

**EVSEL YÜKLER İÇİN
YAKIT PİLİ-GÜNEŞ PİLİ HİBRİT SİSTEMİNİN
TASARIMI, MODELLENMESİ VE UYGULAMASI**

Yük. Müh. Zehra URAL BAYRAK

**Doktora Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU
HAZİRAN-2014**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EVSEL YÜKLER İÇİN YAKIT PİLİ-GÜNEŞ PİLİ HİBRİT SİSTEMİNİN
TASARIMI, MODELLENMESİ VE UYGULAMASI**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Zehra URAL BAYRAK

(07113202)

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik Tesisleri

Danışman: Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 Mayıs 2014

HAZİRAN-2014

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EVSEL YÜKLER İÇİN YAKIT PİLİ-GÜNEŞ PİLİ HİBRİT SİSTEMİNİN
TASARIMI, MODELLENMESİ VE UYGULAMASI**

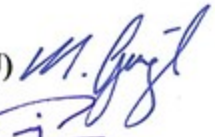
DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Zehra URAL BAYRAK

(07113202)

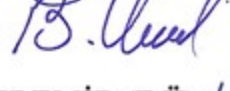
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Mayıs 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Haziran 2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU (F.Ü) 

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (F.Ü) 

Doç. Dr. Zafer AYDOĞMUŞ (F.Ü) 

Doç. Dr. Bülent VURAL (Y.T.Ü) 

Yrd. Doç. Dr. Mahmut Temel ÖZDEMİR (F.Ü) 

Haziran-2014

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı'nda hazırlanmıştır.

Bu tez çalışmasını yöneten, tezin hazırlanması ve yazımı süresince yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç.Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez süresince tecrübelerini benimle paylaşan, bilimsel katkılarıyla bana yardımcı olan kıymetli hocam Prof.Dr. Mehmet CEBECİ'ye ve araştırma süresince yardımını esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım değerli hocam Yrd.Doç.Dr. Mahmut Temel ÖZDEMİR'e de teşekkürü bir borç bilirim.

Görüş, öneri ve bilgilerinden faydalandığım, destekleriyle tezime katkıda bulunan Yrd.Doç.Dr. Yavuz EROL'a, Yrd.Doç.Dr. Hasan GÜLER'e, Yrd.Doç.Dr. Gökay BAYRAK'a ve Arş.Gör. Mehmet SÖNMEZ'e de ayrıca teşekkür ederim.

Bana maddi manevi her türlü desteği veren ve her zaman yanımda olan aileme ve sevgili eşim Mehmet Ersoy BAYRAK'a en içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca FÜBAP-MF.12.17 no.lu proje dâhilinde yaptığı desteklerden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi'ne teşekkür ederim.

Bu doktora tezinin, ülkemizde PEM yakıt pillerinin yenilenebilir enerji sistemlerindeki uygulamaları konusunda çalışma yapacak olanlara katkıda bulunmasını dilerim.

Zehra URAL BAYRAK
ELAZIĞ-2014

İÇİNDEKİLER

	Numara
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	IX
SİMGELER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Literatür Özeti.....	3
1.3. Tez İçeriği.....	8
2. YAKIT PİLLERİ VE UYGULAMALARI	9
2.1. Yakıt Pilinin Yapısı ve Çalışması.....	9
2.2. Yakıt Pili Türleri.....	10
2.3. PEM Yakıt Pili	14
2.4. Yakıt Pillerinin Uygulama Alanları.....	16
2.4.1. Sabit Güç Sistemleri	17
2.4.1.1. Evsel Uygulamalar	17
2.4.1.2. Kombine Isı ve Güç Sistemleri.....	18
2.4.1.3. Dağıtık Güç Sistemleri	21
2.4.2. Ulaşım.....	22
2.4.2.1. Otomobiller.....	23
2.4.2.2. Otobüsler	24
2.4.3. Taşınabilir Yakıt Pilleri	25
2.4.3.1. Mobil Telefonlar.....	27
2.4.3.2. Dizüstü Bilgisayarlar	27
2.4.3.3. Kesintisiz Güç Kaynakları.....	28
2.4.4. Uzak Uygulamaları.....	28
3. PEM YAKIT PİLİ MODELLERİ	29
3.1. Matematiksel Modeller.....	29
3.2. Dinamik Modeller	34
4. EVSEL YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ	39
4.1. Güneş Pili-Yakıt Pili Hibrit Sistemi	39
4.2. Tasarım ve Benzetim	41
4.2.1. Yakıt Pili Modeli	42
4.2.2. Fotovoltaik Panel Modeli	47
4.2.3. DC/DC Konverter Modeli	48
4.2.4. İnverter Modeli	49
4.2.5. Elektrolizör Modeli	51
4.3. Yakıt Pili Sisteminin Yük Analizi	52
4.4. Yakıt Pili Sisteminin DC Motor Analizi	56
4.5. Yakıt Pili Sisteminin AC Motor Analizi	60
5. YAKIT PİLİ-GÜNEŞ PİLİ HİBRİT SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ..	64
5.1. Yakıt Pili Sistemi.....	64

