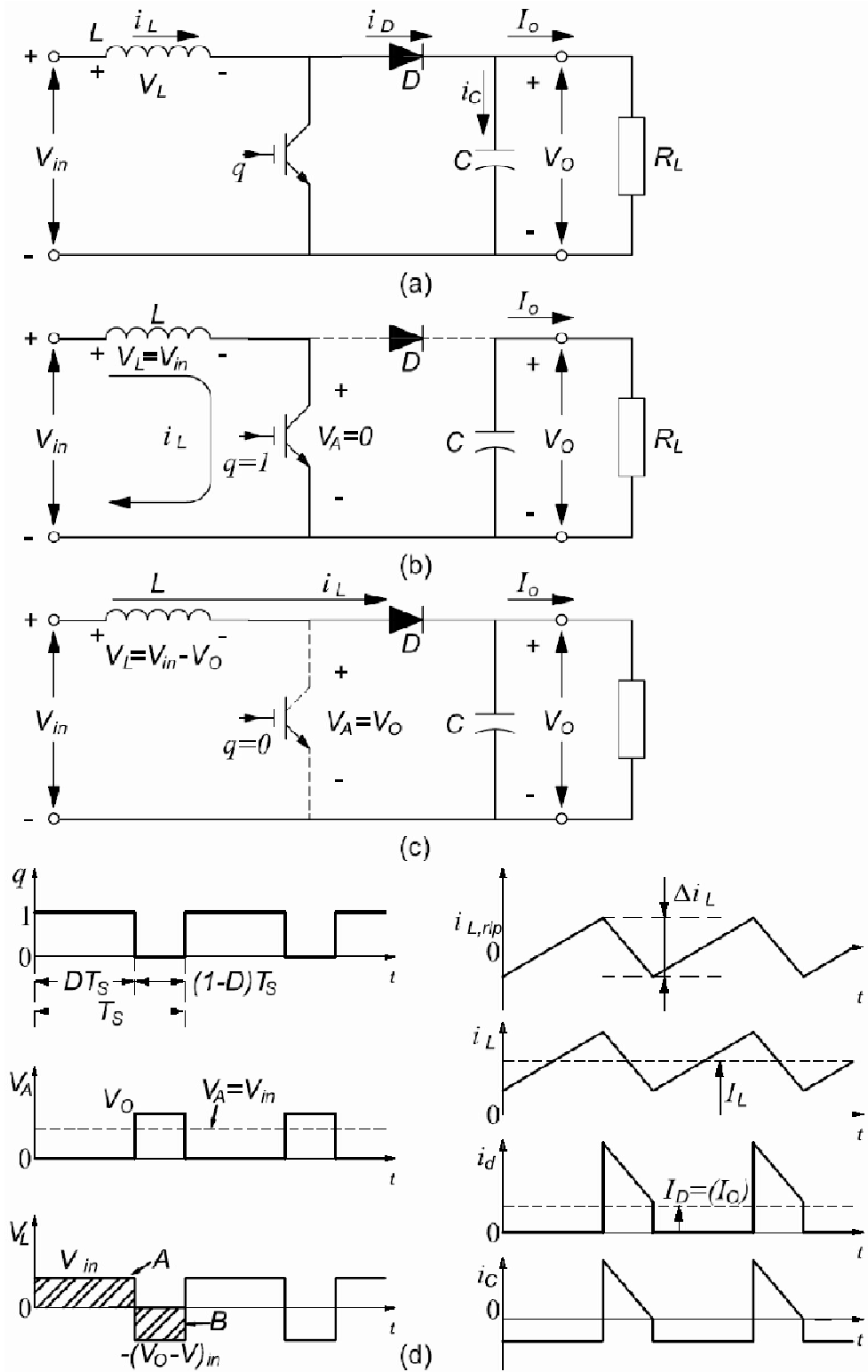
DC-DC KONVERTÖRLER	
İzolesiz Konvertörler	İzoleli Konvertörler
Artıran Tip (Boost) Konvertörler	Geri Dönüslü (Fly-back) Konvertörler
Azaltan Tip (Buck) Konvertörler	İtme-Çekme (Push-Pull) Konvertörler
Artıran-Azalatan Tip (Buck-Boost) Konvertörler	Yarım Köprü (Half Bridge) Konvertörler
	Tam köprü (Full Bridge) Konvertörler

4.1 İzolesiz Temel Dc-Dc Konvertörler

Temel olarak bir kontrollü yarı iletken güç elemanı, bir yarı iletken güç diyodu ve bir anahtarlama endüktansından oluşan üç temel elemanın farklı şekillerde bağlanmasıyla elde edilmişlerdir.

4.1.1 Artıran Tip (Boost) Konvertör

Artıran tip (boost) konvertör, basitçe, girişlerindeki gerilimi, daha yüksek düzeyde bir gerilime dönüştüren devreler olarak tanımlanabilir. Bu devreler, çok çeşitli güç elektroniği devrelerinin giriş katında, AC/DC diyotlu doğrultucuların hemen ardından, hem bara gerilimini daha yüksek bir düzeye çıkartmak, hem de uygun anahtarlama yöntemleri ile giriş güç katsayısını iyileştirmek için kullanılırlar. Bir artıran tip konvertörün devre şeması ve anahtarın iletim ve kesim durum grafikleri Şekil 4.1’de gösterilmektedir[14].



Şekil 4. 1. Artıran tip konvertörün devre şeması ve anahtarın iletim ve kesim durumu
 (a) Artıran tip konvertör devre yapısı (b) Yarı iletken anahtarın iletim durumu
 (c) Yarı iletken anahtarın kesim durumu (d) Artıran tip konvertör dalga şekilleri

Şekil 4.1’de yarı iletken anahtar (q) iletime geçince diyot (D) ters kutuplanır ve çıkış devresini girişten ayırır. Bu esnada girişten endüktansa (L) enerji uygulanır.

Anahtar kesime sokulunca, endüktansta depolanan enerji, diyot üzerinden çıkışa aktarılır.

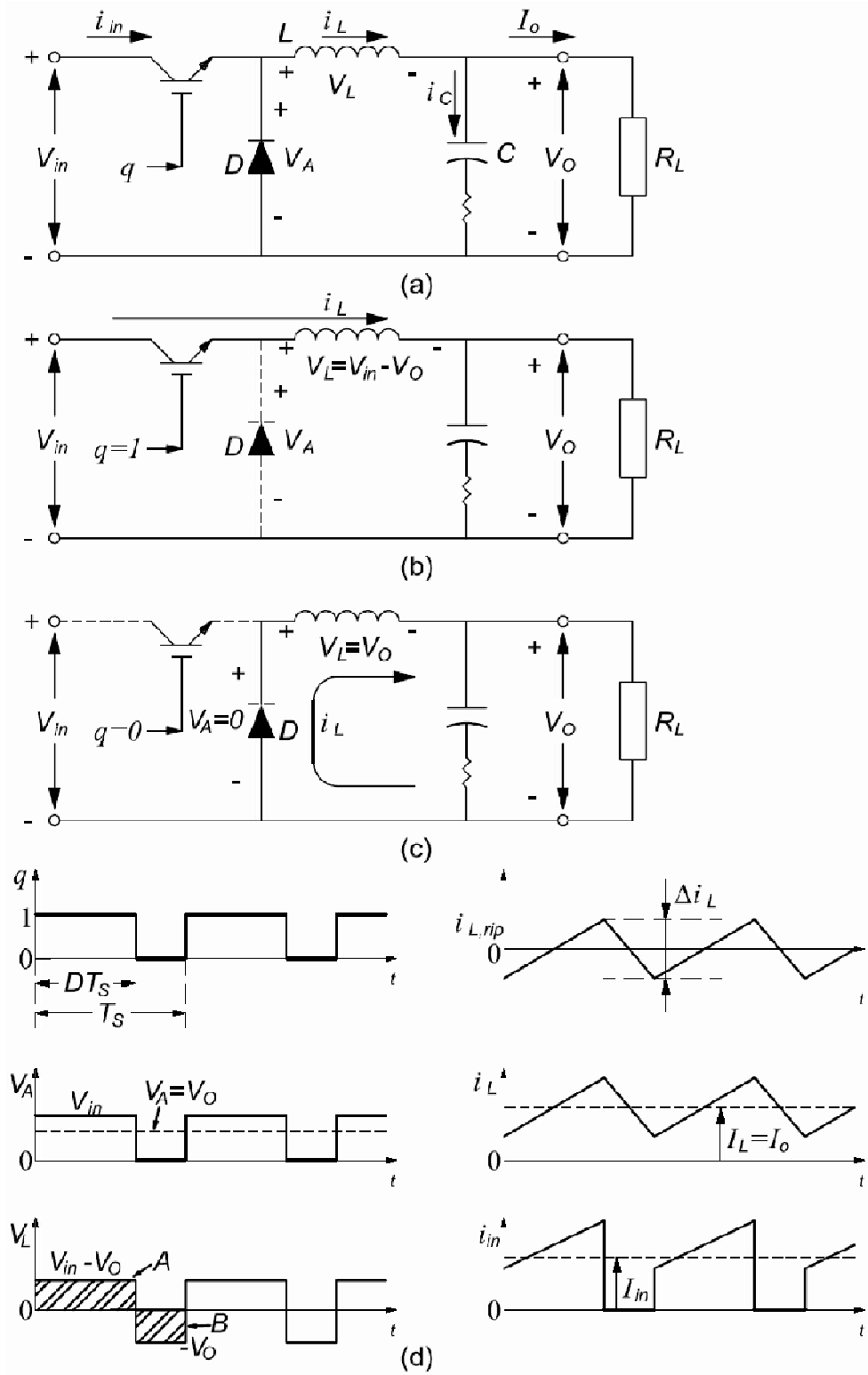
Yükselten tür dc-dc dönüştürücülerin çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden büyük olup, endüktans akımının sürekli olmasının sağlandığı durumlarda, giriş-çıkış gerilimleri arasındaki ilişki

$$V_0 = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (4.1)$$

eşitliği ile tanımlanır. Bu eşitlikte D, anahtara uygulanan kapı işaretinin doluluk oranını(duty cycle) gösterir. Her ne kadar bu eşitliğe göre, teorik olarak çıkış geriliminin istenildiği kadar büyük yapılması olası görünse de, özellikle süzücü endüktansın iç direncinden kaynaklanan kayıplar nedeniyle, doluluk oranının yüksek değerlerinde çıkış gerilimi artmak yerine düşüş gösterir.

4.1.2 Azaltan Tip (Buck) Konvertör

Girişindeki gerilimi daha düşük bir gerilime dönüştüren devreler olarak tanımlanır. Belirli bir periyot içerisinde, yarı iletken anahtarın iletme ve kesime geçmesi ile ortalaması giriş geriliminden daha düşük bir dc gerilim elde edilir. Bu devreler ayarlı güç kaynakları ve doğru akım motor hız denetimlerinde kullanılırlar[12]. Azaltan tip devre şeması ve anahtarların iletimde ve kesimde olduğu devreye ait grafikler Şekil 4.2’de verilmiştir.



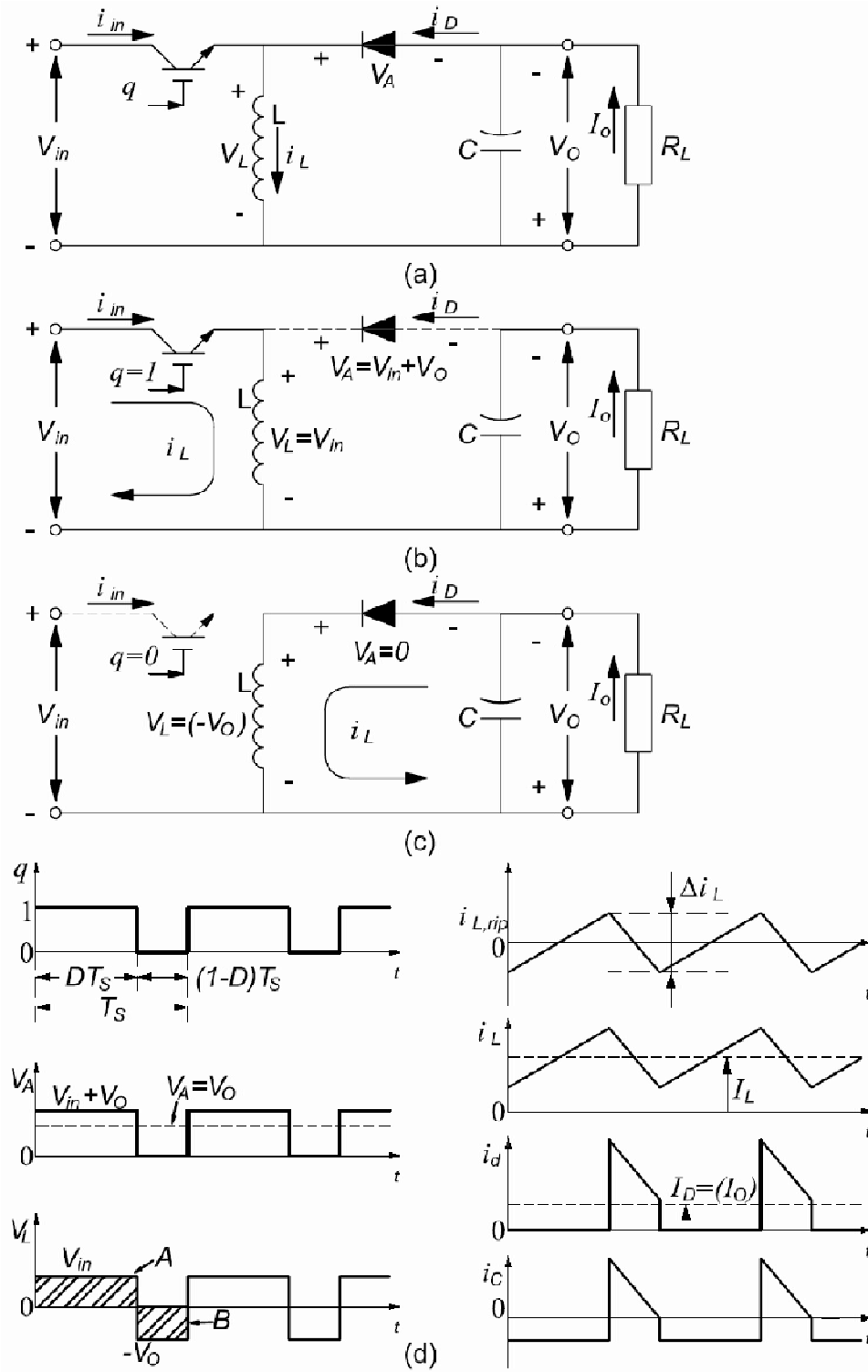
Şekil 4. 2. Azaltan tip konvertörün devre şeması ve anahtarın iletim ve kesim durumu
 (a) Azaltan tip konvertör devre yapısı (b) Yarı iletken anahtarın iletim durumu
 (c) Yarı iletken anahtarın kesim durumu (d) Azaltan tip konvertör dalga şekilleri

Yarı iletken anahtar (q) iletme geçtiğinde yük endüktans (L) üzerinden beslenir. Bu sırada endüktans üzerinde enerji depolanmaya başlanır. Yarı iletken anahtar kesim durumuna geçtiğinde ise serbest geçiş diyotu (D) olarak adlandırılan diyot iletme geçer. Bu sayede endüktans üzerinde depolanan enerji yük (RL) üzerinde harcanır. Devrenin çıkışında bulunan kondansatör (C), anahtarın kesime gittiği süre içerisinde çıkış gerilimini sabit tutmaya çalışır. Endüktans yük akımındaki dalgalanmayı, kondansatör ise çevirici çıkış gerilimindeki dalgalanmayı azaltmak için kullanılır. Alçatıcı tip konvertörde giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

$$V_0 = D.V_{in} \quad (4.2)$$

4.1.3 Artıran-Azaltan Tip (Buck-Boost) Konvertör

Girişteki gerilimi anahtara uygulanan iletim ve kesime göre düşürmeyi veya yükseltmeyi ayarlar. Artıran azaltan tip konvertörlerin başlıca uygulaması, giriş uçlarına göre ters kutuplu çıkış gereken ve çıkış geriliminin giriş geriliminden yüksek veya düşük olduğu ayarlı doğru akım güç kaynaklarıdır[13]. Şekil 4.3’de Artıran Azaltan tip konvertörlerin devre şeması verilmiştir.



Şekil 4. 3. Artıran azaltan tip (buck-boost) konvertör devre şeması ve anahtarın iletim ve kesim durumu

- (a) Artıran azaltan tip konvertör devre yapısı (b) Anahtarın iletim durumu
(c) Anahtarın kesim durumu (d) Artıran azaltan tip konvertör dalga şekilleri

Yarı iletken anahtarın (q) iletme geçmesiyle girişten endüktansa (L) enerji uygulanır, kapasitörde (C) biriken enerji çıkışı düzeltmek için kullanılır ve bu esnada diyot ters kutupludur. Anahtar kesim durumuna geçtiğinde endüktansta biriken enerji açığa çıkar. Artran Azaltan tip (buck-boost) konvertör anahtar iletimde kalma süresinin periyot süresine oranı D olmak üzere giriş ve çıkış gerilimi arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir.

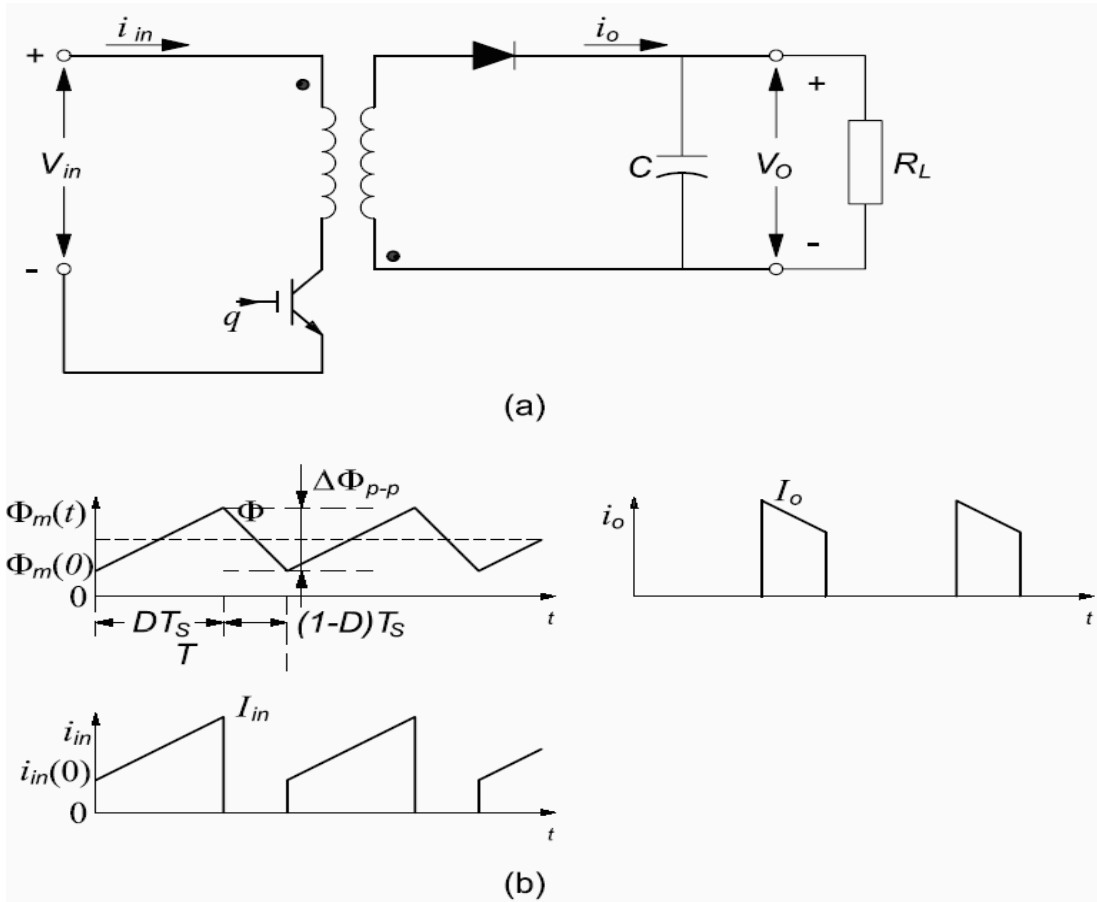
$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (4.3)$$

4.2 İzoleli Dc-Dc Konvertörler

Elektriksel yalıtım gerektiği veya yüksek güçlerde giriş ile çıkış arasındaki dönüştürme oranının yüksek olduğu uygulamalar için kullanışlıdır. Ancak elektriksel yalıtım trafo gibi bir yapı gerektirdiğinden maliyet artışına neden olmaktadır[13].

4.2.1 Geri Dönüslü (Fly-Back) Konvertörler

Bir veya birden çok izole çıkış gerektiğinde ve çıkışın kontrolü tek bir kanaldan yapılmak istenildiğinde bu topoloji uygun bir seçimdir. Düşük güçlerde kullanışlıdır. Giriş gerilim bandı oldukça geniş olabilmektedir. Ancak güç anahtarı seçiminde giriş geriliminin iki katından daha büyük gerilimde çalışabilen anahtar seçilmelidir. Çıkış sayısı isteğe bağlı olarak çoğaltılabilir. Bu durumda çıkışlardan bir tanesi kontrol devresinin geri besleme işareti olarak kullanılır. Şekil 4.4’de geri dönüslü konvertörün devre topolojisi ile anahtarın iletimde ve kesimde olduğu anlardaki devre parametrelerine ait grafikler verilmiştir.



Şekil 4. 4. Geri dönüşlü (Fly-back) konvertör (a) Devre yapısı (b) Dalga şekilleri

D , anahtarın iletimde kalma süresinin periyoda oranı olmak üzere giriş ve çıkış gerilimi için:

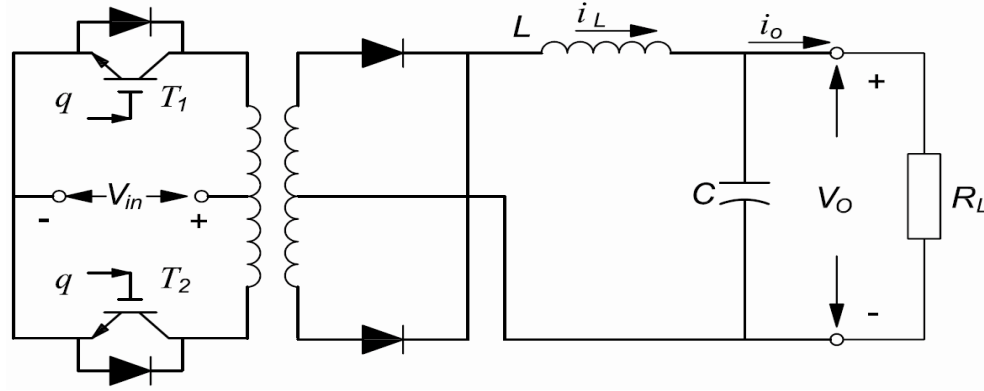
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \cdot \frac{D}{1-D} \quad (4.4)$$

ifadesi yazılabilir. $\frac{N_2}{N_1}$ katsayısı dışında azaltan-artıran çeviricilerle dönüştürme oranı

ile aynıdır. Ayrıca çok kanallı yapılarda gerilim ayarı iyi değildir.

4.2.2 İtme-Çekme (Push-Pull) Konvertörler

İzoleli çeviriciler grubundadırlar ve genellikle yüksek güçlerde kullanılırlar



Şekil 4. 5. İtme-çekme konvertör devre yapısı

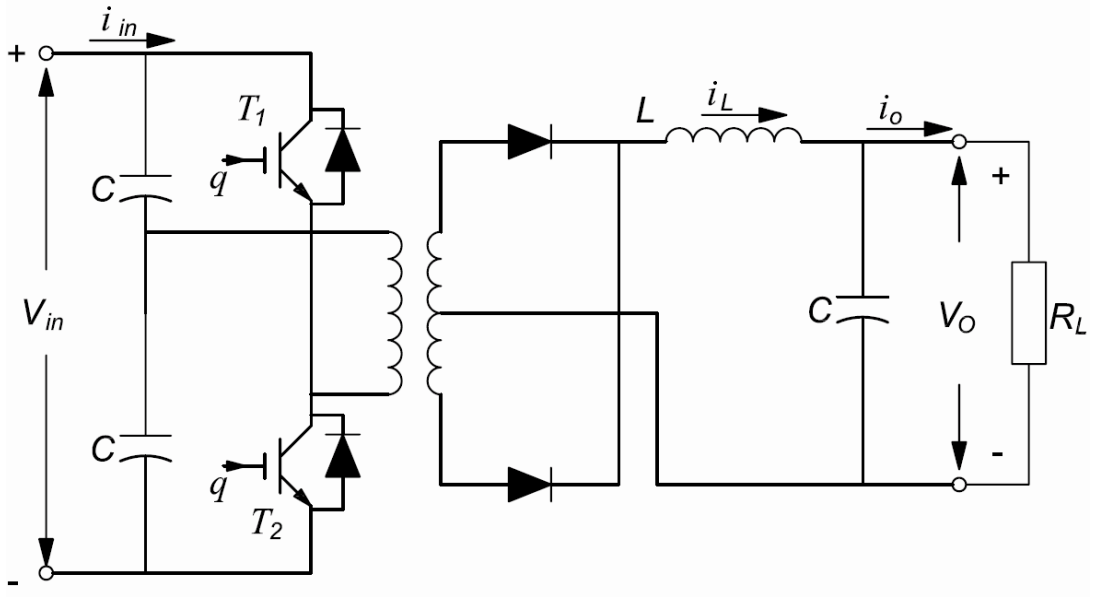
Şekil 4.5’de gösterildiği gibi T_1 ve T_2 anahtarları sıralı olarak açılıp kapanır. Bu durumda sekonder tarafı anahtarlama frekansının iki katı bir çalışma frekansı ile çalışmış olur. İki anahtarın anahtarlama zamanları arasında ölü zaman bırakılmalıdır. Giriş ile çıkış arasındaki aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_o = 2 \frac{D.V_{in}}{N} \quad (4.5)$$

Simetri problemleri ile karşılaşılabilir. Uygun PWM denetimi ile bu sorun giderilebilir. Sürme devresi tasarımı güç anahtarları aynı referansı paylaştıklarından kolayca yapılabilir.

4.2.3 Yarım Köprü (Half Bridge) Konvertörler

İtme-Çekme konvertörlerin yapısındadır. Şekil 4.6’da gösterilen T_1 ve T_2 anahtarları sıralı olarak açılıp kapanır. Kapasiteler giriş gerilimini ikiye böler.



Şekil 4. 6. Yarım köprü konvertör devre yapısı

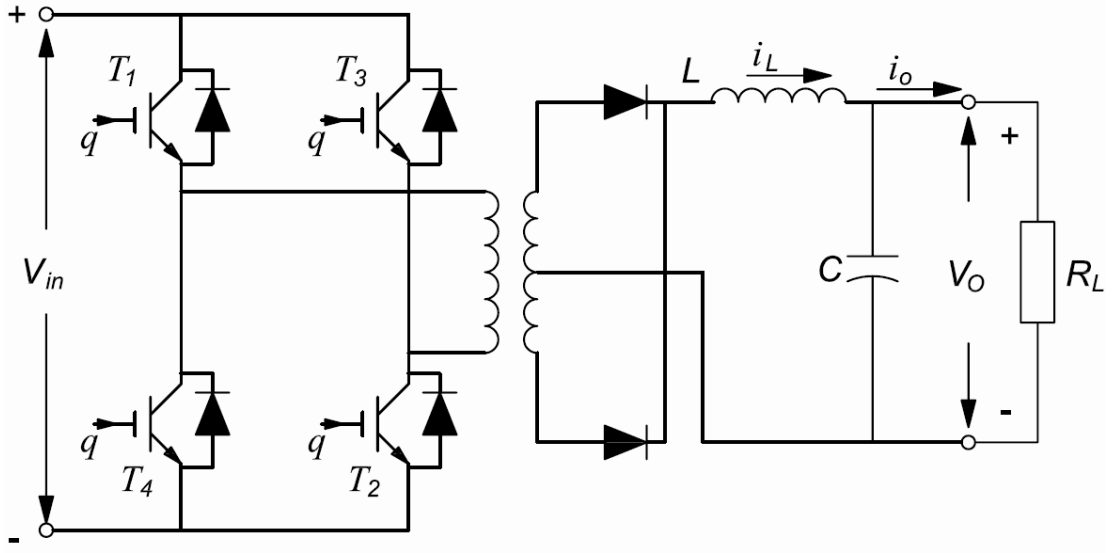
Anahtarların ortak referans noktaları yoktur. Bu yüzden sürme devresi için ayrı kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca sürme esnasında kısa devreye mahal vermemek için asla iki anahtar aynı anda iletimde olmamalıdır. Giriş ile çıkış arasındaki ilişki:

$$V_o = \frac{V_{in} \cdot D}{N} \quad (4.6)$$

şeklinde verilmektedir.

4.2.4 Tam Köprü (Full Bridge) Konvertörler

İtme-Çekme konvertörlerin yapısındadır. Birçok eleman içermesi sebebi ile küçük güçlerde kullanışlı değildir. T_1, T_2 ve T_3, T_4 anahtarları sıralı olarak açılıp kapanır. Şekil 4.7’de temel devre topolojisine ait şema verilmiştir.



Şekil 4. 7. Tam köprü çevirici konvertör devre yapısı

Aynı koldaki anahtarlar aynı anda ilettime sokulmamalıdır. Giriş ile çıkış arasındaki bağıntı:

$$V_o = \frac{2V_{in}.D}{N} \quad (4.7)$$

şeklinde verilmektedir.

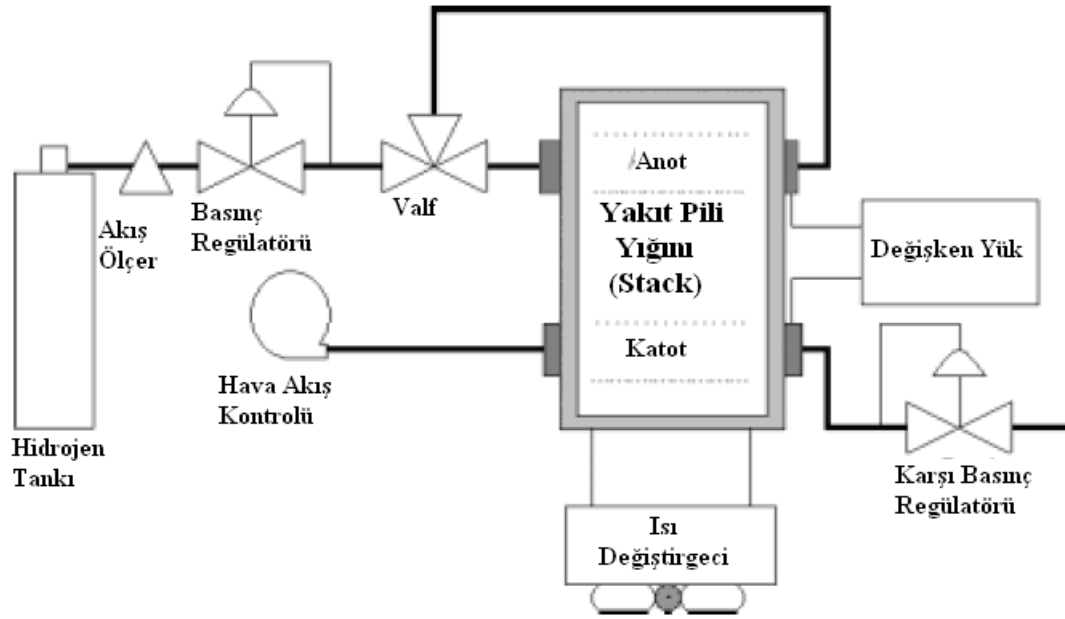
5 PEM YAKIT PİLİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde modellediğimiz PEM yakıt pili sistemi ve sistem parametreleri tanıtılacaktır. Sıcaklık ve basınca bağlı tersinir hücre voltaj denklemi, yakıt pilinde oluşabilecek voltaj düşüş denklemleri ve PEM yakıt hücresinin dinamik modeli verilecektir. Daha sonra akış denklemleri ve termal model denklemleri verilerek, PEM yakıt pili toplam modeli oluşturulacaktır.

5.1 Modellenen PEM Yakıt Pili Sistemi

Bu çalışmada üretim yılı eski olmasına rağmen parametreleri değişik kaynaklardan elde edilebilen PGS-105B adı verilen PEM yakıt pili sistemi esas alınmıştır. Bu sistemde Ballard firmasının ürettiği Mark V (MK5-E) yakıt pili kullanılmaktadır. Bu çalışmada verilen modelleme yaklaşımı parametreleri bulunan diğer yakıt pillerine de uygulanabilir. Şekil 5.1’de modellenen yakıt pili sistemini şematik olarak gösterilmektedir. Basınçlı bir tanktan gelen kuru hidrojen anot basıncını 3 atm de tutan bir basınç regülatörü içinden anoda beslenmektedir. Bir akış ölçer anotta tüketilen hidrojen miktarını kaydeder ve fazla gaz bir diyafram pompa ile tekrar geriye gönderilir. Kompresörden gelen temizlenmiş hava anot kısmına verilir ve bir karşı basınç regülatörü katottaki basıncın 3atm de olmasını sağlar. MK5-E sistemi dahili olarak nemlendiriciye sahiptir ayrıca bir su dolaşım sistemi radyatöre bağlıdır ve sıcaklığı yaklaşık olarak 75°C tutar. 5kW güç üretebilen bu sisteme maksimum 300A akım uygulanabilir[15,16].

Komple yakıt pili sistemi ana birime ek olarak yardımcı cihazlardan oluşmaktadır. Yakıt proses ünitesi gaz düzenleyicisi (reformer), filtre, debi kontrolörü, nemlendirici, basınç regülatörü vb cihazları içermektedir. Benzer şekilde, hava temin sistemi bir kompresör, filtre, debi kontrolörü ve yeterli hava akışını sağlayan bir nemlendirici gerektirmektedir. Soğutucu akışkan, ısısal kontrol ve su giderici için ilave mekanizmalarda gerekmektedir.



Şekil 5. 1. Modellenen Yakıt Pili Sistemi

Modelimizde kullanacağımız PEM yakıt pili sisteminin parametreleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5. 1. Modellenen yakıt pili parametreleri

Parametre	Değeri	Birimi	Anlamı
A	232	$[cm^2]$	Pem yakıt pili aktif alanı
l	178	$[\mu m]$	Membran kalınlığı
P_{H_2}	3	$[atm]$	Hidrojenin kısmi basıncı
P_{O_2}	3	$[atm]$	Oksijenin kısmi basıncı
n	35	$[A\ det]$	PEM yakıt pili hücre sayısı
J_{max}	1300	$[mA/cm^2]$	Maksimum akım yoğunluğu
ψ	23	-	Yakıt pilinin parametrik değeri
B	0,016	-	Yakıt pilinin parametrik değeri
ξ_1	-0,948	-	Yakıt pilinin parametrik değeri
ξ_2	$0,00286 + 0,0002 \cdot \ln(A)$ $\times 4,35 \cdot 10^{-5} \cdot \ln(c_{H_2})$	-	Yakıt pilinin parametrik değeri
ξ_3	$7,6 \cdot 10^{-5}$	-	Yakıt pilinin parametrik değeri
ξ_4	$-1,93 \cdot 10^{-4}$	-	Yakıt pilinin parametrik değeri
C	232×0.035	$[Farad]$	PEM yakıt pili eşdeğer kapasitansı

Tablo 5.1. Modellenen yakıt pili parametreleri (Devamı)

k_a	0,0065	$[mol / s.atm]$	Anot debi sabiti
k_c	0,065	$[mol / s.atm]$	Katot debi sabiti
V_a	0,005	$[m^3]$	Anot hacmi
V_c	0,01	$[m^3]$	Katot hacmi
P_w	3	atm	Hidrojen valf çıkış basıncı
PC_{H_2}	%99	-	Hidrojenin saflık oranı
CF_{H_2}	7.034×10^{-4}	-	Hidrojenin akış dönüşüm faktörü
FR_{O_2}	120	$[mol/s]$	Oksijenin akış oranı
PC_{O_2}	%21	-	Oksijenin saflık oranı
CF_{O_2}	7.036×10^{-4}	-	Oksijenin akış dönüşüm faktörü
K_p	5,5	-	PID oransal sabiti
T_d	0	-	PID Türev sabiti
T_i	0	-	PID integral sabiti
C_t	$17,9 \times 10^3$	$[J/C]$	Termal kapasitans
ΔH	285500	$[J/mol]$	Hidrojenin Entalpi değişimi
C_{CW}	4186,8	$[kJ/K]$	Ortalama özgül ısı
$T_{CW,OUT}$	30	$[^{\circ}C]$	Isı değiştirgeci çıkış sıcaklığı
$T_{CW,IN}$	25	$[^{\circ}C]$	Isı değiştirgeci giriş sıcaklığı
R_t	0,115	$[^{\circ}C/W]$	Hücresinin ısısal direnci
h_{cond}	35,55	$[W/C]$	Isı değiştirgeci iletim katsayısı
h_{conv}	0,025	$[W/A.^{\circ}C]$	Isı değiştirgeci taşınım katsayısı
T_{amb}	25	$[^{\circ}C]$	Ortam sıcaklığı

5.2 PEM Yakıt Pilinin Gerilimi

Tek hücrenin çıkış gerilimi aşağıdaki ifadenin hesaplanmasıyla bulunabilir[2,15,16,].

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmik} - V_{con} \quad (5.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte E_{Nernst} hücrenin termodinamik potansiyelini ifade eder. V_{act} meydana gelen aktivasyon düşüştür ve elektrotlarla ilgili voltaj düşüşünün ölçüsüdür. V_{ohmic} ohmik voltaj düşüşüdür, katı elektrolitten geçen protonların dirençleri ve elektronların dış devreden geçerken dirençleri yüzünden oluşan ohmik voltaj düşüşünün ölçüsüdür. V_{con} reaktant gazların konsantrasyonundaki azalma veya oksijen ve hidrojenin kütle transferinden kaynaklanır. Başka bir voltaj düşüşü de iç akım ve veya gaz geçişlerinden kaynaklanır. V_{FC} denkleminde ilk terim yakıt pili yüksüz açık devre voltajını, geri akalan terimler hücre elektrotlarında kullanılabilir voltajı azaltan terimleri ifade eder. n adet yakıt hücresinin seri bağlanması durumunda toplam voltaj

$$V_{stack} = n \cdot V_{FC} \quad (5.2)$$

şeklinde ifade edilir.

5.2.1 Tersinir Hücre Voltajı

Sabit sıcaklık ve basınçta çalışan bir yakıt pilinden elde edilebilecek maksimum elektrik işi elektrokimyasal reaksiyonun Gibbs serbest enerjisindeki değişim ile belirlenir. Denklem 5.3 ve 5.4’de ifade edildiği gibi yakıt pilinde kayıp yoksa yani işlem tersinir ise Gibbs serbest enerjisinin tümü elektriksel enerjisine dönüştürülür[2].

$$\Delta G = \Delta H - T.\Delta S = W_{elektrik} \quad (5.3)$$

$$W_{elektrik} = Q.E = -n.F.E \quad (5.4)$$

Gibbs serbest enerji değişimi standart şartlar için (25 °C ve 1 atm) aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Delta G^o = -n.F.E^o \quad (5.5)$$

Genel bir $\alpha A + \beta B \rightarrow \chi C + \delta D$ kimyasal reaksiyonu için gibbs serbest enerji değişimi:

$$\Delta G = \Delta G^o - R.T.\ln\left(\frac{P_A^\alpha P_B^\beta}{P_C^\chi P_D^\delta}\right) \quad (5.6)$$

şeklindedir. Burada $\alpha, \beta, \chi, \delta$ kimyasal reaksiyondaki girenler ve çıkanların katsayılarını ifade eder. Standart şartlardaki Gibbs enerji değişimine bağlı bu denklemde; R ideal gaz sabiti P_A, P_B, P_C ve P_D reaksiyona giren ve çıkan gazların kısmi basınçlarıdır.

Denklem 5.6'daki $\Delta G, \Delta G^o$ değerlerinden faydalanılarak Nernst denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$E = E^o + \frac{R.T}{n.F}.\ln\left(\frac{P_A^\alpha P_B^\beta}{P_C^\chi P_D^\delta}\right) \quad (5.7)$$

Pem yakıt pilinin toplam kimyasal denklemi $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ şeklinde yazıldığında,

Gibbs serbest enerjisi Denklem 5.8'deki gibi yazılabilir.

$$\Delta G = \Delta G^o - R.T.\ln\left(\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (5.8)$$

Yine benzer şekilde tersinir gerilim ise

$$E = E^o + \frac{R.T}{2.F}.\ln\left(\frac{P_{H_2}P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}}\right) \quad (5.9)$$

şeklinde yazılır. Hücresinin tersinir voltajı (E_{Nernst}) açık devre termodinamik denge halinde elde edilen hücre potansiyeldir. Bu modelde Nernst eşitliği standart referans sıcaklık 25°C olduğu kabulüne uyarlanarak sıcaklık değişimlerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2.F} + \frac{\Delta S}{2.F}.(T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F}\left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2})\right] \quad (5.10)$$

Denlem 5.10'da değerler yerine konup düzenlenirse:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85.10^{-3}.(T - 298.15) + 4.31.10^{-5}.T.\left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2}\ln(P_{O_2})\right] \quad (5.11)$$

şeklinde yazılabilir. Membran sıcaklığı ve kısmi basıncı hücre akımı ile değiştiği, akım arttıkça oksijen ve hidrojenin kısmi basıncının azaldığı buna karşın sıcaklığın arttığına dikkat edilmelidir.

5.2.2 Aktivasyon Voltaj Düşüşü

Elektrot yüzeylerinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonların hızlarına bağlı kayıplar aktivasyon kayıpları olarak adlandırılır. Elektrotlarda reaksiyonun

oluşabilmesi için belirli bir enerjiye ihtiyaç duyulur. Bu enerji seviyesine ulaşılması halinde reaksiyon gerçekleşebilir.

Anot ve katodu kapsayan aktivasyon kaybı aşağıdaki denklemle hesaplanabilir[15,16].

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2.T + \xi_3.T.\ln(c_{O_2}) + \xi_4.T.\ln(i_{FC})] \quad (5.12)$$

Burada i_{FC} hücre çalışma akımını, ξ ifadeleri ise hücre modelindeki parametrik katsayıları, bu katsayılar kinetik, termodinamik ve elektrokimyasal altyapılara dayanan teorik eşitliklere dayanır. c_{O_2} katodun katalitik yüzeylerindeki oksijenin konsantrasyonudur ve aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$c_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08.10^6.e^{-\left(\frac{498}{T}\right)}} \quad (5.13)$$

5.2.3 Ohmik Voltaj Kayıpları

Ohmik voltaj düşüşü toplayıcı plakalardan ve karbon elektrodlardan transfer olan elektronların direnci ve katı membranı geçen protonların direncinden kaynaklanır. Bu modelde, direnç için genel ifade membrandaki tüm önemli parametreleri içine alır. Membranın eşdeğer direnci aşağıdaki şekilde hesaplanır[15,16].

$$R_M = \frac{\rho_M \cdot \ell}{A} \quad (5.14)$$

Polimer elektrolit yakıt pillerinde yaygın olarak kullanılan Dupont tarafından ticari marka olarak tescillenmiş Nafion tipi membralar kullanılmaktadır. Dupont tarafından kullanılan nafion membranların kalınlıkları verilmiştir.

Nafion117 : $l = 178 \mu m$

Nafion115 : $l = 127 \mu m$

Nafion112 : $l = 51 \mu m$

Yukarıda kalınlıkları verilen Nafion membranlarının öz dirençlerinin sayısal ifadesi aşağıdaki şekildedir.

$$\rho_M = \frac{181.6 \cdot \left[1 + 0.03 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) + 0.062 \cdot \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\psi - 0.634 - 3 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) \right] \cdot \exp \left[4.18 \cdot \left(\frac{T - 303}{T} \right) \right]} \quad (5.15)$$

Denklem 5.15'deki $181.6/(\psi - 0.634)$ ifadesi akım yokken 30°C deki özgül öz direnci; paydadaki eksponansiyel ifade hücre 30°C olmadığındaki sıcaklık düzeltme faktörüdür. ψ parametresi maksimum değeri 23 ile ayarlamak uygundur. Bu parametreye memebranın hazırlanma prosedürü etkilidir ve bağıl nem ve anot gaz sitokimetri bir fonksiyonudur. Yüzde yüz bağıl nem durumunda 14 ve altında değerler alır. Aşırı doymuş durumlarda 22 ve 23 değerleri kullanılmıştır.

Ohmik voltaj düşüşü denklem 5.14 ve 5.15 kullanılarak aşağıdaki ifadeyle hesaplanır.

$$V_{ohmic} = i_{FC} \cdot R_M \quad (5.16)$$

5.2.4 Konsantrasyon Voltaj Düşüşü

PEM yakıt pilinde elektrotlardaki hidrojen ve oksijenin kullanımı sırasında derişim farklılıkları ortaya çıkmakta bu ise o bölgelerdeki kısmi basınçların azalmasına ve buna bağılı olarak da gerilim düşüşlerine yani kayıplara neden olmaktadır. Sistemden çekilen akım miktarının artması da bu kayıplarında artışına neden olmaktadır. Bu voltaj düşüşünü belirlemek için maksimum akım yoğunluğu

tanımlanır, $J_{\max}$, akım yoğunluğu, maksimum yakıt besleme miktarı durumunda maksimumdur. Akım yoğunluğu bu değerin üzerine çıkamaz çünkü yakıtın daha fazla bir miktarda beslenmesi mümkün değildir. $J_{\max}$ tipik olarak 500 ile 1500 mA/cm^2 aralığındadır. Kütle taşınımına bağlı voltaj düşüşü aşağıdaki ifadeyle tanımlanır[2].

$$V_{con} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{\max}} \right) \quad (5.18)$$

Denklem 5.18'deki B parametrik katsayısı hücre ve çalışma durumuna bağlıdır, J ise gerçek akım yoğunluğunu ifade eder.

5.2.5 Dinamik Hücre Modeli

Yakıt pilinde yük çifti katmanları olarak bilinen bir olaya meydana gelir. Bu olay yakıt pilinin dinamiğini anlamak için çok önemlidir. İki farklı yüklü malzeme birbirine temas ederse yüzeylerinde yük birikir veya yük birinde değerine transfer olur. Elektrot ve elektrolit arasındaki yük tabakası elektrik yükü ve enerji birikmesine sebep olur. Böylece elektrik kapasitörü gibi davranır. Voltaj değişirse, voltaj arttığında yükün ortadan kalması veya voltaj düştüğünde yükün artması belli bir zaman alır. Bu tip gecikme aktivasyon ve konsantrasyon potansiyelini etkiler. Ohmik kayıpların ise bundan etkilenmediğini, Ohm kanuna dayandığı ve hücre akımıyla doğru orantılı olduğunu bilinmektedir.

Yük çifti katmanları aktivasyon ve konsantrasyon voltajında birinci dereceden gecikme oluşmasına neden olur. Zaman katsayısı τ oluşan gecikmeyle ilişkilendirilir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\tau = C \cdot R_a \quad (5.19)$$

Denlem 5.19'daki C sistemin eş kapasitansını ve R_a eş direncini ifade eder. Kapasitans değeri birkaç Faraddır. R_a direnci hücre çıkış akımından belirlenir ve aktivasyon ve konsantrasyon voltajının hesaplamasını sağlar. Bu voltaj yeni bir kararlı duruma ulaşan dek akımla dinamik olarak değişir. R_a aşağıdaki şekilde elde edilir[18].