5.2. Yakıt Pili-Güneş Pili Sistemi.....	67
5.2.1. Deneysel Çalışma	68
5.2.2. Benzetim Çalışması	75
6. DENEYSEL VE BENZETİM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	78
6.1. Yakıt Pilinin Devreye Alınması	78
6.2. Güneş Pilinin Devreye Alınması	94
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	110
7.1. Sonuçlar	110
7.2. Öneriler.....	111
KAYNAKLAR.....	112
EKLER	119
Ek 1. H-100 PEM Yakıt Pili 100 W (FCS C100).....	119
Ek 2. DSP-160 Güneş Pili	120
Ek 3. SD-200B-12 DC-DC Konverter (Meanwell)	121
Ek 4. SD-500L-12 DC-DC Konverter (Meanwell)	122
Ek 5. Xantrex PROwatt-SW 700i.....	123
Ek 6. NI-USB 6341 Data Logger	124
ÖZGEÇMİŞ	125

ÖZET

Son yıllarda fosil yakıtların tükenecek olması ve küresel ısınma ile birlikte güneş, hidrojen ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi artmaktadır. Özellikle hidrojen ve güneş, enerji üretimi için hibrit sistemlerde birlikte kullanılmaktadır. Fotovoltaik sistemlerde hava şartlarına bağlı olarak üretilen enerjinin depolanmasına ihtiyaç duyulur. Bu tür sistemlerde kullanılacak bataryaların hem ömürleri kısadır hem de bakım masrafları vardır. Bu nedenle güneş pillerinin yakıt pilleri ile birlikte kullanılması tercih edilen yöntemlerden biridir. Böylece enerji talebi temiz enerji kaynaklarından istifade edilerek kesintisiz olarak karşılanmış olur.

Bu çalışmada, öncelikle hidrojenin elde edilmesi için güneş pillerini kullanan şebekeden bağımsız bir yakıt pili-güneş pili hibrit sisteminin benzetimi yapılarak, farklı yükler için analizi yapılmıştır. Daha sonra evsel uygulamalar için geliştirilen ve şebekeden bağımsız çalışan bir yakıt pili-güneş pili hibrit sisteminin prototipi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu sistemde güneş enerjisinin yeterli olduğu zamanlarda, yükün enerji talebi PV sistem tarafından karşılanmaktadır. Güneş ışığının yetersiz olduğu gündüz saatlerinde ve gece boyunca ise yakıt pili devreye girerek sistemin kesintisiz olarak çalışabilmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmada, yük olarak farklı güçlerde lambalar kullanılmıştır. İnverter çıkış akım ve gerilimleri veri toplama cihazı ve LabVIEW arayüzü kullanılarak analiz edilmiştir. Matlab-Simulink'te deneysel sisteme ilişkin bir benzetim sistemi tasarlanmış ve benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak hibrit sistemin yük analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yakıt pili, Güneş pili, Hibrit sistemler, Benzetim, Yük Analizi.

SUMMARY

Design, Modeling and Implementation of Fuel Cell-Solar Cell Hybrid System for Residential Loads

In recent years, renewable energy sources such as solar, hydrogen, wind and so on have become more popular with the global warming and depletion of fossil fuels. Especially, hydrogen and solar energy have been used together in hybrid system for energy generation. Produced energy depending on weather conditions is needed to store for photovoltaic systems. Lifetime of batteries used in such systems is short as well as has a maintenance costs. Therefore the use of solar cells with fuel cells is one of the preferred methods. Thus, energy demand can be supplied exploiting clean energy sources without interruption.

In the first stage of this study, off-grid hybrid system with fuel cell-solar cell using solar energy to obtain hydrogen were simulated and analysed for different loads. Then, prototype of the fuel cell-solar cell off-grid hybrid system developed for residence was carried out. In this system, the energy demand has been provided from PV system when the sun is enough. Insufficient sunlight during the daytime and overnight, interrupted power has been provided by the fuel cell. Different power lamps were used as the load in the experimental study. The experimental results of output voltage and load current were analysed using data logger and LabVIEW interface. A simulation system closed to the experimental system has been designed in Matlab-Simulink. Load analysis of the hybrid system has been performed with comparing simulation and experimental results.