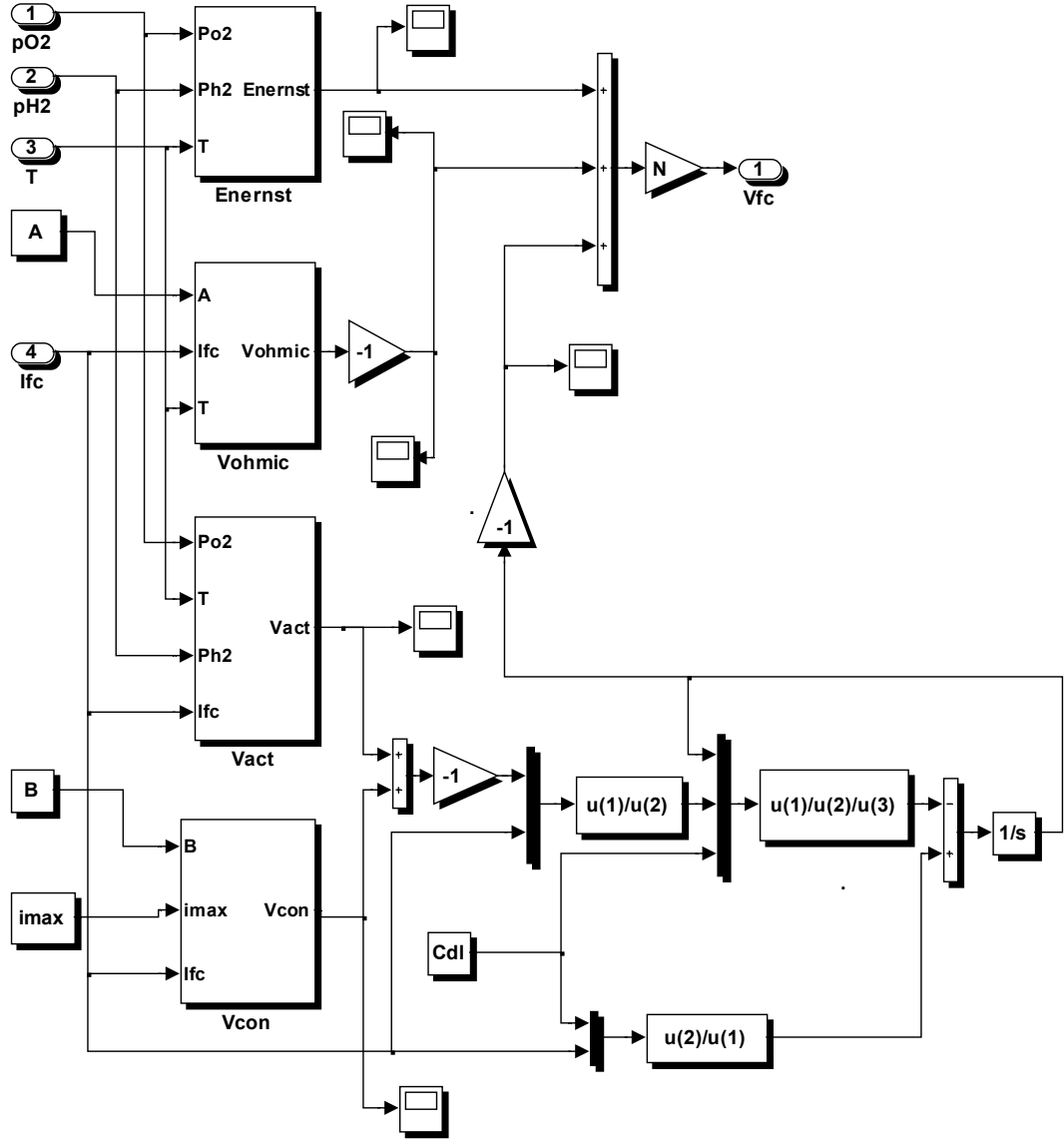
$$R_a = \left(\frac{V_{act} + V_{con}}{i_{FC}} \right) \quad (5.20)$$

$$\frac{d(V_{act} + V_{con})}{dt} = \frac{1}{C} i_{FC} - \frac{1}{\tau} (V_{act} + V_{con}) \quad (5.21)$$

Genel olarak kapasitif etki akım talebindeki değişmeye cevap verecek şekilde yeni voltaj değerine düzgün şekilde ulaşmasını sağlayarak hücreye iyi bir dinamik performans kazandırır.

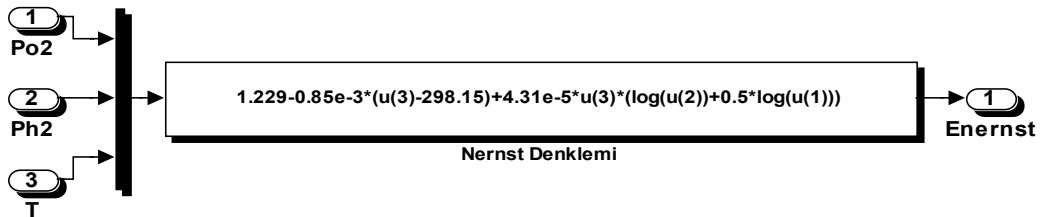
5.2.6 PEM Yakıt Pili Gerilim Model Yapısı

Bölüm 5.2 ile 5.2.5 arasında Nernst eşitliği ile hesaplanan tersinir gerilim, ohmik voltaj kaybı, aktivasyon voltaj kaybı, konsantrasyon voltaj kaybı ve dinamik hücre modeli denklemleri Matlab/Simulink ortamında bir araya getirilmiştir. Şekil 5.2'de PEM yakıt pili gerilimin elde edildiği simülasyon bloğu gösterilmektedir.



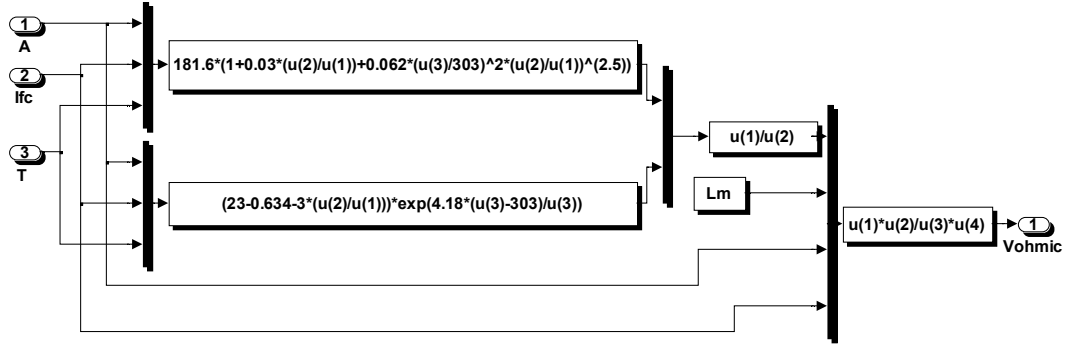
Şekil 5. 2. PEM yakıt pili gerilim simülasyon bloğu

PEM yakıt pili gerilim simülasyon bloğunda verilen Nernst tersinir gerilim alt sistemin iç yapısı Şekil 5.3’de verilmektedir.

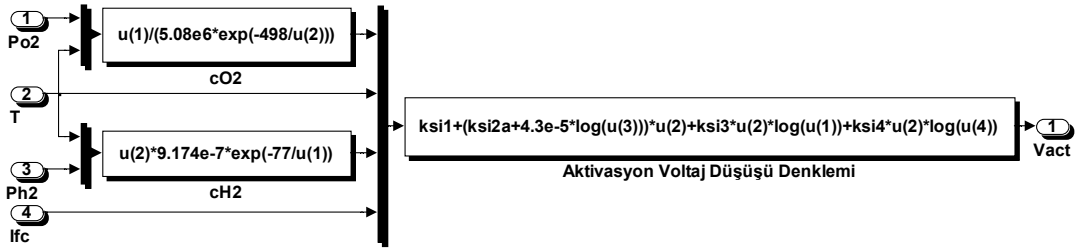


Şekil 5. 3. Nernst denklemi simülasyon bloğu

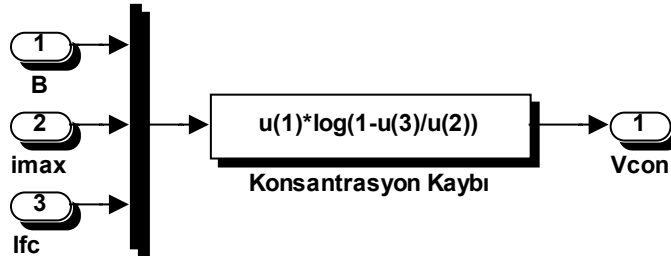
PEM yakıt pili gerilim simülasyon bloğunda verilen Ohmik voltaj düşüşü alt sisteminin iç yapısı Şekil 5.4’de verilmektedir. Şekil 5.5’de aktivasyon voltaj düşüşü alt sisteminin iç yapısı verilmiştir. Son olarak da Şekil 5.6’da konsantrasyon voltaj düşüşü alt sisteminin iç yapısı verilmiştir.



Şekil 5. 4. Ohmik voltaj düşüşü simülasyon bloğu



Şekil 5. 5. Aktivasyon voltaj düşüşü simülasyon bloğu



Şekil 5. 6. Konsantrasyon voltaj düşüşü simülasyon bloğu

5.3 PEM Yakıt Pili Akış Modeli

Anot ve katottaki reaksiyon elemanları akış oranı yakıt hücresi akımının genliği ile birlikte hidrojen ve oksijenin etkili kısmi basıncını belirler. Analitik bir bakışla, yakıt pilinin akımındaki bir artış hidrojen ve oksijen tüketiminin seviyesinde bir artış ile ilişkilendirilir. Bu durum aynı zamanda reaksiyon basıncında bir düşüşü de ima eder. Yakıt pilleri değişik akış regülasyonu ve kontrol mekanizmaları ile birlikte gelir.

İdeal gaz ve mol korunumu kanununa dayanarak, her bir gazın kısmi basıncı bulunabilir. Herhangi bir anda reaksiyon basıncı yakıt pili içindeki gaz miktarı ile orantılıdır. Bu ilişki gaz giriş debisi eksi gaz çıkış debisi ve gaz kullanımına eşittir. Anot için bu eşitlik aşağıdaki şekilde verilebilir[18].

$$\frac{V_a}{R.T} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2,in} - \dot{m}_{H_2,out} - \dot{m}_{H_2,used} \quad (5.22)$$

Toplam hidrojen kullanımı hücre sayısı ve akımı ile orantılı olduğundan bu denklem aşağıdaki şekilde verilebilir

$$\frac{V_a}{R.T} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2,in} - \dot{m}_{H_2,out} - \frac{N.i}{2.F} \quad (5.23)$$

Ballard yakıt pilinin anodu tank içine depolanan saf hidrojenle(99.99%) beslenmektedir. Bir basınç regülatörü hidrojen basıncını ayarlamaktadır ve aşırı hidrojen anoda tekrar sirkülasyon edilmektedir. Hidrojenin kısmi basıncı ile dolaşan(basıncı ayarlanan) hidrojen arasındaki fark aşağıdaki şekilde verilen molar çıkış debisi ile ilişkilendirilebilir.

$$\dot{m}_{H_2,out} = k_a (P_{H_2} - P_w) \quad (5.24)$$

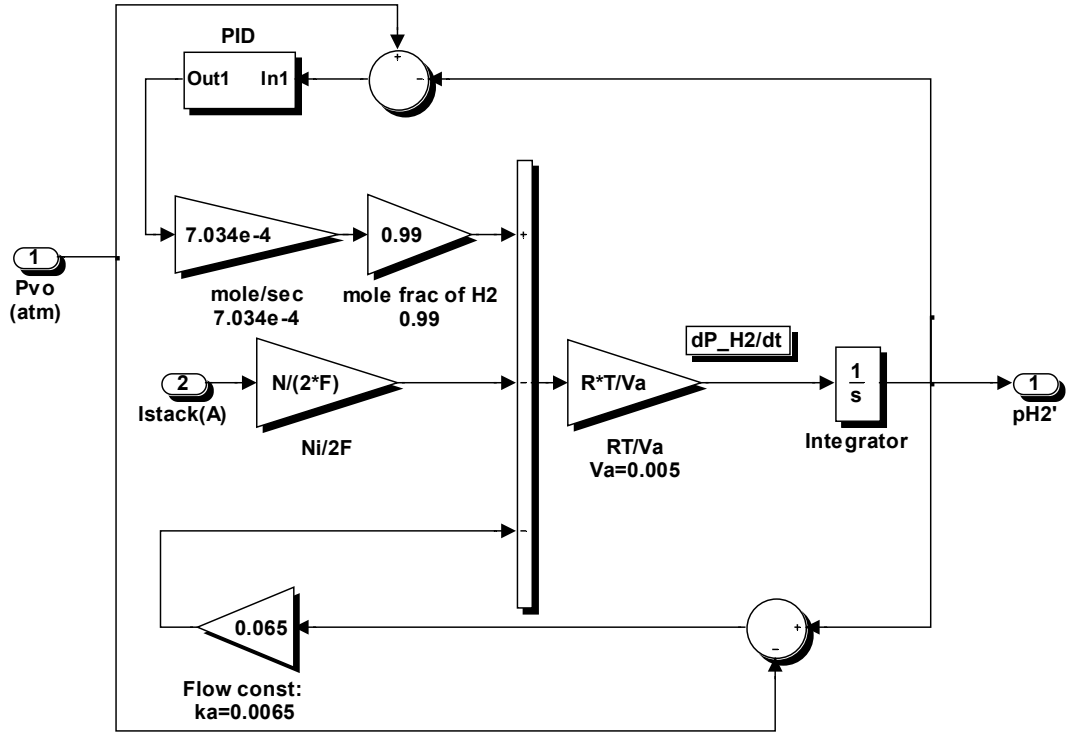
Giriş debisi $\dot{m}_{H_2,in}$ hidrojenin kısmi basıncını geri besleme parametresi ve tank basıncını referans olarak alan regülatörün veya kontrolörün modellenmesi ile bulunabilir. Verilen bir yük ve sıcaklık için hidrojen kısmi basıncı denklemler kullanılarak bulunabilir.

$$\dot{m}_{H_2,in} = FR_{H_2} . PC_{H_2} . CF_{H_2} \quad (5.25)$$

Hidrojen giriş akış oranı slpm den (Standart Liter Per Minute) dönüşüm faktörü (1 slpm = $7.034 \times 10^{-4} \text{ mol s}^{-1}$) kullanılarak mol s^{-1} çevrilmiştir. Hidrojenin saflığının %99 seviyesinde olduğu düşünülmüştür. Anotta basınç regülatörünün görevi basit bir PID blok kullanılarak yerine getirilmiştir. Burada PID kontrol yakıt pili içindeki hidrojen basıncını geri besleme(feedback) parametresi olarak ve tank basıncını ayar değeri(set point) olarak almaktadır. PID Kontrolör yapısı aşağıda verilmektedir.

$$G(s)_{PID} = \frac{K_P (s + T_d . s^2 + 1/T_i)}{s} \quad (5.26)$$

PEM yakıt pili anot tarafı akış modeli yukarıdaki denklemler kullanılarak Matlab/Simulink ortamında oluşturulabilir. Şekil 5.7’de anot tarafı için oluşturulan simülasyon blok yapısı görülmektedir.



Şekil 5. 7. PEM yakıt pili anot tarafı simülasyon blok yapısı

Benzer bir modelleme metodu katot için oluşturulabilir. Katot kütle korunumu denklemi aşağıdaki şekilde verilebilir

$$\frac{V_C}{R.T} \frac{dP_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2,in} - \dot{m}_{O_2,out} - \dot{m}_{O_2,used} \quad (5.27)$$

Hücre sayısına ve hücre akımı ile ilgili toplam oksijen tüketimi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$\frac{V_C}{R.T} \frac{dP_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2,in} - \dot{m}_{O_2,out} - \frac{N.i}{4.F} \quad (5.28)$$

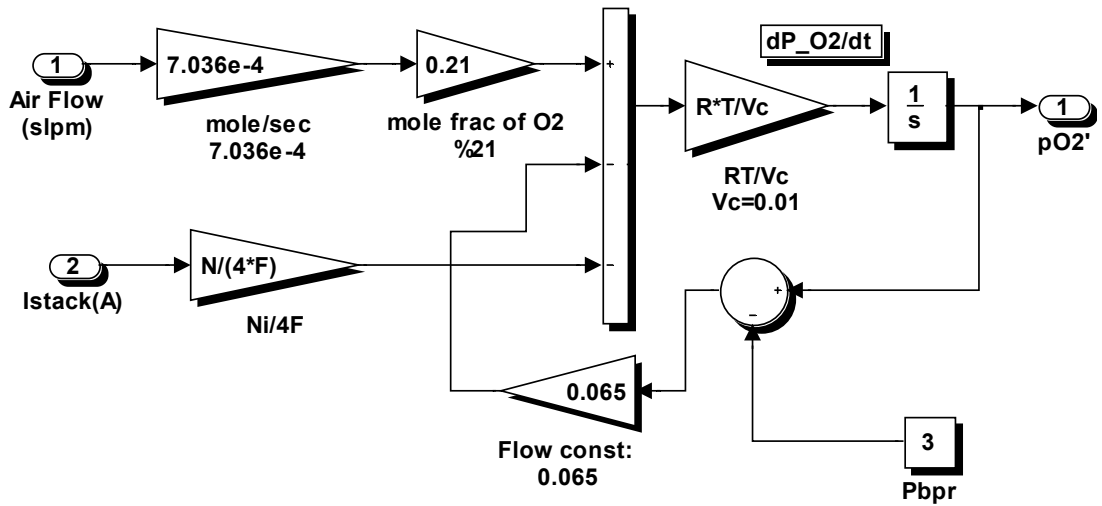
Ele alınan sistemin katodu çıkış kısmında oksijen basıncını belirlenen seviyede tutan karşı basınç (backpressure) regülatörüne sahiptir. Pil içindeki oksijenin kısmi basıncı ile ayarlanan basınç arasındaki fark aşağıdaki denklemde ifade edildiği gibi mol olarak çıkış oksijen debisi ile ilgilidir:

$$\dot{m}_{O_2,out} = k_C (P_{O_2} - P_{BPR}) \quad (5.29)$$

Giriş oksijen debisi $\dot{m}_{O_2,in}$ hava giriş debisi ile hava içinde oksijenin mol oranı %21 ile çarpımından bulunabilir. Verilen bir havanın giriş debisi, sıcaklık ve pil akımı için herhangi bir zaman için oksijenin kısmi basıncı denklemlerin hesaplanmasından aşağıdaki ifadeyle bulunabilir.

$$\dot{m}_{O_2,in} = FR_{O_2} \cdot PC_{O_2} \cdot CF_{O_2} \quad (5.30)$$

Oksijen basıncındaki değişim denklemler kullanılarak tahmin edilmiştir. Havanın oksijen içeriğinin %21 ve dönüşüm faktörü 7.036×10^{-4} (1 slpm = $7.036 \times 10^{-4} \text{ mol s}^{-1}$) alınmıştır. Karşı basınç regülatörünün etkisi sabit bir akış yönü basıncını gösteren bir blokla modellenmiştir. Şekil 5.8’de katot tarafı için kullanılan denklemler birleştirilerek oluşturulmuş simülasyon blok yapısı verilmiştir.



Şekil 5. 8. PEM yakıt pili katot tarafı simülasyon blok yapısı

5.3.1 PEM Yakıt Pili Termal Modeli

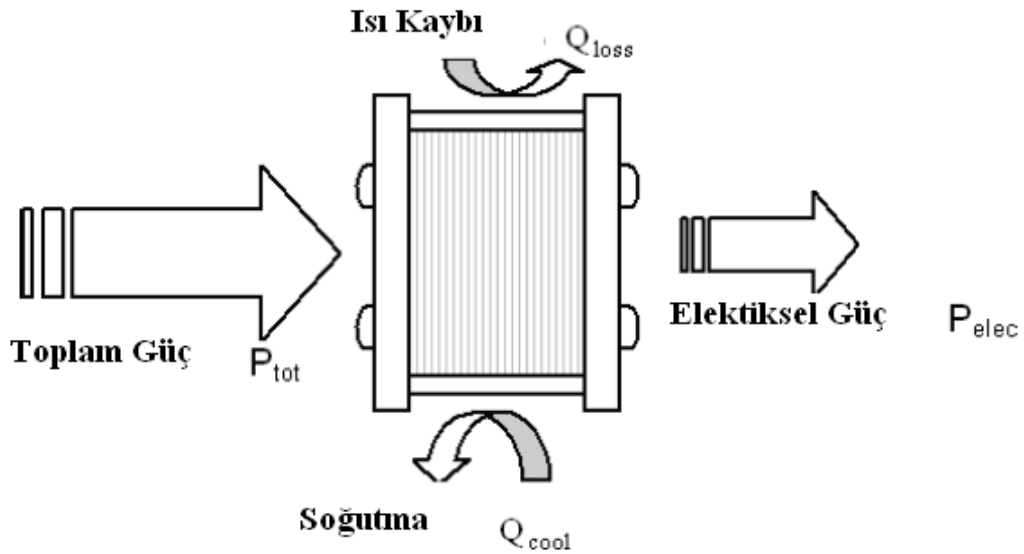
Bir yakıt pilinin performansı büyük oranda yakıt hücresinin sıcaklığına bağlıdır. Yüksek sıcaklık genellikle polarizasyon eğrisini yukarı doğru kaydırır. Diğer yandan eğer sıcaklık çok fazla ise membranın susuz kalmasına ve hücrenin

bozulmasına neden olabilir. Bu yüzden uygun bir sıcaklığı sağlamak optimum bir performansı başarmak için önemlidir. Dıştan soğutulan yakıt pili sistemlerinde soğutma işlemi dıştan kontrol edilen soğutucu akışkanla yapılmaktadır.

Genellikle bir PEM yakıt pili sisteminde yakıt hücresi sıcaklığının 80 derecenin altında tutulması amaçlanır. Elektriksel yükteki değişimler çalışma sıcaklığını büyük ölçüde etkiler. Yük akımındaki bir artış yakıt hücresi içinde daha yüksek güç kayıplarına ve sonuçta sıcaklık yükselmesine sebep olur.

Bu çalışmada modellenen yakıt pili her beş hücre grubunun arasında dolaşan sabit bir su akışına sahiptir. Oksidant çıkışındaki sıcaklık 75 dereceye ulaştığında su radyatöre yönlendirilmektedir. Tek dinamik kontrol sıcaklığa bağlı olarak çalışan radyatör fanlarının sayısıdır.

Yakıt hücresi içine hidrojen girmesiyle ile verilen toplam enerji dört şekilde kullanılabilir. Bunlar elektriksel bir yük tarafından tüketim, soğutucu vasıtası ile sıcaklığın giderilmesi, yüzeydeki ısı kaybı ve hücre tarafından enerjinin emilmesidir.



Şekil 5. 9. PEM yakıt pili termal model yapısı

Sistem sıcaklığı(yakıt hücresi) birinci dereceden bir diferansiyel denklemle alınan ısı ile ilişkilendirilebilir ve Denlem 5.31'deki gibi yazılabilir.

$$C_t \frac{dT}{dt} = Q_{stack} \quad (5.31)$$

Enerji dengesi ifadesinden aşağıdaki denklem yazılabilir

$$C_t \frac{dT}{dt} = P_{tot} - P_{elec} - Q_{cool} - Q_{loss} \quad (5.32)$$

Yakıt hücresine toplam güç girişi doğrudan tüketilen hidrojen miktarı ile ilişkilidir. Hidrojen tüketimi hücre akımına ve hücre sayısına bağlı olduğundan toplam güç girişi aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir

$$P_{tot} = m_{H_2,used} \Delta H = \frac{N.i}{2.F} \Delta H \quad (5.33)$$

Elektriksel güç çıkışı basit volt-amper ilişkisi ile verilir

$$P_{elec} = V_{stack} \cdot i \quad (5.34)$$

Soğutma suyu tarafından alınan ısı ile ilgili oran hücre ile soğutma suyu giriş/çıkışı arasındaki ısı değiştiricinin yüzey alanı ve ortalama sıcaklık farkı ile ilişkilendirilebilir ve aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Q_{cool} = C_{CW}(T_{CW,OUT} - T_{CW,IN}) = UA_{HX} \cdot LMTD \quad (5.35)$$

Denklem 5.35’de verilen ortalama logaritmik sıcaklık farkını ifadesi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$LMTD = \frac{(T - T_{CW,IN}) - (T - T_{CW,OUT})}{\ln[(T - T_{CW,IN}) / (T - T_{CW,OUT})]} \quad (5.36)$$

Hücre yüzeyinde oluşan ısı kaybı hücre sıcaklığı ve ortam sıcaklığı ile orantılıdır ve aşağıdaki ifadeyle hesaplanır.

$$Q_{loss} = \frac{T - T_{amb}}{R_t} \quad (5.37)$$

Denklem 5.37 aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenebilir.

$$(T_{CW,OUT} - T_{CW,IN}) \ln \left[\frac{(T - T_{CW,IN})}{(T - T_{CW,OUT})} \right] = \frac{UA_{HX}}{C_{CW}} [(T - T_{CW,IN}) - (T - T_{CW,OUT})] \quad (5.38)$$

$$(T_{CW,OUT} - T_{CW,IN}) \ln \left[\frac{(T - T_{CW,IN})}{(T - T_{CW,OUT})} \right] = \frac{UA_{HX}}{C_{CW}} (T - T_{CW,IN} - T + T_{CW,OUT}) \quad (5.39)$$

$$(T_{CW,OUT} - T_{CW,IN}) \ln \left[\frac{(T - T_{CW,IN})}{(T - T_{CW,OUT})} \right] = \frac{UA_{HX}}{C_{CW}} (T_{CW,OUT} - T_{CW,IN}) \quad (5.40)$$

Yine benzer şekilde Denklem 5.40 aşağıdaki şekilde sadeleştirilebilir.

$$\ln \left[\frac{(T - T_{CW,IN})}{(T - T_{CW,OUT})} \right] = \frac{UA_{HX}}{C_{CW}} \quad (5.41)$$

Denklem 5.41'deki logaritmik ifade aşağıdaki şekilde açılabilir.

$$\frac{(T - T_{CW,IN})}{(T - T_{CW,OUT})} = e^{\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} \rightarrow (T - T_{CW,IN}) = (T - T_{CW,OUT}) \cdot e^{\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} \quad (5.42)$$

$$(T - T_{CW,IN}) e^{-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} = (T - T_{CW,OUT}) \quad (5.43)$$

Elde edilen Denklem 5.41'de $T_{CW,IN}$ ifadesi eşitliğin her iki tarafından çıkartılırsa:

$$(T - T_{CW,IN})e^{\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} - T_{CW,IN} = (T - T_{CW,OUT}) - T_{CW,IN} \quad (5.44)$$

$$(T - T_{CW,IN})e^{\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} - T_{CW,IN} = (T - T_{CW,IN}) - T_{CW,OUT} \quad (5.45)$$

elde edilir. Denklem 5.45 yeniden düzenlenip $T_{CW,OUT}$ ifadesi:

$$T_{CW,OUT} = T_{CW,IN} + (T - T_{CW,IN}) - (T - T_{CW,IN})e^{\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} \quad (5.46)$$

$$T_{CW,OUT} = T_{CW,IN} + (T - T_{CW,IN}).(1 - e^{\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}}) \quad (5.47)$$

şeklinde yazılabilir. UA_{HX} ifadesini bulmak için aşağıdaki deneye dayalı formül kullanılabilir

$$UA_{HX} = h_{cond} + h_{conv}.i$$

Bölüm başında verilen Denklem 5.32 aşağıdaki şekilde tekrar yazılabilir.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_t} (P_{tot} - P_{elec} - Q_{cool} - Q_{loss}) \quad (5.48)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_t} \left[\left(\frac{N.i}{2.F} \Delta H - V_{stack} \right).i - C_{CW} (T_{CW,OUT} - T_{CW,IN}) - \frac{T - T_{amb}}{R_t} \right] \quad (5.49)$$

Denklem 5.47'deki $T_{CW,OUT}$ ifadesi denklem 5.49'da yerine yazılırsa:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_t} & \left[\left(\frac{N.i}{2.F} \Delta H - V_{stack} \right).i - C_{CW} \left[(T_{CW,IN} + (T - T_{CW,IN}).(1 - e^{\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}})) \right. \right. \\ & \left. \left. - T_{CW,IN} \right) - \frac{T - T_{amb}}{R_t} \right] \end{aligned} \quad (5.50)$$

elde edilir. Denklem 5.50 aşağıdaki şekilde sadeleştirirse:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_t} \left[\left(\frac{N.i}{2.F} \Delta H - V_{stack} \right) i - C_{CW} [(T - T_{CW,IN}) \cdot (1 - e^{-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}})] - \frac{T - T_{amb}}{R_t} \right] \quad (5.51)$$

yazılabilir. Denklem 5.51 aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} = & - \left(\frac{1}{C_t \cdot R_t} + \frac{C_{CW}}{C_t} \left(1 - e^{-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} \right) \right) T + \frac{1}{C_t} \left(\frac{N.i}{2.F} \Delta H - V_{stack} \right) i \\ & + \frac{T_{amb}}{C_t \cdot R_t} + \frac{C_{CW} \cdot T_{CW,IN}}{C_t} \left(1 - e^{-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} \right) \end{aligned} \quad (5.52)$$

Anlaşılmayı kolaylaştırmak için Denklem 5.52 aşağıdaki gibi basit şekilde yazılabilir.

$$\frac{dT}{dt} = -a.T + b \quad (5.53)$$

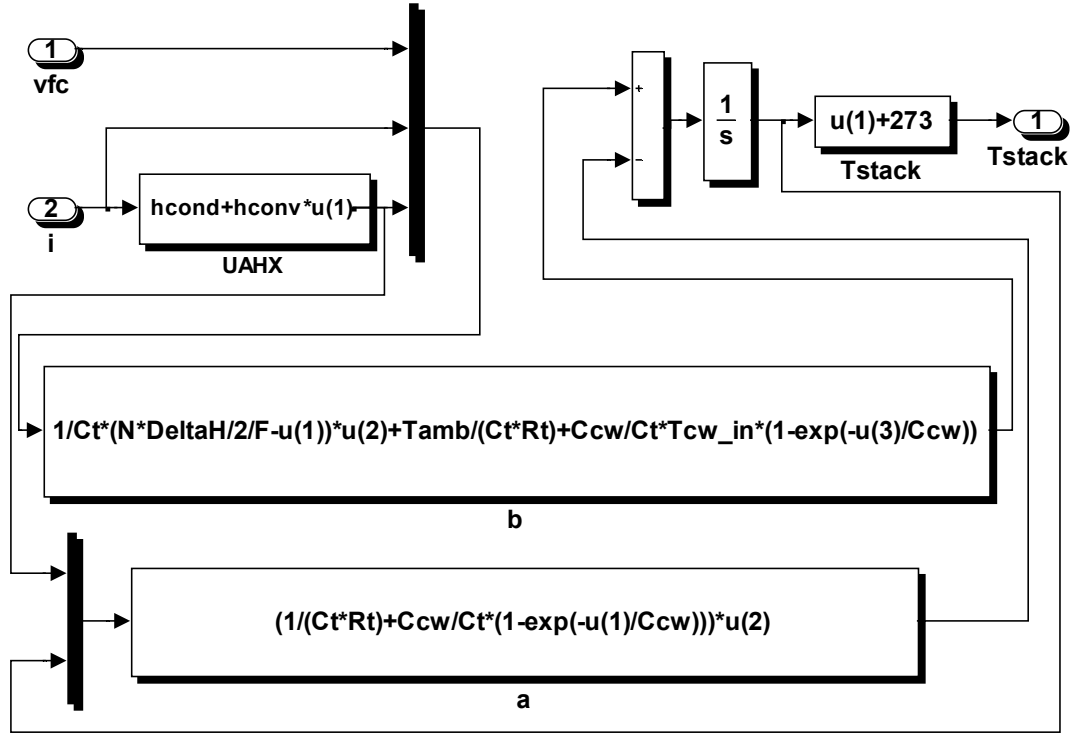
Termal direnç ve termal kapasitansın çarpımı aşağıda verildiği şekilde zaman sabitini oluşturur.

$$\tau = R_t \cdot C_t \quad (5.54)$$

$$a = \frac{1}{\tau} + \frac{C_{CW}}{C_t} \left(1 - e^{-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} \right) \quad (5.55)$$

$$b = \frac{1}{C_t} \left(\frac{N.i}{2.F} \Delta H - V_{stack} \right) i + \frac{T_{amb}}{\tau} + \frac{C_{CW} \cdot T_{CW,IN}}{C_t} \left(1 - e^{-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}}} \right) \quad (5.56)$$

Termal model için elde edilen denklemler Matlab/Simulink ortamında bir araya getirilerek Şekil 5.10'da verilen PEM yakıt pili termal model simülasyon bloğu oluşturulabilir.

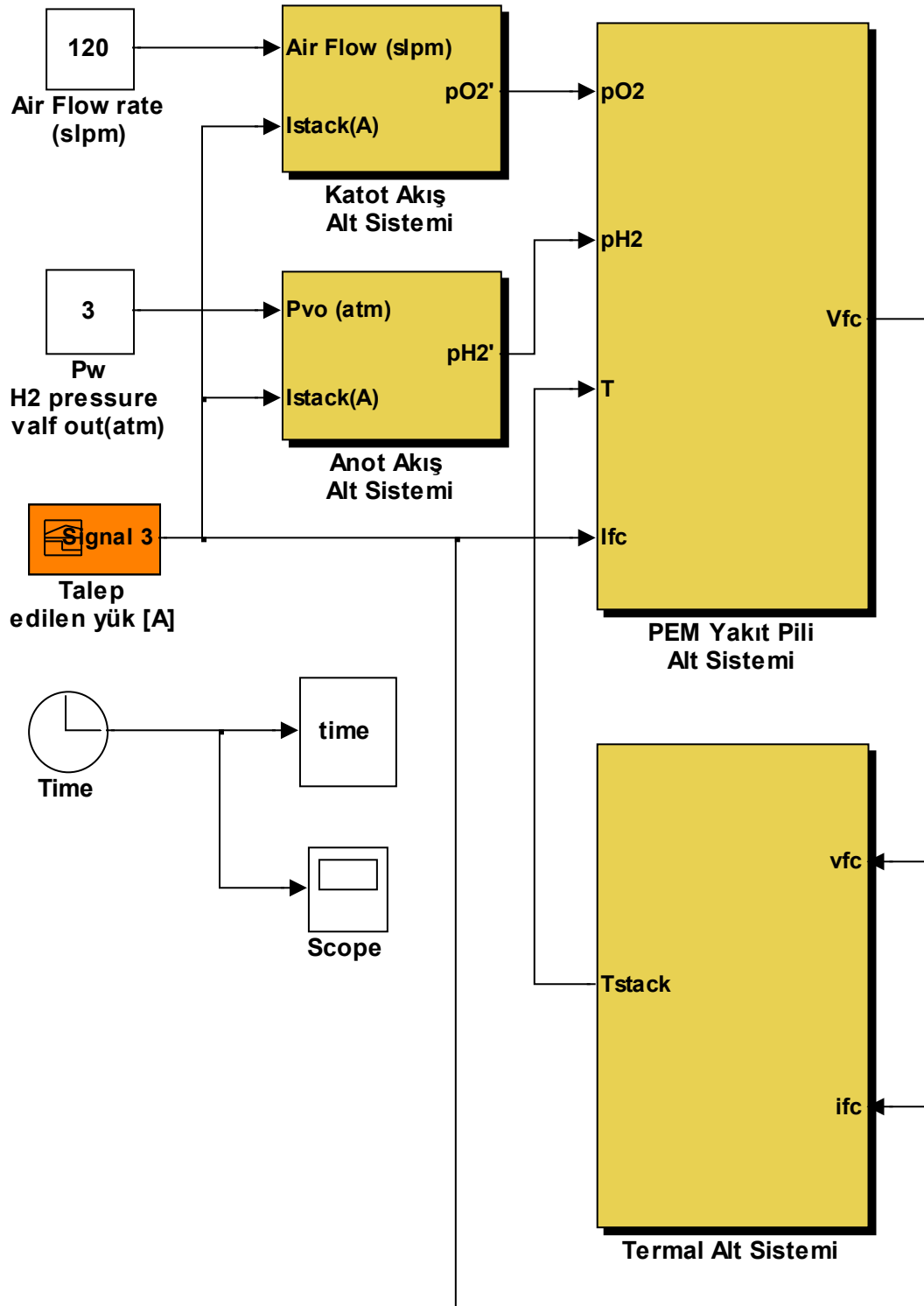


Şekil 5. 10. PEM yakıt pili termal model simülasyon blok yapısı

Sekil 5.10'da Matlab/Simulink ortamındaki oluşturulan polimer elektrolit yakıt pilinin toplam simülasyon modeli gösterilmiştir.

5.4 PEM Yakıt Pili Toplam Sistem Modeli

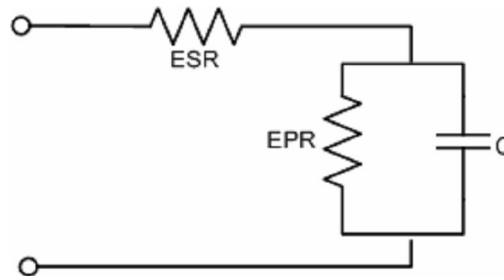
Bundan önceki bölümlerde PEM yakıt pili gerilim modeli oluşturuldu. Daha sonraki bölümlerde ise akış modeli ve termal model oluşturuldu. Bu bölümde ise daha önce elde edilen modeller Matlab/Simulink ortamında birleştirilerek Şekil 5.11'de gösterilen PEM yakıt pili toplam sistem modeli oluşturulmuştur.



Şekil 5. 11. PEM yakıt pili toplam sistem modeli

6 Süperkapasitör Modellenmesi

Süperkapasitör terimi teknolojidaki gelişmeler ve elektrot malzemelerindeki ilerlemeler sayesinde kapasitörlerin enerji yoğunluğunun büyük ölçüde artırılmasını ifade etmektedir. Şekil 6.1’de bir süperkapasitör birimine ait klasik eşdeğer devre verilmiştir. Model bir kapasitans (C), şarj ve deşarj durumlarını temsil eden bir seri eşdeğer dirençten (ESR, R1) ve kapasitörün kendi deşarj kayıplarını temsil eden paralel bir dirençten (EPR,R2) oluşmuştur. EPR, sızıntı etkilerini modeller ve sadece süperkapasitörün uzun dönem enerji depolama performansı üzerinde etkiye sahiptir[19].



Şekil 6. 1. Süperkapasitör eşdeğer devresi şeması

Süperkapasitör akım ve gerilimi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir[20].

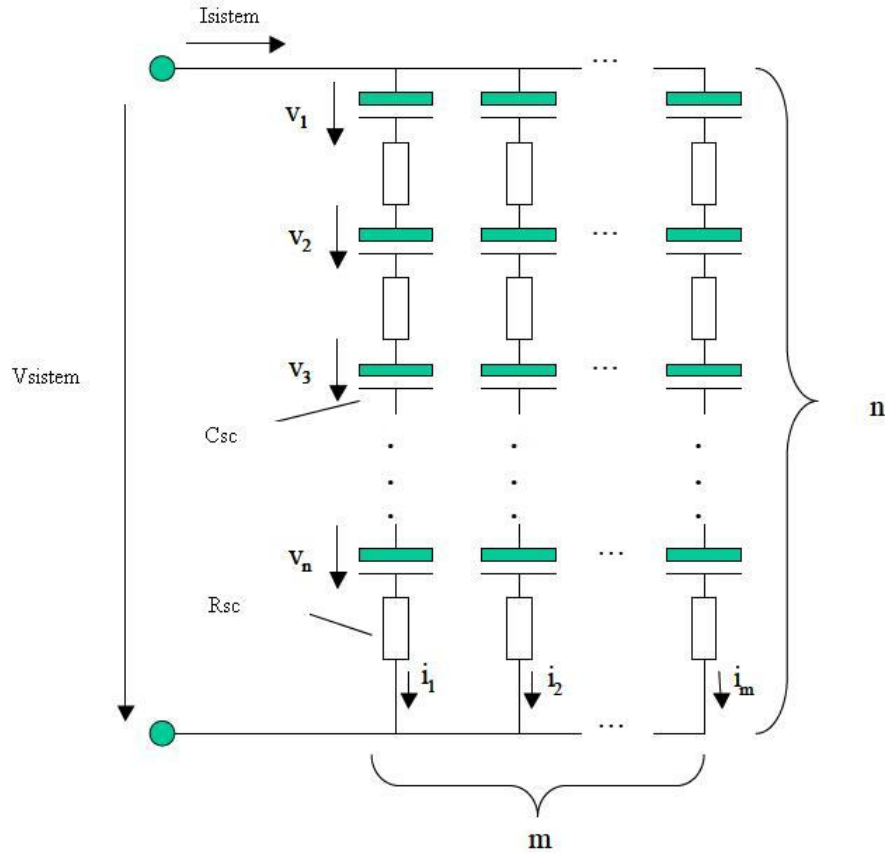
$$i_{SC} = i_0 + \frac{1}{R_2} \int_0^t i_0 \cdot dt \quad (6.1)$$

$$v_{SC} = R_1 \cdot i_C + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 \cdot dt \quad (6.2)$$

Süperkapasitör bankından çekilen enerji, doğrudan kapasitansa ve süperkapasitörün uç gerilimine bağlıdır ve aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilebilir

$$E_{SC} = \frac{1}{2} C (V_{SC,ILK}^2 - V_{SC,SON}^2) \quad (6.3)$$

Süperkapasitör bank belirli bir miktar enerjiyi karşılamak zorunda kaldığında, süperkapasitör bank uç gerilimi azalır. Yukarıdaki denklemde salınan veya kazanılan enerjiye bağlı gerilim değişiminin denklemidir. Süperkapasitör bank'ın yük tarafına enerji salması durumunda E_{SC} pozitif, enerjinin süperkapasitör bank tarafından kazanımı durumunda da E_{SC} negatiftir.



Şekil 6. 2. Süperkapasitörlerin bağlantı şekilleri [22]

İhtiyaç duyulan enerjiyi karşılamak için Şekil 6.2'de gösterildiği gibi süperkapasitörler seri veya paralel olarak bağlanabilirler. İstenilen uç gerilim değerini seri bağlanacak süperkapasitörlerin sayısı tayin eder. İstenilen kapasitans değerini ise paralel bağlanan süperkapasitörlertayin eder. Süperkapasitör sistemin eşdeğer değerler aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

$$C_{sistem} = \frac{m}{n} \cdot C_{SC} \quad (6.4)$$

$$R_{sistem} = \frac{n}{m} \cdot R_{SC} \quad (6.5)$$

$$V_{sistem} = \sum_{j=1}^n V_{sc} \quad (6.6)$$

$$I_{sistem} = \sum_{j=1}^m I_{sc} \quad (6.7)$$

Tablo 6.1’de Vinatech firmasının üretmiş olduğu Xelled markalı süperkapsitörlerin veri sayfası verilmiştir. Bu çalışmada PEM yakıt pili çalışma gerilimine uygun olacak biçimde tablodan süperkapsitör seçimi yapılacaktır.

Tablo 6. 1. Modellenen süperkapsitörün özellikleri [23]

Standard Products				
Part Number	Rated Voltage(V)	Capacitance (F)	ESR(m Ω)	
			AC(@1kHz)	DC
VHC 2R3 106 MG	2,3	10	150	180
VHC 2R3 226 MG		22	120	170
VHC 2R3 506 MG		50	60	100
VHC 2R3 127 MG		120	45	80
VHC 2R3 227 MG		220	30	50
VHC 2R3 407 MG		400	20	25
VHC 2R3 607 MG		600	15	20
VEC 2R5 036 MG	2,5	3	140	350
VEC 2R5 056 MG		5	110	250
VEC 2R5 106 MG		10	65	120
VEC 2R5 256 MG		25	35	65
VEC 2R5 606 MG		60	20	30
VEC 2R5 127 MG		120	18	25
VEC 2R5 227 MG		220	14	18
VEC 2R5 357 MG		350	6	10
VEC 2R5 407 MG		400	5	8
VEC 2R5 607 MG		600	4	6

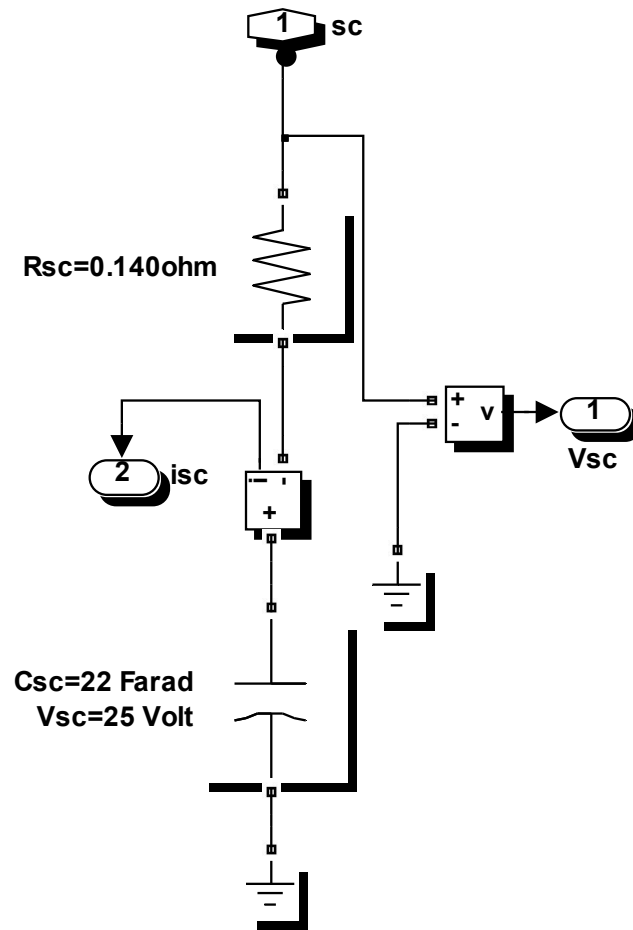
Bu çalışmada Tablo 6.1’de işaretlenmiş süperkapsitör verileri kullanılmıştır. 10 adet süperkapsitör hücresi seri bağlanarak sisteme entegre edileceği düşünülerek aşağıda hesaplamaları yapılmıştır.

$$V_{SC} = 2,5V \rightarrow V_{Sistem} = 10.V_{SC} = 10.2,5 = 25V \quad (6.8)$$

$$C_{SC} = 220F \rightarrow C_{Sistem} = C_{SC}/10 = 220/10 = 22F \quad (6.9)$$

$$R_{SC} = 14m\Omega \rightarrow R_{Sistem} = 10.R_{SC} = 10.14 = 140m\Omega \quad (6.10)$$

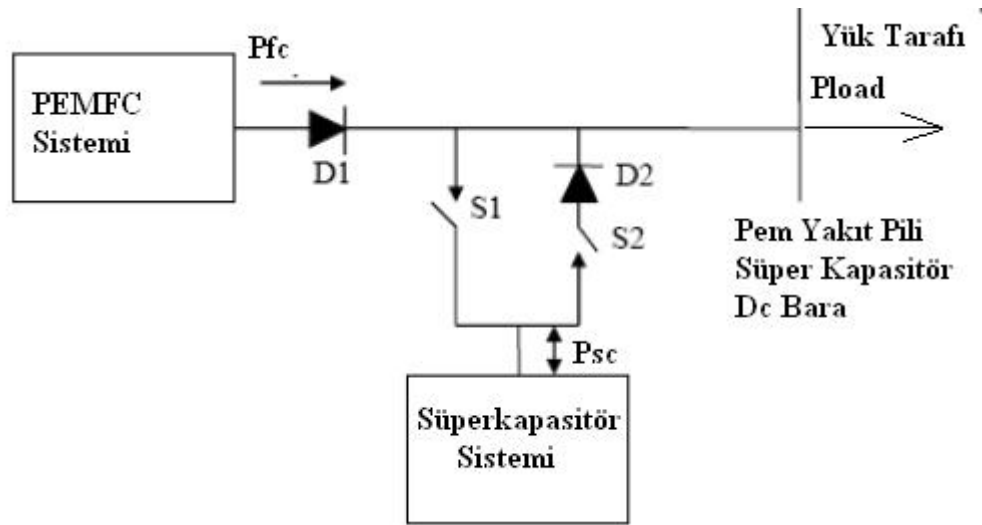
Şekil 6.3'de yukarıdaki hesaplara göre oluşturulmuş süperkapasitör simülasyon modeli verilmiştir.



Şekil 6. 3. Süperkapasitör simülasyon modeli

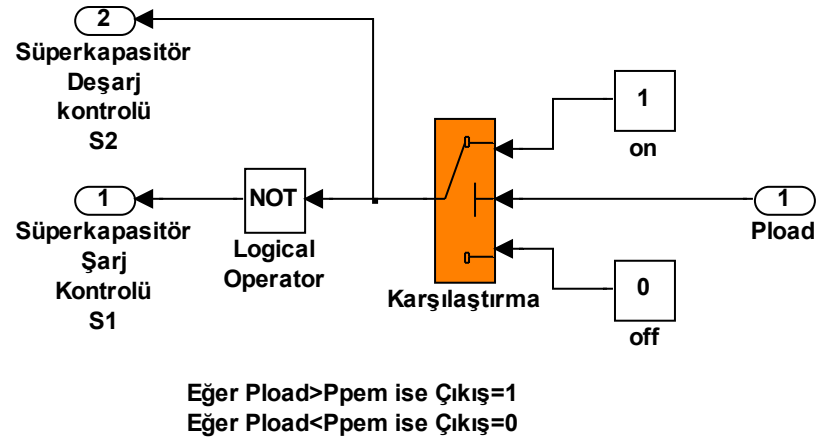
6.1 Süperkapasitör Şarj ve Deşarj Kontrolü

Yakıt pilleri güç talebine karşı iyi cevap verebilme yeteneğine sahip olsa da ani yük değişimlerine tepki vermekte zorlanabilir. Bu durumda yakıt pili ve süperkapasitör birlikte kullanılarak bu sorun ortadan kaldırılabilir. Şekilde 6.4’de gösterilen devre süperkapasitör şarj ve deşarj kontrol birimini göstermektedir. Yük tarafında talep edilen güç yakıt pilinin karşılayacağı bir değer ise yakıt pili bu ihtiyaca cevap verir. Güç talebi yakıt pili gücünden az ise yakıt pili artan gücünü süperkapsitörü şarj etmek için kullanır. Bu işlem sırasında S1 anahtarı kapanarak D1 diyotu üzerinden geçen güç akışı süperkapasitörü şarj eder. Yük talebi yakıt pilinin karşılayabileceğinden büyük ise süperkapasitör devreye girer. Bu işlem S1 anahtarı açılıp, S2 anahtarı kapatılarak sağlanır. D2 diyotu sayesinde süperkapasitör deşarj olurken yakıt pilinin ters güç akışı önlenir. Ayrıca D1 diyotu sayesinde süperkapitörden yakıt piline ters akış önlenir[21].



Şekil 6. 4. Süperkapasitör şarj-deşarj kontrolü ve sisteme uygulanması [21]

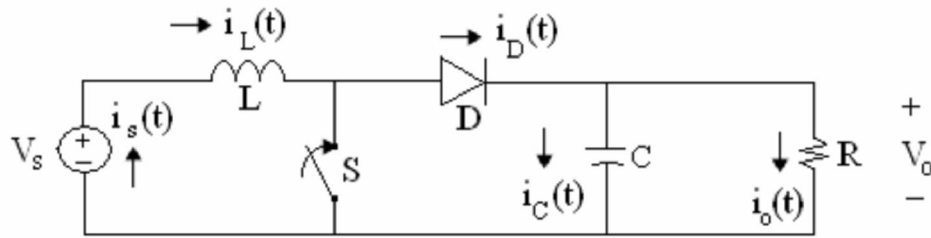
Süperkapasitör şarj ve deşarj kontrolünü gerçekleştirmek için Matlab/Simulink ortamında oluşturulan model Şekil 6.5’de verilmiştir. Modelden de anlaşılacağı gibi çıkış gücü ile yakıt pilinin gücü karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu eğer çıkış gücü yakıt pili gücünden büyük ise 1 aksi takdirde 0 olur. Bu işaret S1 ve S2 anahtarlarını devreye girip çıkmasını sağlayarak, süperkapasitör şarj ve deşarj işleminin gerçekleştirilmesi sağlanır.



Şekil 6. 5. Süperkapasitör şarj ve deşarj kontrol modeli

7 ARTIRAN TİP (BOOST) KONVERTÖR MODELLEME

PEM yakıt pilinden elde edilen gerilimi daha yüksek istenilen düzeye çıkarmak için artıran tip konvertör kullanılmıştır. Artıran tip konvertör düşük voltaj istenilen yüksek voltaj değerine yükseltir. Şekil 7.1'de artıran tip konvertör yapısı verilmiştir.



Şekil 7. 1. Artıran tip konvertör devre yapısı

S anahtarı iletim(on) veya kesim(off) durumunu belirleyen elektronik cihazlardır. Anahtar iletimi T zaman aralığının bir parçasıdır ve $T_{on}=DT$ ifadesiyle tanımlanır. Burada D doluluk oranı belirtir. Anahtar kapalı durumda iken indüktans akımı minimum değerden maksimum değere çıkar diğer bir deyişle indüktörde biriken enerji artar. Anahtar açık durumda iken $T_{off} = (1 - D).T$, indüktör akımı diyot üzerinden yüke iletilir. Bu sayede yük akımını karşılar ve kapasitörü şarj eder. Anahtar kapalı durumda iken D diyotu yüke doğru akan akımı engellemekle birlikte anahtar üzerinde beliren çıkış voltajını durdurur. D diyotu indüktör akımdaki dalgalanmayı kontrol ve sürekli iletim durumunda çalışılıp çalışılmayacağını da belirler. C kapasitörü yükteki harmonik akımlarının filtreler ve çıkış voltajındaki dalgalanmaları azaltır[13].

İndüktör akımı minimum değerde olduğu $t=0$ anında S anahtarı kapatılırsa, $0 \leq t \leq T_{on} = DT$ zaman aralığında indüktör akımının çözümü

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s \quad (7.1)$$

$$i_L(t) = \frac{V_S}{L}t + I_{L,\min} \quad (7.2)$$

Bu eşitliğe göre, indüktör akımı lineer olarak artar ve $t \rightarrow T_{ON} = DT$ iken akım maksimum değeri $I_{L,\max}$

$$I_{L,\max} = \frac{V_S}{L}DT + I_{L,\min} \quad (7.3)$$

şeklinde yazılır. Minimum ve maksimum akım değeri arasındaki değişim ΔI_L

$$\Delta I_L = I_{L,\max} - I_{L,\min} = \frac{V_S}{L}DT \quad (7.4)$$

olarak ifade edilir. İndüktör akımı maksimum değerine ulaştığında anahtar açılır. İndüktör akımı, yükü ve kapasitör akımını karşılar. $T_{ON} \leq t \leq T$ zaman aralığına karşılık gelen eşitlik

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S - V_0 \quad (7.5)$$

$$i_L(t') = \frac{V_S - V_0}{L}(t - DT) + I_{L,\min} \quad (7.6)$$

şeklindedir. İndüktör akımı $t = T_{ON}$ maksimum değerinden $t \rightarrow T$ minimum değerine lineer olarak azalır. Bu ifadeyi:

$$I_{L,\min} = \frac{V_S - V_0}{L}(1 - D)T + I_{L,\max} \quad (7.7)$$

şeklinde tanımlayabiliriz. Tepeden tepeye akım değişimi ΔI_L ise:

$$\Delta I_L = I_{L,\max} - I_{L,\min} = \frac{V_S - V_0}{L}(1 - D)T \quad (7.8)$$

olarak yazılır. Denklem 7.4 ve 7.8 birbirine eşitlenirse aşağıdaki denkleme elde edilir.

$$\frac{V_s}{L}DT = \frac{V_s - V_0}{L}(1-D)T \quad (7.9)$$

Denklem 7.9'daki ifade aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$V_0 = \frac{V_s}{1-D} \quad (7.10)$$

İdeal durumda ortalama giriş ve çıkış gücü arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılırsa:

$$V_0 I_0 = V_s I_s = \frac{V_s}{1-D} I_0 \quad (7.11)$$

Denklem 7.11'den ortalama kaynak akımı

$$I_s = \frac{I_0}{1-D} \quad (7.12)$$

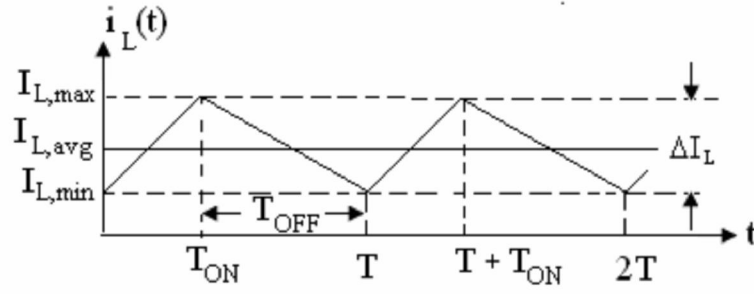
elde edilir. Ortalama kaynak akımı ile indüktör akımına eşit olduğundan, ortalama indüktör akımı:

$$I_{L,avg} = I_s = \frac{I_0}{1-D} \quad (7.13)$$

şeklindedir. Maksimum ve minimum indüktör akımları için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$I_{L,max} = I_{L,avg} + \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_0}{R(1-D)} + \frac{V_0}{2Lf}(1-D)D \quad (7.14)$$

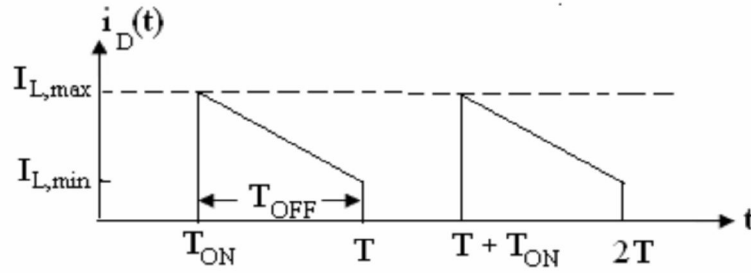
$$I_{L,min} = I_{L,avg} - \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{V_0}{R(1-D)} - \frac{V_0}{2Lf}(1-D)D \quad (7.15)$$



Şekil 7. 2. Tepeden tepeye akım değişimi grafiği

Şekil 7.2’de gösterilen tepeden tepeye akım değişimi çıkış voltajı olarak aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\Delta I_L = \frac{V_S}{L} DT = \frac{V_0}{L f} (1 - D) D \quad (7.16)$$



Şekil 7. 3. Diyot üzerindeki ortalama akım grafiği

Şekil 7.3’de gösterilen diyot üzerindeki ortalama akım:

$$I_{D,avg} = \frac{I_{L,max} + I_{L,min}}{2} = \frac{T_{OFF}}{T} = \frac{V_0}{R} \quad (7.17)$$

olarak ifade edilir. Diyot üzerindeki ortalama akımı ile yük direnci üzerindeki ortalama akım eşittir. Anahtar kapalı pozisyona geldiğinde kapasitör yük akımı karşılar. $0 \leq t \leq T_{on} = DT$ zaman aralığında kapasitör akımı:

$$I_C(t) = -I_0 = \frac{V_0}{R} \quad (7.18)$$

şeklindedir. Anahtar açık pozisyona geldiğinde indüktör akımı kapasitör ve yük akımını karşılar. $T_{ON} \leq t \leq T$ zaman aralığında kapasitör akımı:

$$I_C(t) = i_L(t) - I_0 \quad (7.19)$$

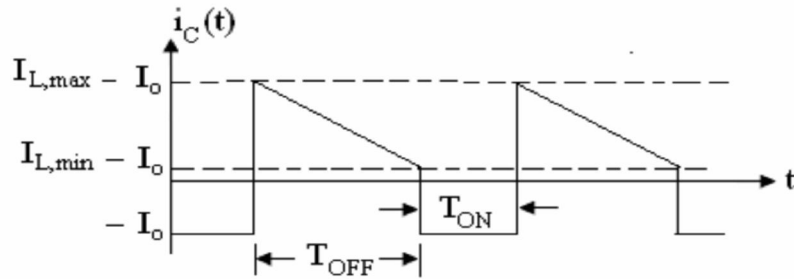
olarak ifade edilir. Anahtar açık pozisyonda iken maksimum ve minimum kapasitör akımları aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I_{C,max} = I_{L,max} - I_0 = \frac{V_0 D}{R(1-D)} + \frac{V_0}{2Lf} (1-D)D \quad (7.20)$$

$$I_{C,min} = I_{L,min} - I_0 = \frac{V_0 D}{R(1-D)} - \frac{V_0}{2Lf} (1-D)D \quad (7.21)$$

$$\Delta I_L = I_{C,max} - I_{C,min} \quad (7.22)$$

Kapasitör akımı dalga şekilleri Şekil 7.4’de verilmiştir.



Şekil 7. 4. Kapasitör akımı dalga şekilleri

Akım dalga şekli kapasitör voltajındaki değişimi tanımlar. Anahtar kapandığında kapasitör yük için akımı karşıladığından üzerindeki yük azalır. Bu değişim:

$$\Delta Q = -I_0 T_{ON} = -\frac{V_0}{R} DT \quad (7.23)$$

olarak yazılır. Kapasitör gerilimi üzerindeki değişimin büyüklüğü ise:

$$|\Delta V_0| = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{V_0}{RC} DT \quad (7.24)$$

$$C = \frac{V_0}{|\Delta V_0| R} DT \quad (7.25)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 7.16 ve 7.22 kullanarak indüktör değeri aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\frac{V_0}{R(1-D)} - \frac{V_0}{2L_{\min} f} (1-D)D = 0 \quad (7.26)$$

$$L_{\min} = \frac{R}{2f} D(1-D)^2 \quad (7.27)$$

PEM yakıt pilinin minimum çıkış gerilimi $18V$, konvertör çalışma frekansı $1000 Hz$ ve konvertörde kullanılan direnç 10Ω seçilerek modelimizde kullandığımız konvertör hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılabilir.

$$V_0 = 60V \quad (7.28)$$

$$V_{in,\min} = 18V \quad (7.29)$$

$$V_0 = \frac{V_s}{1-D} \rightarrow D = 1 - \frac{V_s}{V_0} = 1 - \frac{18}{60} = 0,7 \quad (7.30)$$

$$f = \frac{1}{T} = 1000Hz \quad (7.31)$$

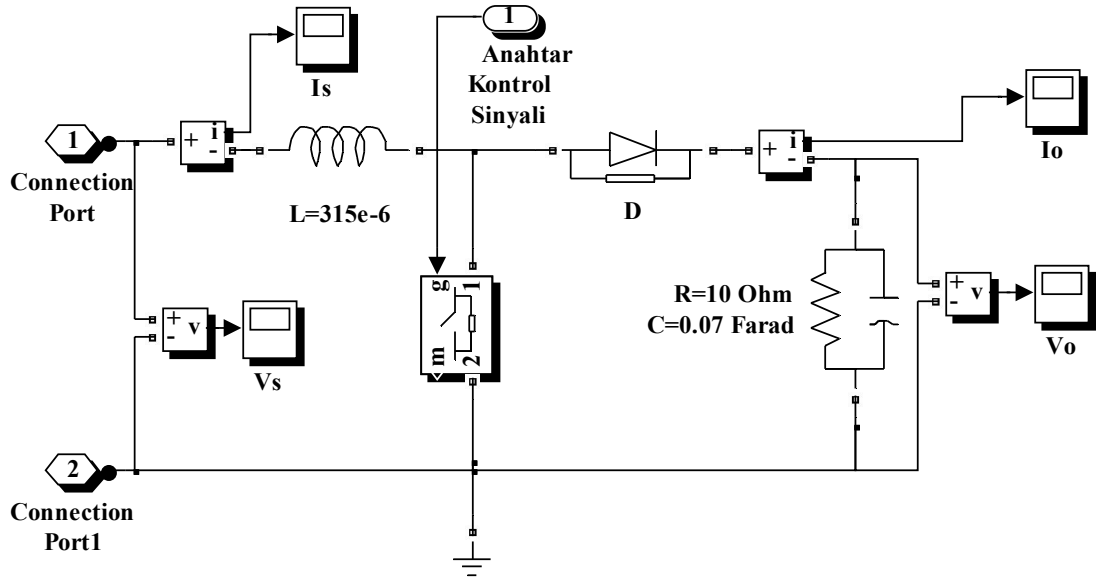
$$R = 10\Omega \quad (7.32)$$

$$|\Delta V_0 = \%1.V_0| \quad (7.33)$$

$$C = \frac{60.0,7.}{60.0,01.1000} = 0,07Farad \quad (7.34)$$

$$L_{\min} = \frac{10}{2.1000} \cdot 0,7(1 - 0,7)^2 = 315 \cdot 10^{-6} \text{ Henry} \quad (7.35)$$

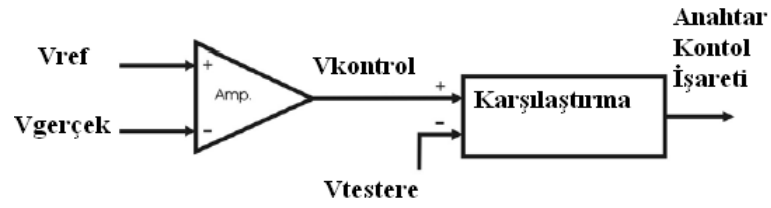
Şekil 7.5’de artıran tip konvertör hesapları kullanılarak Matlab/Simulink ortamında hazırlanan simülasyon modeli gösterilmektedir.



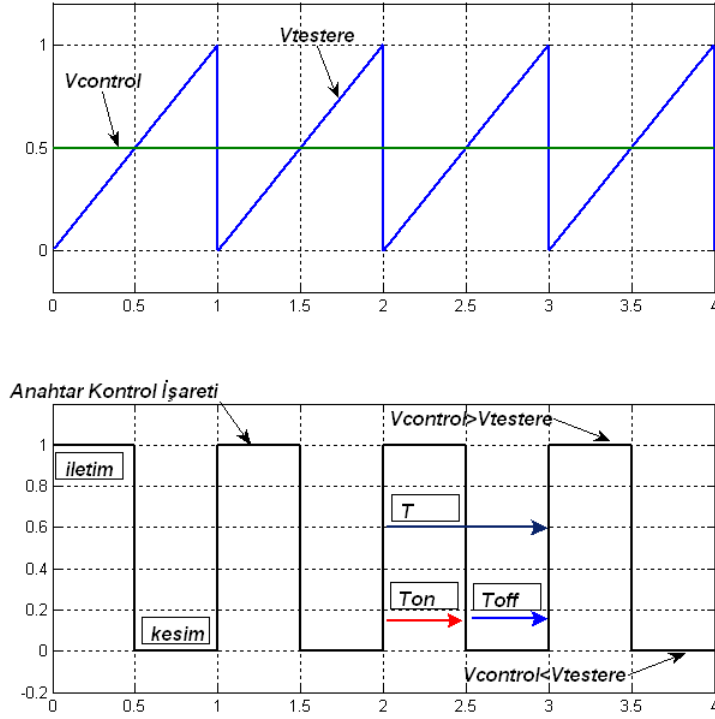
Şekil 7. 5. Artıran tip (Boost) konvertör simülasyon modeli

7.1 Artıran Tip Konvertör Kontrolü

Artıran tip konvertör çıkış gerilimini istenen düzeyde tutmak için darbe genişlik modülasyonu (PWM) yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemde giriş gerilimine göre yarı iletken anahtarın iletme geçme ve iletimden çıkma süreleri denetlenerek çıkış gerilimi ayarlanabilir. İstenen referans değeri (V_{ref}) ve gerçek değeri ($V_{gerçek}$) arasındaki fark ile kontrol işareti elde edilir ($V_{kontrol}$). Bu kontrol değeri sabit frekansta üretilen periyodik olarak tekrar eden testere dişli dalga ($V_{testere}$) ile karşılaştırılarak anahtar kontrol işareti (D) elde edilir. Şekil 7.6’da darbe genişlik modülasyonu yapısı gösterilmiştir[13].



Şekil 7. 6. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) yapısı

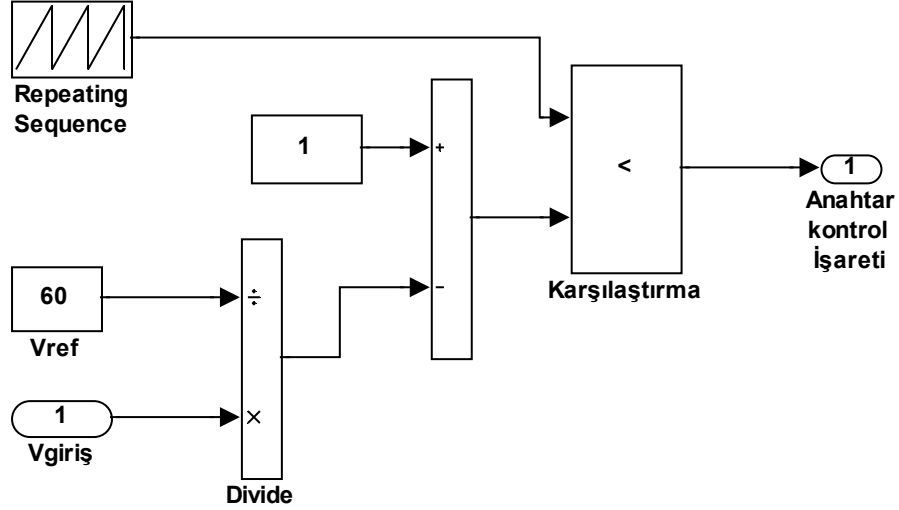


Şekil 7. 7. Darbe genişlik modülasyonu karşılaştırma işaretleri

Kontrol işareti($V_{kontrol}$) ve testere dişli($V_{testere}$) işareti karşılaştırılması Şekil 7.7'de gösterilmiştir. Kontrol işareti testere dişli işaretinden büyük ise anahtar iletimdedir. Kontrol işareti testere dişli işaretinden küçük ise anahtar kesime geçer. Bu işlem sürekli tekrar ederek çıkış gerilimi ayarlanır. Anahtarın kontrol işareti (D) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$D = \frac{T_{on}}{T} = \frac{V_{kontrol}}{V_{testere}} \quad (7.36)$$

Bu çalışmada artıran tip konvertör kontrolü için Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş simülasyon modeli Şekil 7.8’de verilmiştir. Bu modelde referans gerilim ile giriş değeri arasındaki fark, testere dişliden büyükse anahtar iletime geçmekte aksi takdirde anahtara kesime geçmektedir.



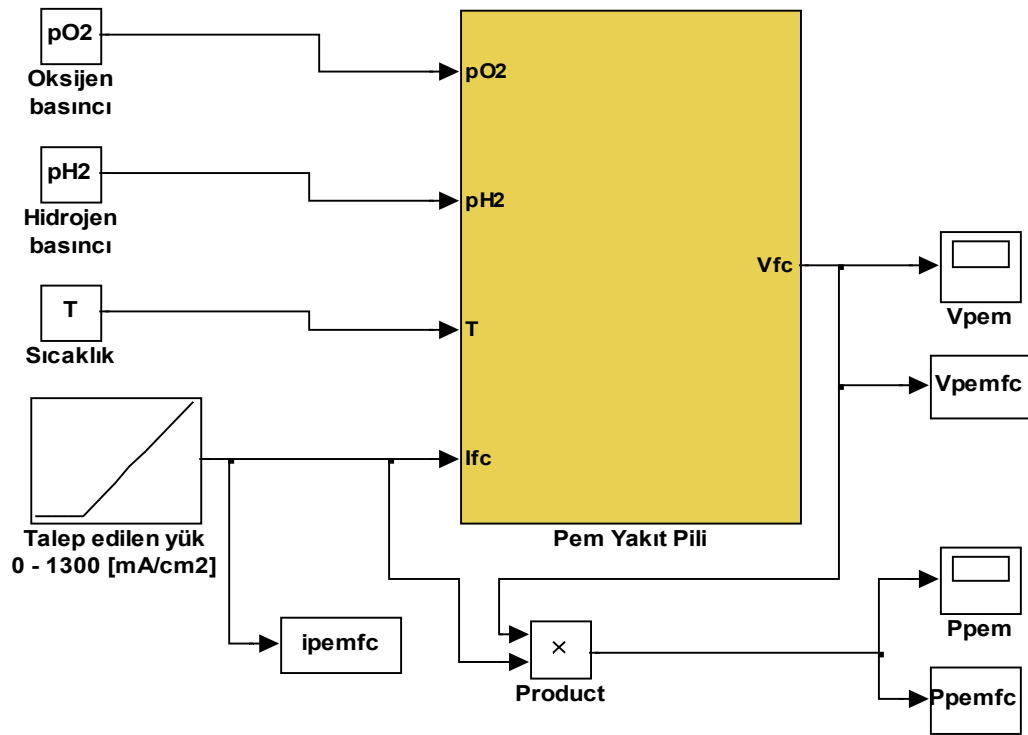
Şekil 7. 8. Artıran tip konvertörün kontrol simülasyon modeli

8 PEM YAKIT PİLİ SİMÜLASYONLARI

Bu bölümde modellemesini yaptığımız yakıt pili için tek hücre ve yığın sistemi için simülasyonlar yapılacaktır. Daha sonra PEM yakıt pili için sistem dizayn çalışmaları yapılarak talep edilen yüke verdiği tepkiler incelenecek ve yorumlar yapılacaktır.

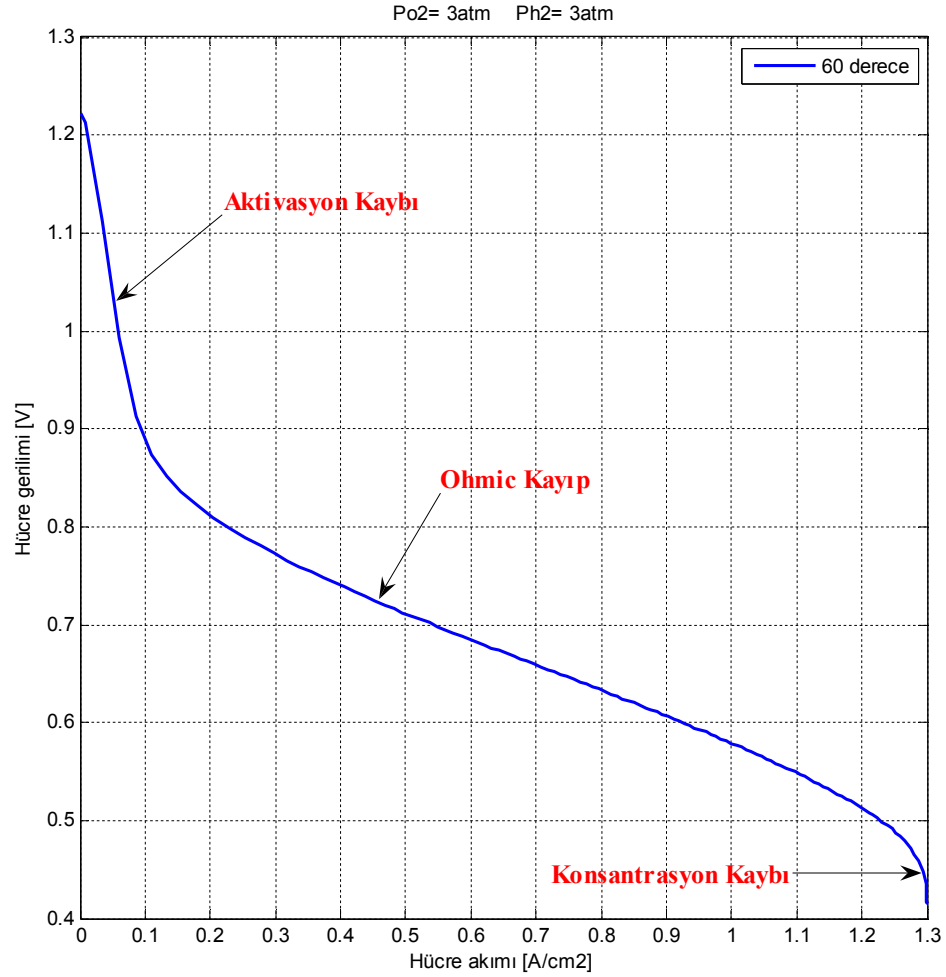
8.1 Tek Hücre Simülasyonları

Modellediğimiz PEM yakıt pili için tek hücre simülasyonları verilerek, sonuçlar üzerine yorumlar yapılacaktır. Şekil 8.1’de görüleceği gibi 0 mA/cm^2 ’den 1300 mA/cm^2 ’ye lineer olarak artan yük uygulanması durumunda PEM yakıt pilinin tepkisi verilecektir. Daha sonra farklı sıcaklık ve basınçlarda bu tepkinin nasıl değiştiği gösterilecektir.



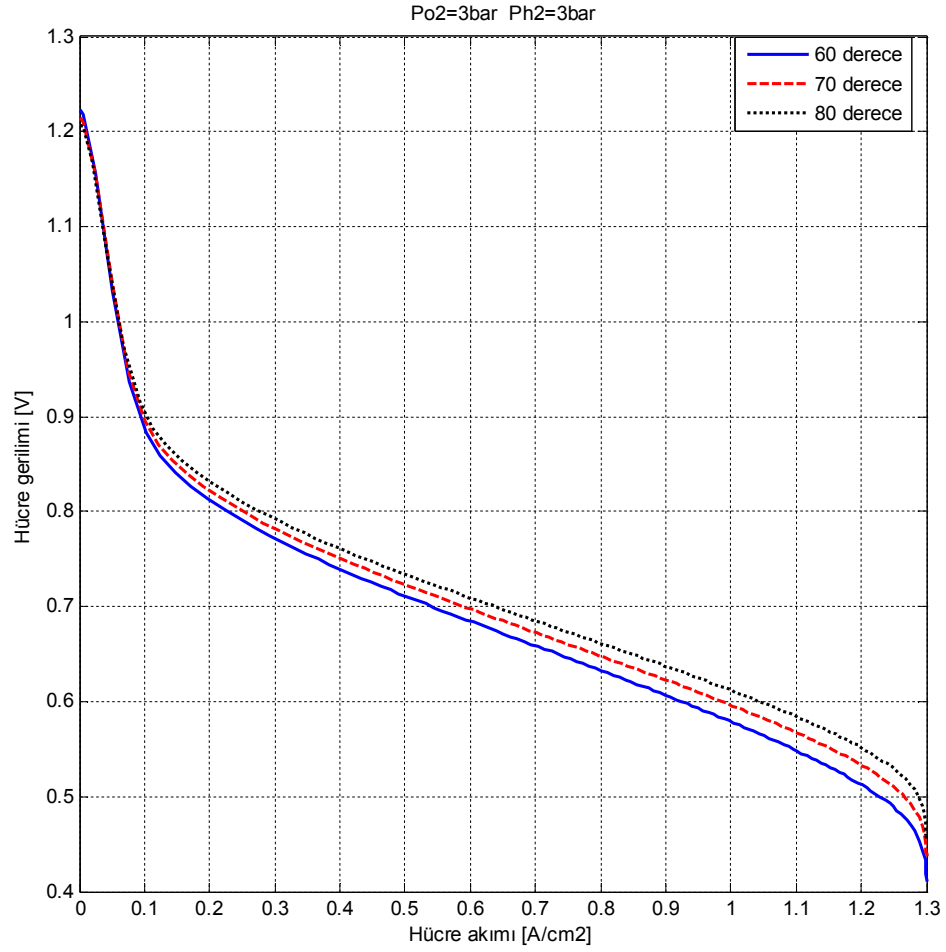
Şekil 8. 1. PEM yakıt piline giriş olarak lineer olarak artan yük uygulaması

Modellenen yakıt pili anot'a 3atm hidrojen, katot'a 3atm oksijen verilerek 60 derecede sabit sıcaklık altında tutulduğu düşünülmüştür. Şekil 8.2'de verilen gerilim-akım değişim eğrisi bu şartlar altında elde edilmiştir.



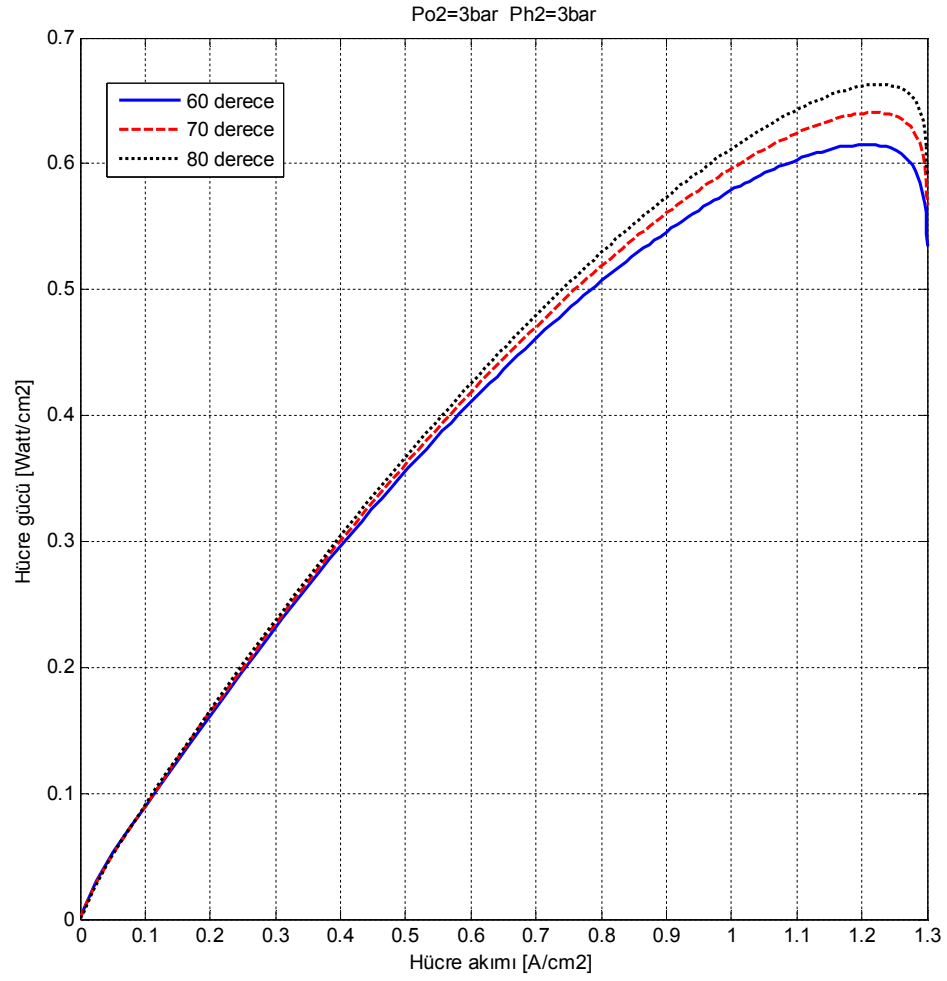
Şekil 8. 2. Sabit basınç ve sıcaklıkta PEM yakıt pilinin polarizasyon eğrisi

Polarizasyon eğrisi olarak da bilinen gerilim-akım değişim eğrisi; yakıt pilinden çekilen akıma bağlı olarak, gerilimin değişimini gösterir. Bu değişime göre yakıt pilinden çekilen akım arttıkça, yakıt pilinin sağlayacağı gerilim azalmaktadır. Grafikte ilk andaki gerilim düşüşü aktivasyon kaybından kaynaklanır. Orta bölgede daha doğrusal olarak düşüş ise ohmic kayıplarından kaynaklanır. Son kısımdaki ani düşüşe ise konsantrasyon kayıpları neden olmaktadır.



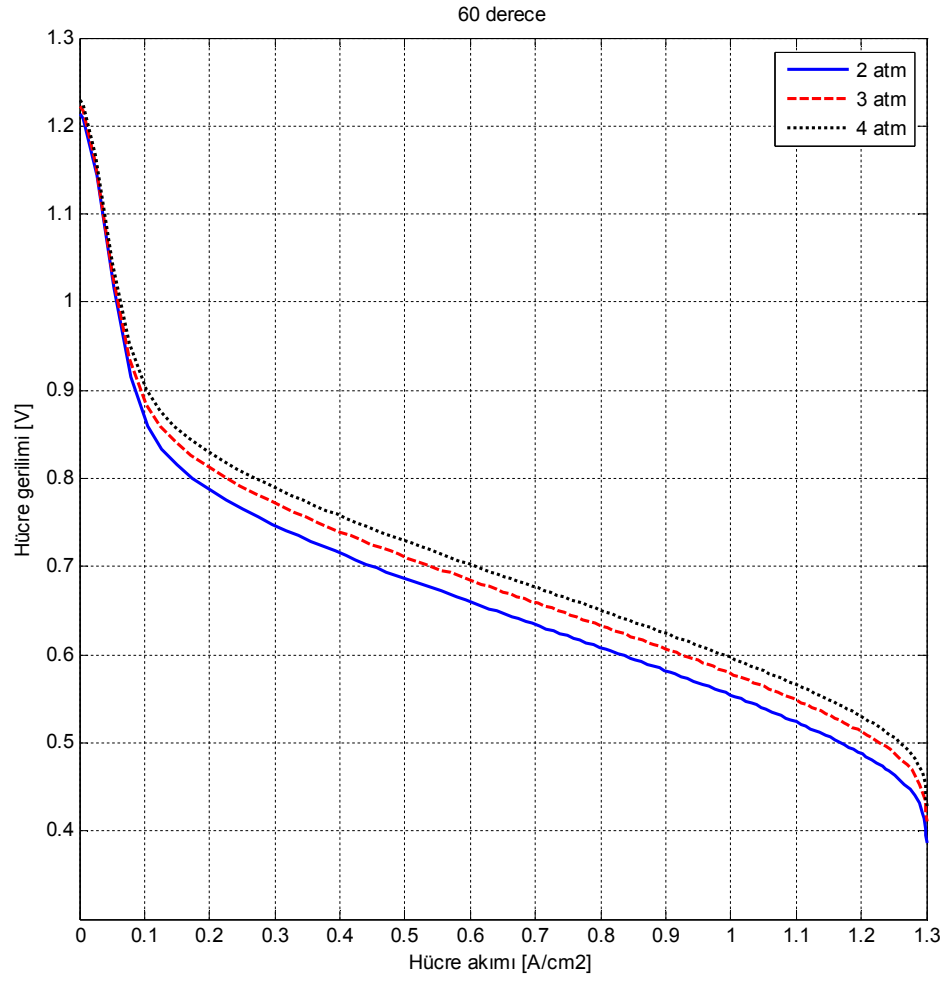
Şekil 8. 3. Sabit basınç, farklı sıcaklıkta PEM yakıt pili polarizasyon eğrisi

Şekil 8.3'den de görüleceği modellenen yakıt pili anot ve katot 3 atm sabit basınçla beslenirken; sıcaklık 60°C, 70°C, 80°C olarak arttıkça polarizasyon eğrisi yukarı doğru kaymaktadır. Sıcaklık artışının aktivasyon ve direnç kayıplarını azalttığı görülmektedir. Bununla birlikte sıcaklık çok fazla artırılırsa membran susuz kalacağından yakıt pili performansı olumsuz etkilenir. Bu olumsuzluğu önlemek için polimer elektrolit yakıt pillerinde sıcaklık 80°C altında tutulması uygun olacaktır.



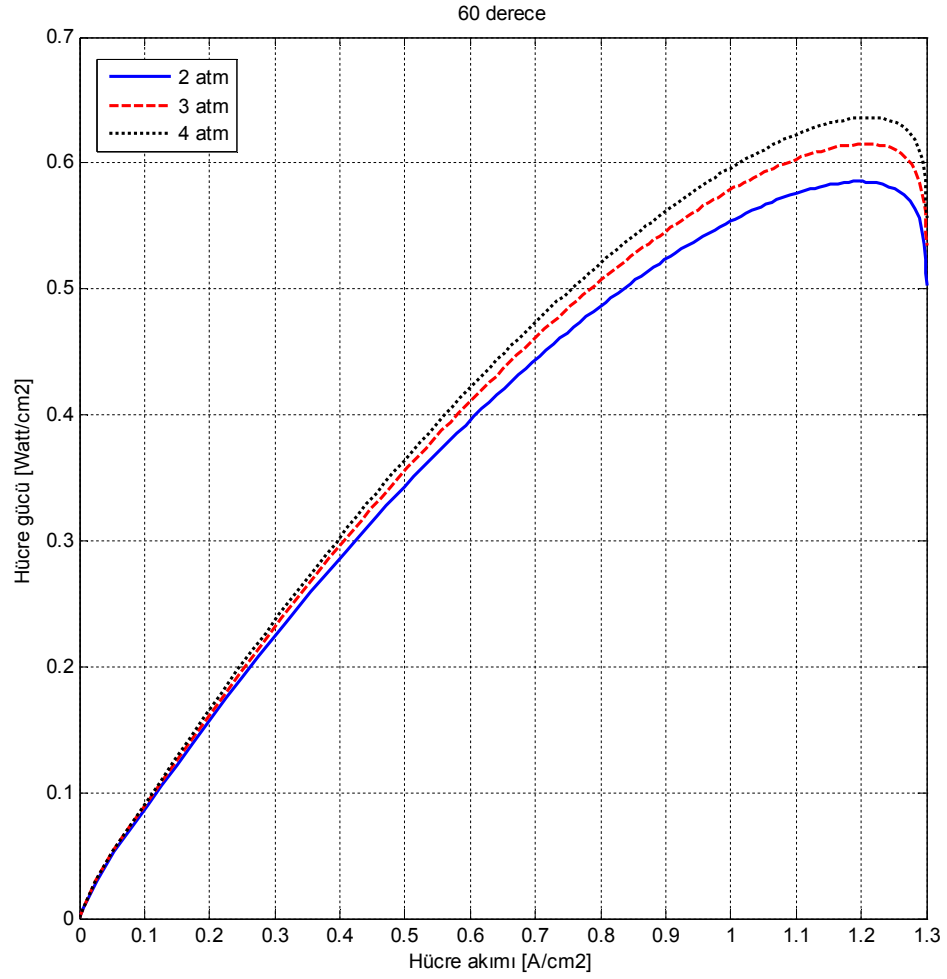
Şekil 8. 4. PEM yakıt pili sabit basınç, farklı sıcaklık için Güç-Akım grafiği

Yine benzer şekilde 3 atm sabit basınç altında anot ve katot beslendiğinde Şekil 8.4'de gösterilen güç-akım grafiği elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça gerilimin artması güç akım eğrisini de yukarı doğru kaydırmıştır. Sıcaklık artışı yakıt pili güç performansını olumlu yönde etkilemektedir.



Şekil 8. 5. Sabit sıcaklık, farklı basınçlarda PEM yakıt pili polarizasyon eğrisi

Şekil 8.5’de yakıt pili sabit sıcaklık altında basınç değişimi gösterilmiştir. Sırasıyla yakıt piline 2atm,3atm ve 4atm basınç uygulandığında polarizasyon eğrisi yukarı doğru kaymaktadır. Bu grafikten görüleceği gibi basınç artışı aktivasyon kayıplarını azalttığı için gerilimi olumlu yönde etkilemiştir.

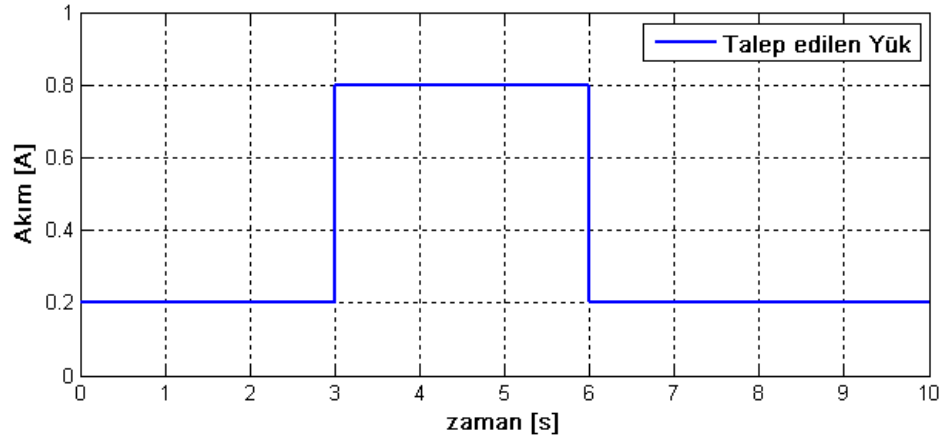


Şekil 8. 6. Sabit sıcaklık, farklı basınçlarda PEM yakıt pili Güç-Akım grafiği

Şekil 8.6'da gösterilen grafikte sabit sıcaklık farklı basınç altında güç-akım eğrisi gösterilmiştir. Bu grafikte basınç artışı gerilimi olumlu yönde etkilediği için güç performansını da olumlu yönde etkilemiştir.

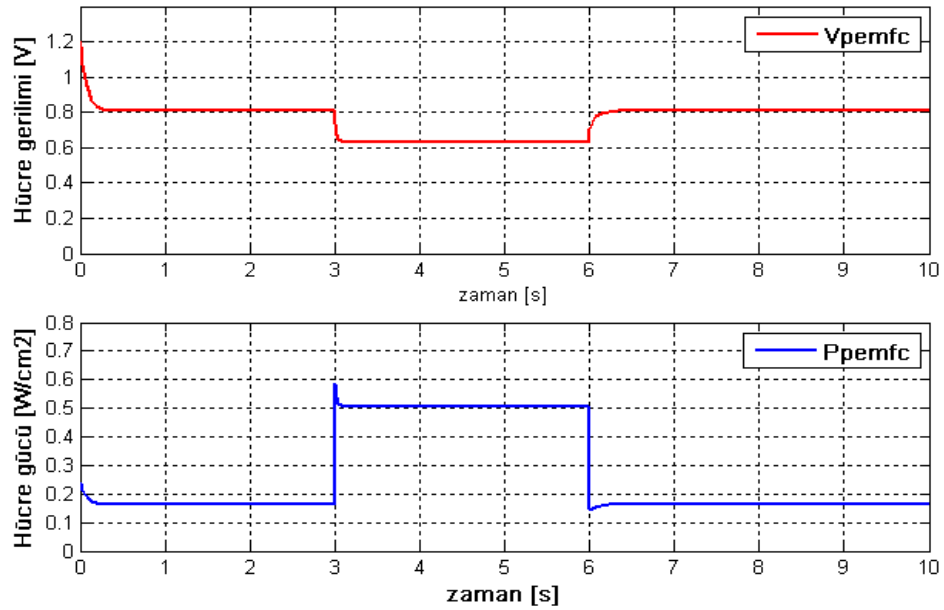
Yukarıdaki grafikler incelendiğinde yakıt pilinin performansını etkileyen en önemli etkenin sıcaklık olduğunu görürüz. Basınç artışı ise yakıt pili performansını sıcaklıktan sonra etkileyen en önemli etkenlerden biri olduğu görülmektedir.

Şekil 8.7’de hücrenin geçici durumlara tepkisini incelemek için ilk 3s için $0,2A$, 3s ile 6s arası $0,8A$ ve 6s ‘den sonra tekrar $0,2A$ yük uygulanmıştır.



Şekil 8. 7. Talep edilen yük

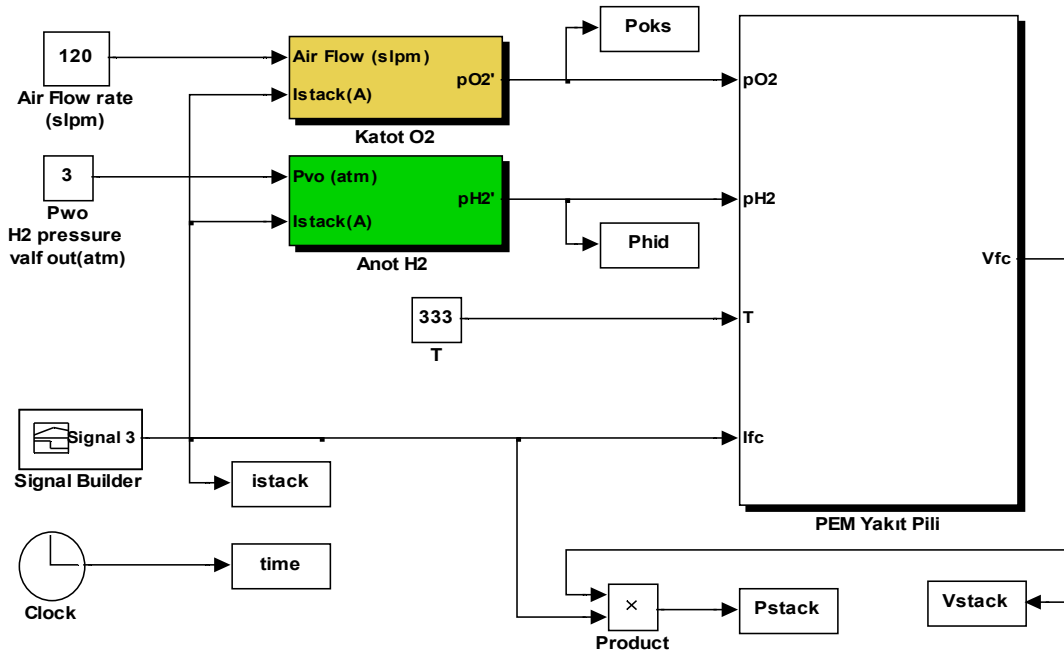
Talep edilen yüke göre hücrenin tepkisi Şekil 8.8’de verilmiştir. İlk anda hücreden $0,2A$ yük talep edilirken yüke karşı $0,8V$ gerilim ve $0,16W/cm^2$ güç üretebilmektedir. 3s ile 6s arasında yük talebi $0,8A/cm^2$ artırıldığında hücre $0,63V$ gerilim ve $0,5W/cm^2$ güç üretebilmektedir. Şekil 8.8’den de görüleceği gibi akım talebi arttığında hücre geriliminde düşüş yaşanmaktadır. 6s’den sonra yük talebi ilk andaki değerine düşürüldüğünde hücre yine ilk andaki gerilim ve gücü üretebilmektedir.



Şekil 8. 8. Hücrenin talep edilen yüke tepkisi

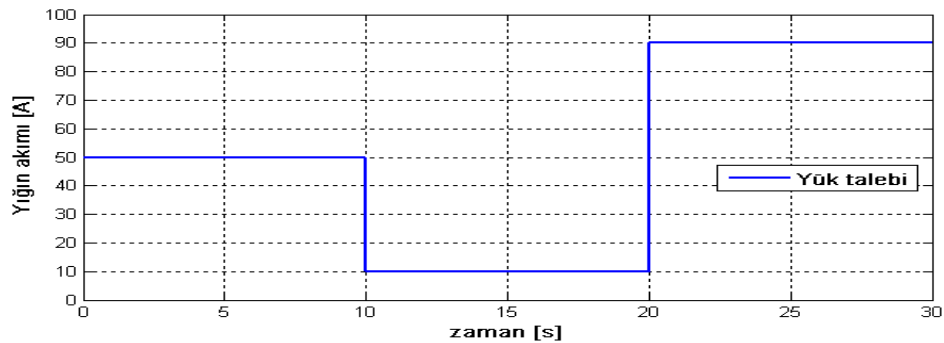
8.2 Yığın (Stack) Simülasyonları

PEM yakıt pili yığını 120Slpm oksijen ve valf çıkışı 3atm olacak şekilde hidrojenle beslenmektedir. Sıcaklık 60 derece sabit tutulacağı düşünülerek talep edilen yüke karşı yığın'ın verdiği tepki incelenecektir. Şekil 8.9'da yığın'ın talep edilen yüke karşı verdiği tepkinin incelendiği simülasyon modeli verilmiştir.



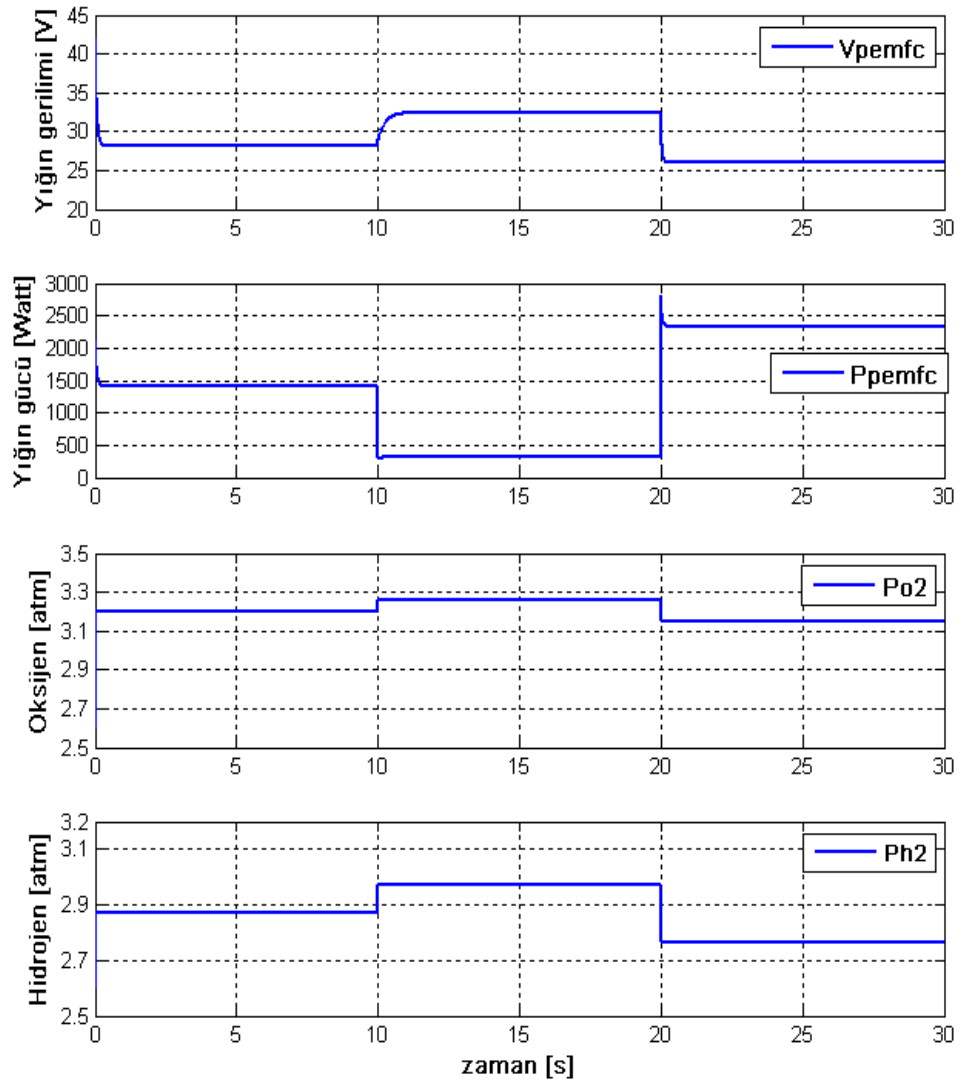
Şekil 8. 9.Yığın'ın talep edilen yüke verdiği tepkinin simülasyon modeli

Şekil 8.10'da verilen yük talebinde başlangıçta ilk 10s için 50A akım uygulanmakta daha sonra 10s ile 20s arasında 10A akım uygulanmakta daha sonra 20s ile 30s arasında 90A yük uygulanmaktadır. Bu talebe karşı PEM yakıt pili yığının tepkisi incelenmiştir.



Şekil 8. 10. Talep edilen yük

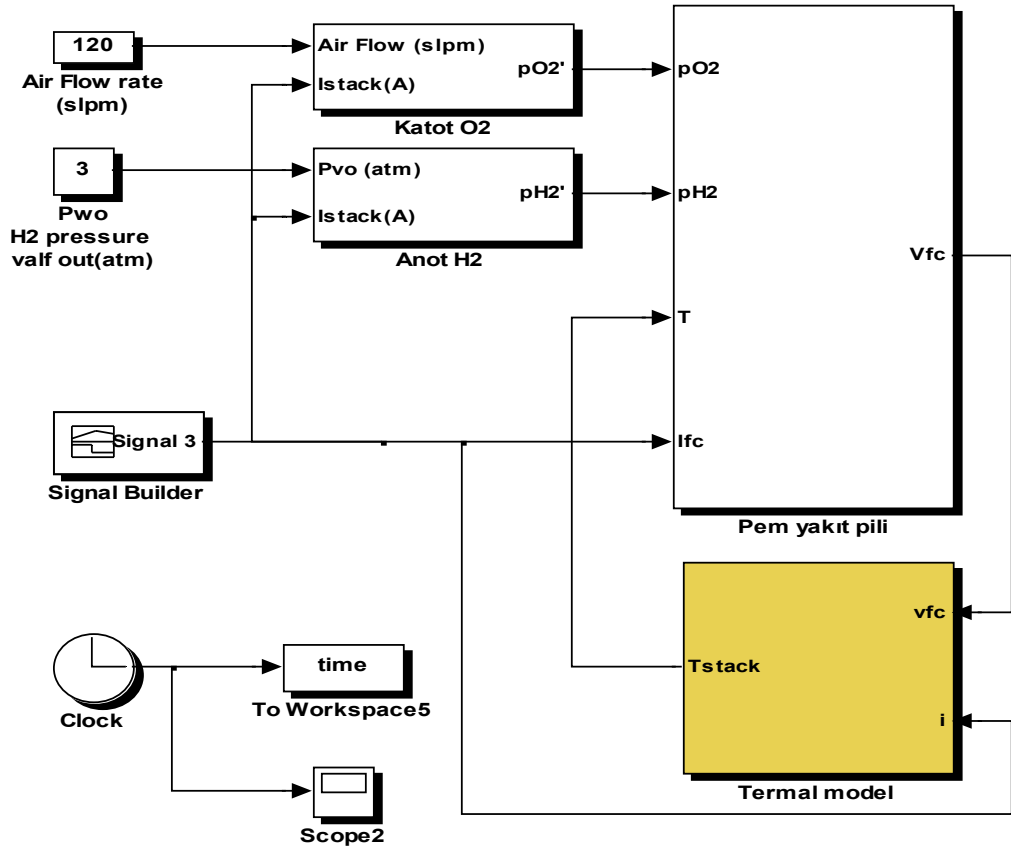
Şekil 8.11’de PEM yakıt pili ilk 10s için 28.10V gerilim üretmekte, 10s ile 20s arasında akım azaldığı için gerilim 32.48V yükselmiştir, 20s ile 30s arasında ise akım tekrar artırıldığından gerilim 25.95V düşmüştür. Yakıt pili gücü ise akım ve gerilime bağlı olduğu için başlangıçta 1405W iken akım azalmasıyla birlikte 324.5W düşmüş, akım artırıldığında ise 2335W yükselmiştir. Hidrojen basıncı ilk 10s için 2.86atm, oksijen ise 3.2atm olurken; 20s ile 30s arasında akım azaldığı için tüketim azaldığından basınç artışı görülmektedir. 20s ile 30s arasında ise akım arttığı için tüketim artmakta ve basınç düşmektedir.



Şekil 8. 11. PEM yakıt pilinin geçici durumlara tepkisi

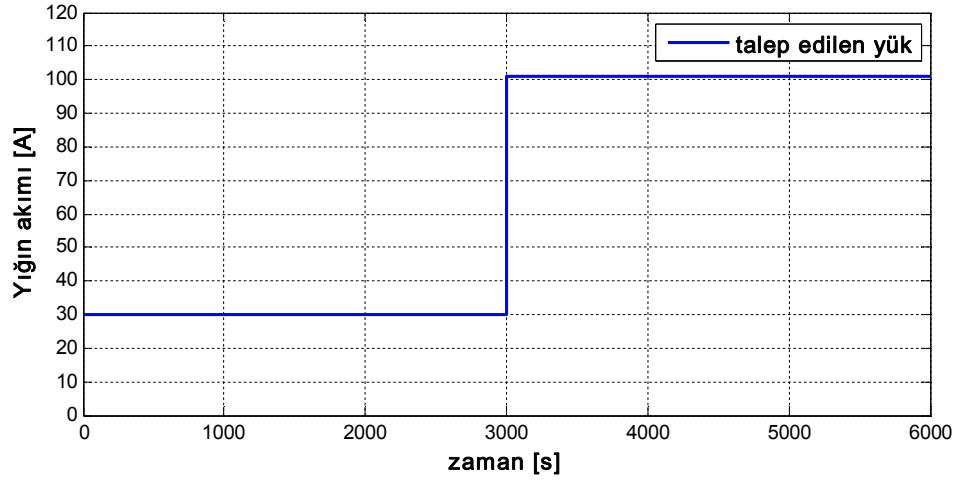
8.2.1 Yığın Sisteminin Termal Cevabı

PEM yakıt pili yığını 120Slpm oksijen ve valf çıkışı 3atm olacak şekilde hidrojenle beslenmektedir. Bir önceki durumda sabit sıcaklık uygulanırken bu bölümde yük durumuna göre yığının sıcaklığı dinamik olarak değişmektedir. Şekil 8.12’de yığının yüke bağlı sıcaklık değişiminin inceleneceği simülasyon bloğu verilmiştir.



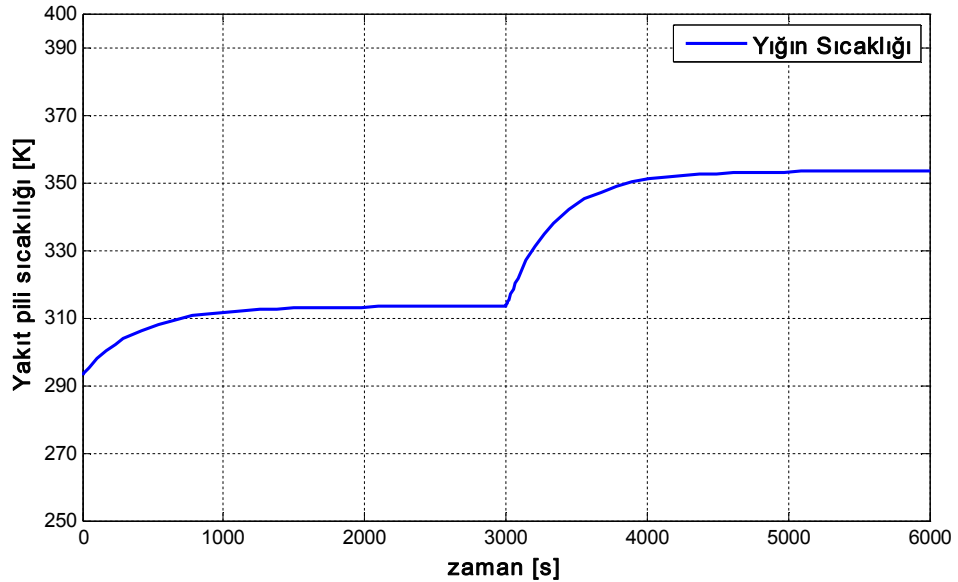
Şekil 8. 12. Yığın’ın talep edilen termal cevap modeli

Şekilde 8.13’de gösterilenn yük talebi ilk 3000s için 30A ve 3000s ile 6000s arası 100A uygulanmaktadır. Bu simülasyonda uygulanan yükün süresi daha uzun tutulmuştur. Çünkü gerçek bir sisteme benzer şekilde sıcaklık değişimi zaman almaktadır.



Şekil 8. 13. Termal model için yük talebi

Şekil 8.14’de görüldüğü gibi yakıt pili akım değişimine karşılık sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Bu simülasyonda yakıt piline 3000s süresince 30A akım uygulanırken 1614s sonra sıcaklık rejime ulaşarak 313K değerine ulaşmıştır. 3000s ile 6000s arası 100A akım uygulanmış sıcaklığın 313K’den 353K’e yükseldiği görülmektedir. Diğer simülasyonlara göre sıcaklık değişimi tepkisinin daha uzun süre aldığı görülmektedir.



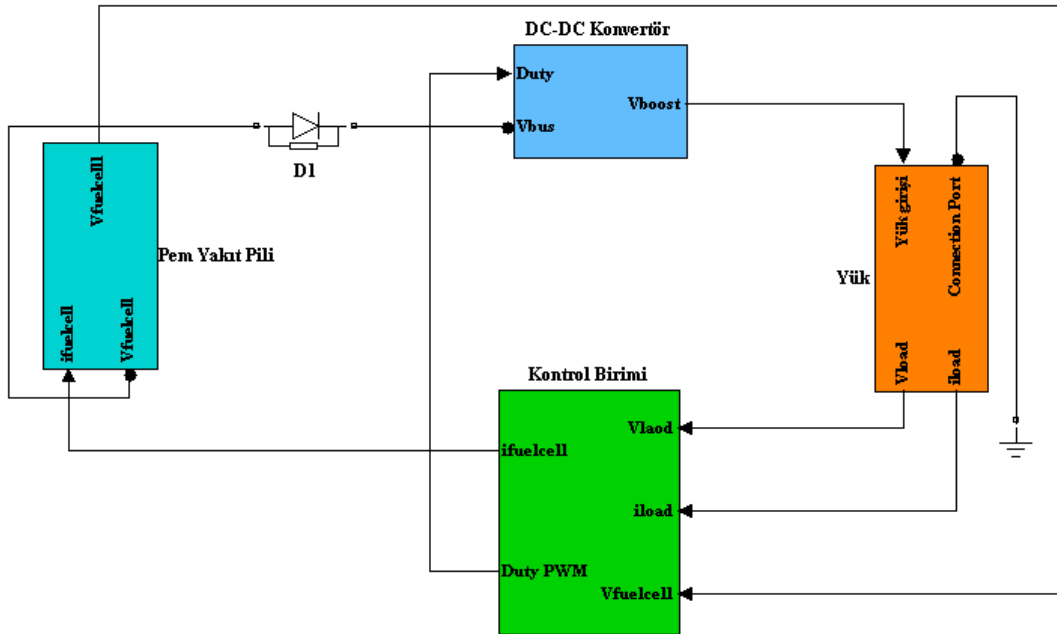
Şekil 8. 14. PEM yakıt pili yığının sıcaklık değişimi

8.3 Sistem Dizayn Çalışması

Bu bölümde ilk olarak PEM yakıt piline artıran tip konvertör eklenerek talep edilen yüke verebileceği cevap incelenecektir. Talep edilen güç yakıt pilinin karşılayabileceğinden daha fazla olduğunda nasıl bir durum olduğu gösterilecektir. Dizayn çalışması 2 başlığı altında ise talep edilen güç yakıt pilinin karşılayabileceğinden fazla olsa bile süperkapasitör'ün devreye girerek ihtiyacı karşılaması, talep edilen gücün PEM yakıt pilinin karşılayacağından düşük olduğunda artan kısmın süperkapasitörde depolanması simülasyonları verilecektir.

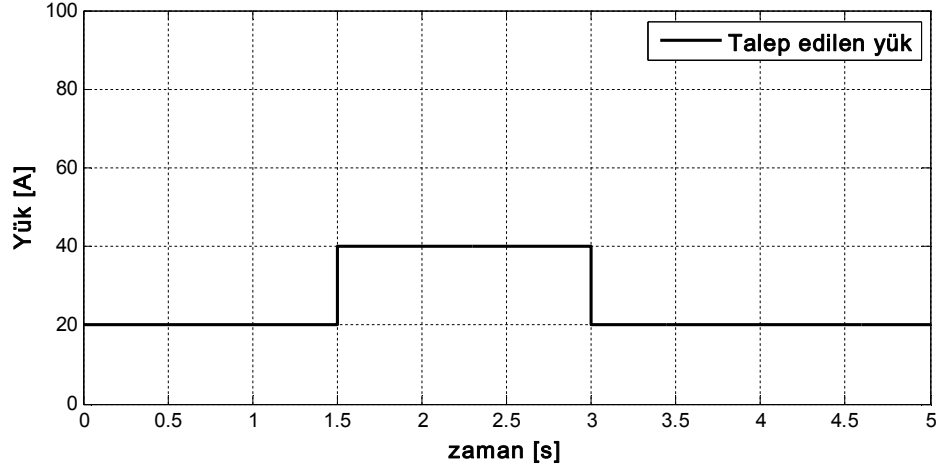
8.3.1 Dizayn 1: Yakıt Pili ve Konvertör Sisteminin Uygulanan Yüke Tepkisi

Şekil 8.15'de PEM yakıt pili, yükseltici tip konvertör, kontrol birimi ve yükten oluşan simülasyon bloğu verilmiştir. Bu sistemin talep edilen yüke karşı verebileceği cevap incelenmektedir.



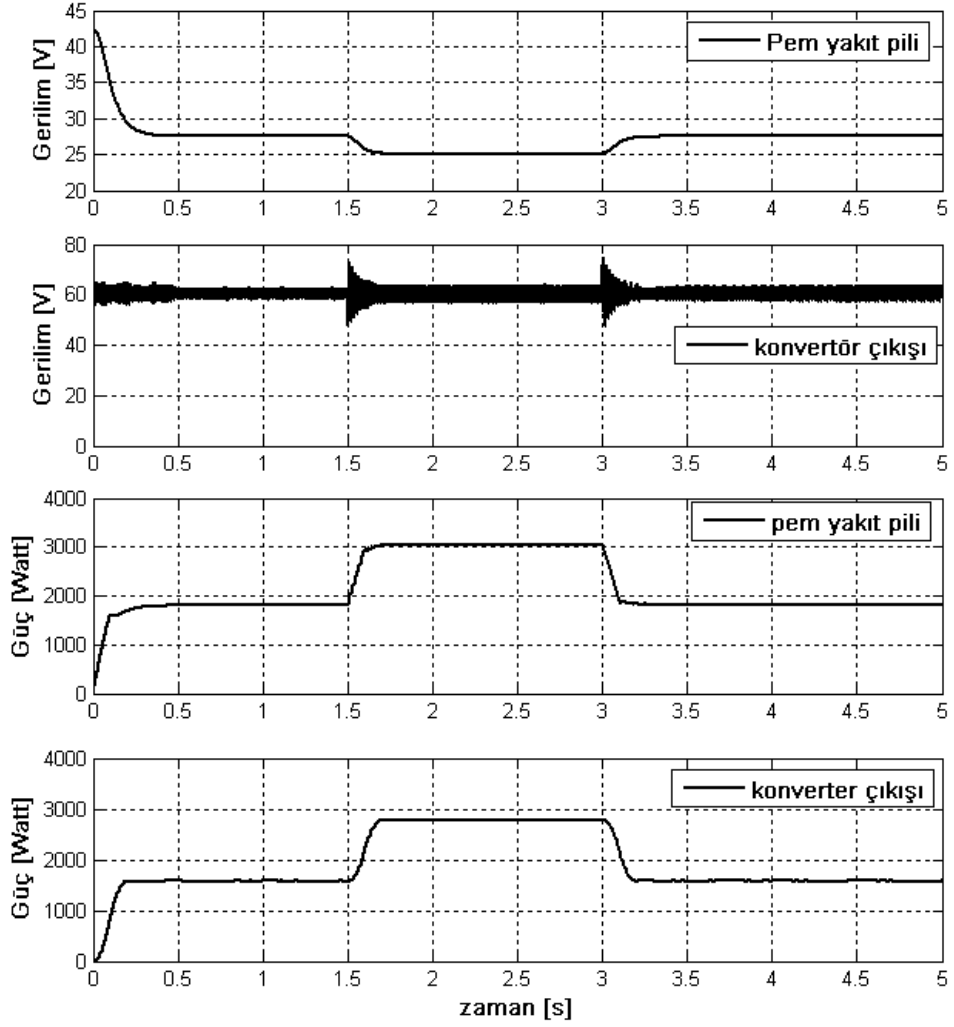
Şekil 8. 15. Yakıt pili ve konvertör sisteminin simülasyon bloğu

Bu simülasyonda talep edilen yük değişse bile çıkış gerilimi 60V olacak şekilde sabit tutulmak istenmektedir. Bu durumu incelemek için ilk 1,5s için 20A, 1.5s ile 3s arasında 40A, 3s'den sonra tekrar 20A yük talep edilmiştir. Şekil 8.16'da talep edilen yükün zaman göre değişimi gösterilmiştir.



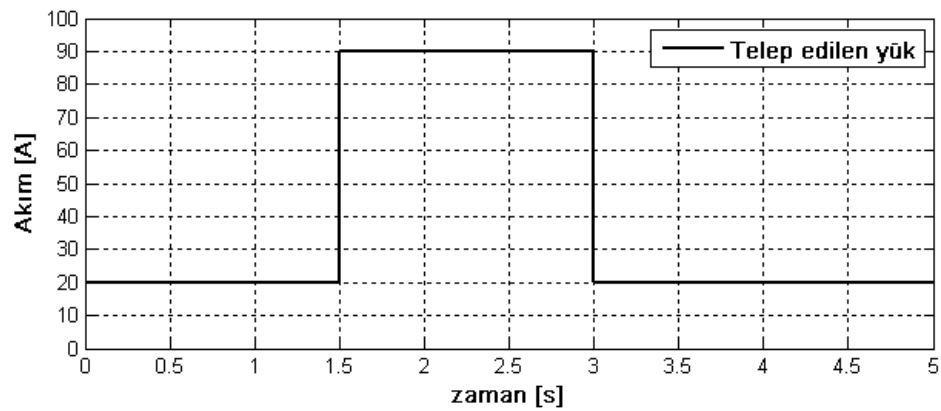
Şekil 8. 16. Talep edilen yük

Şekil 8.17'den de görüleceği gibi ilk 1,5s süre boyunca sabit yük ihtiyacına karşı yakıt pili belirli bir gerilim üretmektedir. Bu gerilimin değeri istene 60V .değerinden düşük olmasına rağmen artıran tip konvertör düşük yakıt pili gerilimini 60V 'a sabitlemiştir. Talep edilen yük 1,5s'den sonra artırıldığı için yakıt pili gerilimi oldukça düşmüştür. Bu gerilimdeki düşüşe rağmen konvertör çıkış gerilimini istenen değerde tutabilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere yine benzer biçimde talep edilen yüke bağlı olarak konvertörün çıkışındaki güç gösterilmiştir. Yakıt pili hem talep edilen yükü karşıladığı hem de konvertör kayıplarını karşıladığı için ürettiği güç konvertörün ürettiği güçten daha fazladır.

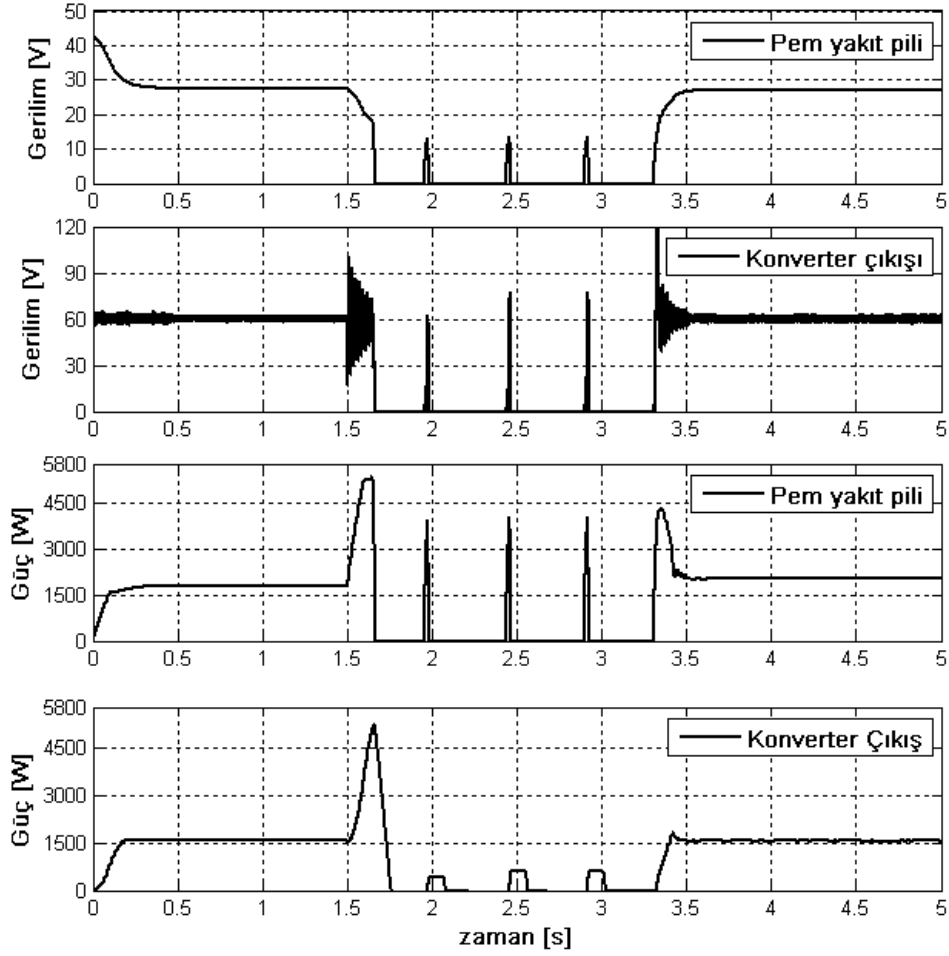


Şekil 8. 17. PEM yakıt pili ve konvertör sisteminin yük ihtiyacına verdiği cevap

Bu kez talep edilen güç ilk 1,5s için yine $20A$ fakat 1,5s ve 3s arasında $90A$ 'e artırılmıştır. 3s'den sonra ise tekrar $20A$ 'e düşürülmüştür. Şekil 8.18'de talep edilen yeni yükün zaman göre değişimi verilmiştir.



Şekil 8. 18. Talep edilen yeni yük

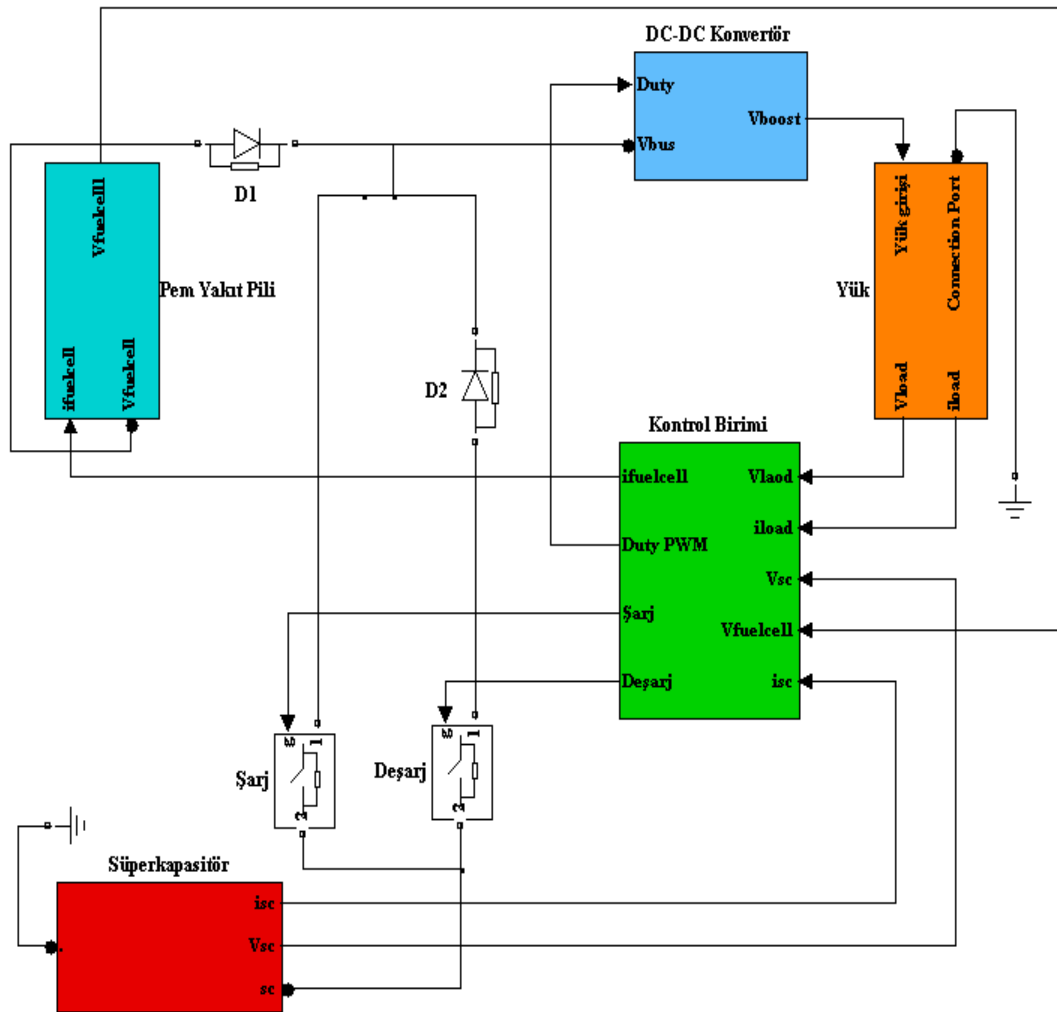


Şekil 8. 19. PEM yakıt pili ve konvertör sisteminin artan yük ihtiyacına verdiği cevap

Şekil 8.19’de görüleceği gibi yük talebimiz $20A$ ’den $90A$ ’e yükseltildiğinde yakıt pili gerekli gücü sağlayamadığı için konvertör çıkışında istenilen sabit $60V$ gerilim elde edilememiştir. Güç ifadesi çıkış gerilimi ve akım fonksiyonu olarak ifade edildiği için $60V \times 90A = 5400W$ bulunur. Konvertör kaybı ise $60V/10\Omega \times 60V = 600W$ olarak hesaplandığında yakıt pilinin karşılayacağı gücü aştığı görülecektir.. Bu yüzden 1,5 ile 3s arasında yakıt pili ihtiyaca karşılık verememiştir.

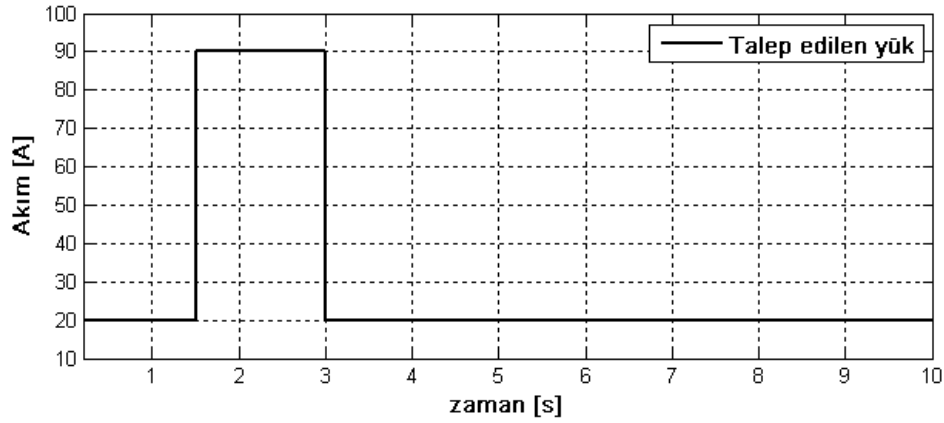
8.3.2 Dizayn 2: Pem Yakıt Pili ve Süperkapasitör Sisteminin Uygulanan Yüke Tepkisi

Bir önceki bölümde PEM yakıt pilinin artan yük ihtiyacına karşılık veremediği görülmüştür. Bu dizayn çalışmasında ise yakıt pilinin karşılayamadığı güç talebini süperkapasitör yardımıyla karşılanıp karşılanamayacağı incelenmektedir. Şekil 8.20’de PEM yakıt pili, süperkapasitör, artıran tip konvertör, kontrol birimi ve yükten oluşan simülasyon bloğu verilmiştir. Bu yapı üzerinde yakıt pili ve süperkapasitör güç akışları, gerilimleri incelenecektir. Hangi durumda süperkapasitörün depolama yaptığı ve ne zaman devreye girdiği durumlar incelenecektir.



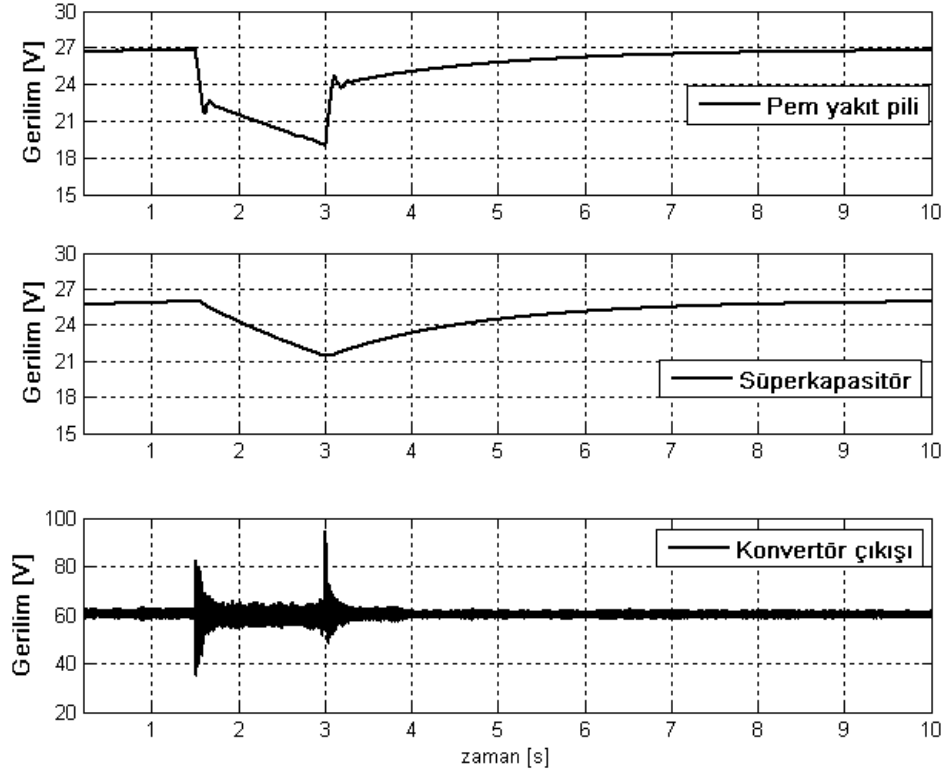
Şekil 8. 20. PEM yakıt pili ve süperkapasitör simülasyon bloğu

Bu simülasyonda bir önceki bölümdeki yük talebi uygulanacaktır. Talep edilen yük değişse bile çıkış gerilimi 60V olacak şekilde sabit tutulmak istenmektedir. Bu durumu incelemek için ilk 1,5s için 20A, 1,5s ile 3s arasında 90A, 3s'den sonra tekrar 20A yük talep edilmiştir. Şekil 8.21'de talep edilen yükün zaman göre değişimi gösterilmiştir.



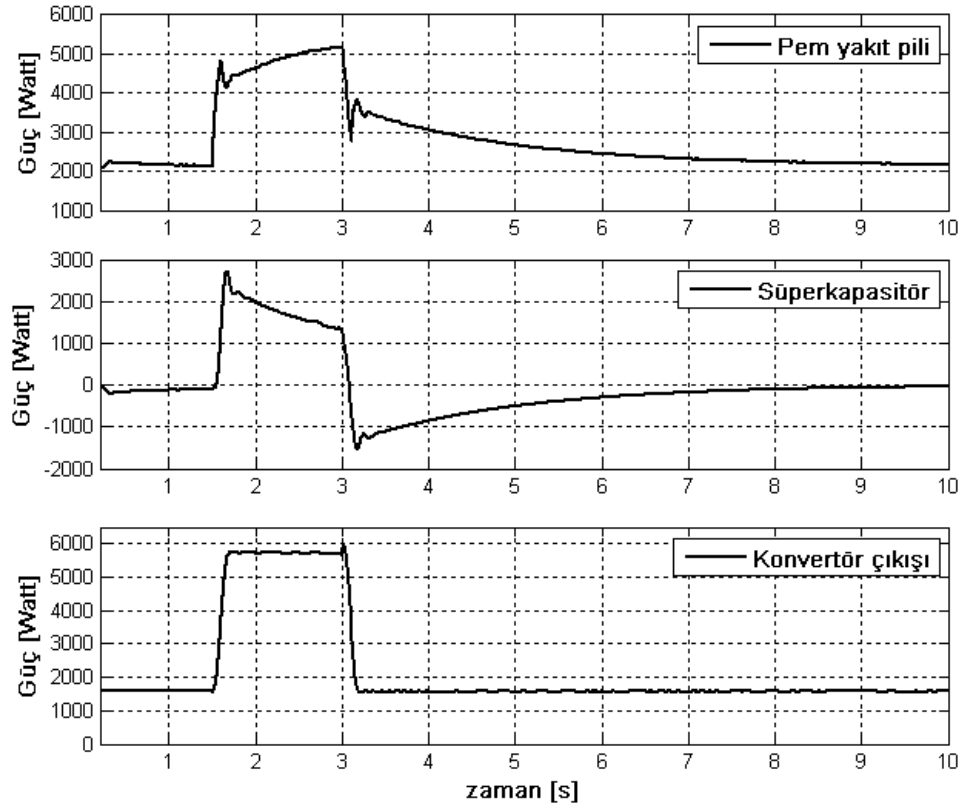
Şekil 8. 21. Talep edilen yükün zaman göre değişimi

Yük ihtiyacı 20A'den 90A'e çıkarıldığında bir önceki simülasyonda yakıt pili ihtiyacı karşılayamamıştı. Bu durumu gidermek için yakıt pili ve süperkapasitör birlikte kullanılarak yük talebine cevap verilebilmiştir. Şekil 8.22'de yakıt pili ve süperkapasitör gerilim değişimleri verilmiştir. 1,5s ile 3s arasında 90A yük talebi olduğundan yakıt pili ve süperkapsitör gerilimi ihtiyacı karşılamaya çalışmış ve gerilim düşüşleri görülmektedir. 3s sonunda yük talebi 20A'e düştüğü için yakıt pili tek başına bu ihtiyacı karşılayabilmekte talep dışında kalan gücüyle süperkapasitör şarj etmek için kullanılmaktadır. Gerilimdeki değişimlere rağmen konvertör çıkış gerilimini 60V'a sabitlemiştir. 1,5s ile 3 s arasında yük talebindeki artış giriş gerilimini düşürdüğü için çıkış geriliminde dalgalanma meydana gelmiştir. Buna rağmen konvertör çıkış gerilimini dengeleyebilmiştir.



Şekil 8. 22. Yük ihtiyacına cevap veren PEM yakıt pili ve süperkapasitörün gerilimi

Şekil 8.23’de güç değişimleri gösterilmiştir. İlk 1,5s için yük talebi 20A olduğu için yakıt pili bu talebi tek başına karşılayabilmektedir. Bu durumda süperkapasitör güç üretmemektedir. 1,5s’den sonra 90A yük talebi olduğundan yakıt pili bu ihtiyacı tek başına karşılayamamakta, yakıt piline yardımcı olarak süperkapasitör ihtiyacı karşılamak için devreye girmiştir. Yakıt pili ve süperkapasitör birlikte çalışarak talep edilen ihtiyacı karşılamıştır. 3s sonrasında yük 20A’ye düşürüldüğünden yakıt pili bu ihtiyacı karşılayabildiği için tek başına devrededir. Aynı zamanda ihtiyaç haricinde kalan gücüyle de süperkapasitörü şarj etmektedir. Süperkapasitör şarj olurken güç negatif değer almıştır. Bu süperkapasitörün şarj olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 8. 23. Yük talebi karşısında PEM yakıt pili ve süperkapasitör güç değişimleri

9 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sınırlı miktarda olan fosil yakıtlar ve çevreye dostu enerji ihtiyacı yakıt pillerine olan ilgiyi artırmıştır. Polimer elektrolit yakıt pilleri yüksek güç yoğunluğu, yüksek güç dönüşüm verimleri ve düşük sıcaklıkta çalışmaları gibi özellikleri sayesinde birçok alanda kullanılacaktır.

Bu tezde yukarıdaki açıklamalar göz önünde bulundurularak polimer elektrolit yakıt pili incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda sıcaklık ve basınç değişimlerin PEM yakıt pilini etkilediği anlaşılmıştır. Basınç artışı hücre aktivasyon kayıplarını azalttığı için hücrenin performansı artırmaktadır. Sıcaklık değişimi ise membrana zarar vermeyecek kadar artırılırsa hücrenin hem aktivasyon hem de ohmik kayıplarını azalttığı için yakıt pilini olumlu yönde etkileyen en önemli etmenlerde biri olduğu görülmüştür.

Akımdaki artış yakıt pilinin geriliminde düşüşe yol açmıştır. Bu gerilim düşüşü istenen bir durum değildir. Gerilimi düzenlemek ve istenen bir değere sabitlemek için artıran tip konvertör kullanılmıştır. Simülasyonun yaptığımız yakıt pili karşılayabileceği sınıra kadar oldukça iyi tepki vermiştir. Fakat güç talebi sınır değeri aştığında yakıt pilinde ani olarak düşüş gözlemlenmiştir.

Yakıt pili ve süperkapasitörün birlikte kullanıldığı tasarımda ise yakıt pili güç talebinden artan kısmı süperkapasitörde depolamıştır. Sadece yakıt pilinin kullanıldığı simülasyonda sınır değeri aştığında ani düşüş meydana geldiğinden güç ihtiyaç karşılanamamıştı. Bu yapının kullanıldığı simülasyonda ise süperkapasitör devreye girerek depoladığı gücü talebi karşılamak için kullanmıştır. Bu sayede yakıt pili ve süperkapasitör sisteminden daha iyi sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.

Bundan sonraki çalışmalarda yakıt pili, güneş pilleri, rüzgar türbini ve süperkapasitör birlikte kullanılarak yük taleplerine nasıl tepki verebilecekleri ve en uygun konfigürasyonun hazırlanması konusunda çalışmalar yapılabilir.

10 KAYNAKLAR

[1] Larminie J, Dicks A. Fuel Cell Systems Explained. England: John Wiley and Sons; (2000).

[2] J. E. Larminie and A. Dicks; "Fuel Cell Systems Explained"; John Wiley e Sons; Chichester,England; 308p, 2000

[3] E. Oral, V. Çelik, Mühendis ve Makina, 46 30 (2005)

[4] Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü ,”Yakıt Pilleri, http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/hidrojen/yakit_pilleri.html, (2009)

[5] Barbir F., PEM Fuel Cells Theory and Practice, Elsevier, 2005

[6]. Mennola, T., “Design and Experimental Characterization of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, Thesis, University of Helsinki, Finland, 26-30, (2000)

[7] Ballard Co. Ltd., “Stationary Application”, [http://www.ballard.com/Stationary Power/Backup_Power_Fuel_Cells/Application_Overview.htm](http://www.ballard.com/Stationary_Power/Backup_Power_Fuel_Cells/Application_Overview.htm), (2009)

[8] Honda Co.Ltd., ”Honda FCX Clarity”, <http://world.honda.com/FCXClarity/specifications/index.html>, (2009)

[9] Casio Computer Co. Ltd, Success in R&D of Optimal, Small-Scale, High-Performance Fuel Cells for Portable Devices, <http://world.casio.com/info/2002/fuelcell.html>, (2002)

[10] A. M. Namisnyk: A survey of Electrochemical Supercapacitor Technology, B.Sc., faculty of Engineering, University of Technology, Sydney, (2003).

- [11] A. Burke: Ultracapacitors: why, how, and where is the technology, *Journal of power sources* 91, pp. 37–50, (2000)
- [12]. Erickson, R. W., “DC-DC Power Converters”, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 5:53-63, (1999)
- [13]. Mohan, N., Unlead, T.M. and Robbins, W. P., “Power Electronics, Converters, Applications and Design”, Joe Wiley and Sons Inc., London, 173-210, 323-370, (1989).
- [14]. University of Minnesota “Internet-Based Short Course, Power Electronics Principles for Practicing Engineers”, [http://www.ece.umn.edu /groups/power /PE_ShortCourse_Aug04/Course Outline_PE_Aug_2004.pdf](http://www.ece.umn.edu/groups/power/PE_ShortCourse_Aug04/Course%20Outline_PE_Aug_2004.pdf), (2004).
- [15] R. F. Mann; J. C. Amphlett; M. A. I. Hooper; H.M. Jensen; B. A. Peppley and P. R. Roberge; “Development and application of a generalised steady-state Electrochemical model for a PEM fuel cell”; *Journal of Power Sources* 86; pp. 173–180, (2000)
- [16] J. C. Amphlett; R.F. Mann; B.A. Peppley; P.R. Roberge and A. Rodrigues; “A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells”; *Journal of Power Sources* 61; pp. 183–188, (2000)
- [17] Iqbal MT. Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system. *Journal of Renewable Energy*; 28:223–37, (2003)
- [18] M. J. Khan and M. T. Iqbal, “Dynamic Modelling and Simulation of a Fuel Cell Generator,” *Fuel Cells*, vol. 5, no. 1, pp. 97–104, (2005).
- [19] R.L. Spyker and R.M. Nelms, Analysis of double-layer capacitors supplying constant power loads, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems* 36 (4) 1439–1443, (2000)

[20] Spyker RL, Nelms RM. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. IEEE Trans Aerosp Electron Syst 36(3):829–36, (2000)

[21] M. Uzunoglu, M.S. Alam, Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultra-capacitor system for stand alone applications, IEEE Trans. Energy Conversion,

[22] Karl-Heinz, H. “Analysis Tool for Fuel Cell Vehicle Hardware and Software (Controls) with an Application to Fuel Economy Comparisons of Alternative System Designs”, University of Braunschweig, Germany, (2001)

[23] Vina Technology Co. Ltd. “EDLC Supercapacitor” http://www.vina.co.kr/new_html/eng/product/info.asp?cate1=10

11 ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı : Ümit
Soyadı : Uysal
Doğum Tarihi : 05.01.1984
Doğum Yeri : İstanbul
Medeni Hali : Bekar

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Adres : Bekirdere Mah.Güney Sok.No:29 İzmit
Kocaeli-Türkiye
E-mail : uysalumutt@hotmail.com

EĞİTİM

Yüksek Lisans 2006 – 2009

Makina Mühendisliği, Enerji Ana Bilim Dalı
Mühendislik Fakültesi
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli-Türkiye.

Lisans 2002 – 2006

Makine Mühendisliği, Enerji Ana Bilim Dalı
Mühendislik fakültesi
Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli-Türkiye.