Keywords: Fuel cell, Solar cell, Hybrid systems, Simulation, Load Analysis.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. PEM yakıt pili ve bileşenleri	15
Şekil 2.2. Yakıt pillerinin uygulama alanlarının sınıflandırılması	16
Şekil 2.3. Evsel uygulamalar için bir kombine ısı ve güç sistemi	19
Şekil 2.4. Evsel ısı ve güç sistemi	20
Şekil 2.5. Yakıt pili kullanan bir dağıtık güç santrali	22
Şekil 2.6. Yakıt pilli otomobiller	24
Şekil 2.7. İleri teknoloji yakıt pilli bir otobüs	25
Şekil 2.8. Taşınabilir prototip bir yakıt pili	27
Şekil 3.1. Matematiksel bir modelde çözülmesi gereken parametreler	29
Şekil 3.2. Polarizasyon Eğrisi	33
Şekil 3.3. Bir PEMFC'nin şematik diyagramı ve gerilim düşümleri	35
Şekil 3.4. Yakıt pili dinamik modeli	36
Şekil 3.5. Bir PEM yakıt pili sisteminin blok diyagramı	36
Şekil 3.6. PEM yakıt pili modeli	37
Şekil 3.7. PEM yakıt pili modülünün dinamik modeli	38
Şekil 3.8. Matlab Simulink'te gerçekleştirilen PEM modülü dinamik modeli	38
Şekil 4.1. Bir yakıt pili güç sistemi	41
Şekil 4.2. Bir yakıt pili sisteminin modeli	41
Şekil 4.3. PEM yakıt pili modeli	42
Şekil 4.4. Fotovoltaik panel modeli	48
Şekil 4.5. Yükseltici konverter modeli	49
Şekil 4.6. Tek fazlı PWM inverter modeli	50
Şekil 4.7. Elektrolizör modeli	51
Şekil 4.8. Omik yük için inverter çıkış gerilimi	52
Şekil 4.9. Omik yük için yük akımı	52
Şekil 4.10. Omik yük için aktif gücün değişimi	53
Şekil 4.11. İndüktif yük için inverter çıkış gerilimi	53
Şekil 4.12. İndüktif yük için yük akımı	53
Şekil 4.13. İndüktif yük için aktif gücün değişimi	54
Şekil 4.14. İndüktif yük için reaktif gücün değişimi	54
Şekil 4.15. Kapasitif yük için inverter çıkış gerilimi	55
Şekil 4.16. Kapasitif yük için inverter çıkış gerilimi	55
Şekil 4.17. Kapasitif yük için aktif gücün değişimi	55
Şekil 4.18. Kapasitif yük için reaktif gücün değişimi	56
Şekil 4.19. DC motorlu PV-Yakıt Pili sisteminin blok diyagramı	57
Şekil 4.20. DC motor gücü (yüksüz durum)	58
Şekil 4.21. DC motor hızı (yüksüz durum)	58
Şekil 4.22. DC motor akımı (yüksüz durum)	58
Şekil 4.23. DC motor gücü ($T_m=10$ N.m)	59
Şekil 4.24. DC motor hızı ($T_m=10$ N.m)	59
Şekil 4.25. DC motor akımı ($T_m=10$ N.m)	59
Şekil 4.26. AC motorlu PV-Yakıt Pili sisteminin blok diyagramı	60
Şekil 4.27. AC motor gücü (yüksüz durum)	61
Şekil 4.28. AC motor hızı (yüksüz durum)	61
Şekil 4.29. AC motor akımı (yüksüz durum)	62
Şekil 4.30. AC motor gücü ($T_m=10$ N.m)	62

Şekil 4.31. AC motor hızı ($T_m=10$ N.m)	62
Şekil 4.32. AC motor akımı ($T_m=10$ N.m)	63
Şekil 5.1. Deney Düzenneği	64
Şekil 5.2. Sistemin Blok Diyagramı	64
Şekil 5.3. 1,8 k Ω için çıkış gerilimi.....	65
Şekil 5.4. 1,8 k Ω için yük akımı.....	65
Şekil 5.5. 1,2 k Ω için çıkış gerilimi.....	65
Şekil 5.6. 1,2 k Ω için yük akımı.....	65
Şekil 5.7. 0,7 k Ω için çıkış gerilimi.....	66
Şekil 5.8. 0,7 k Ω için yük akımı.....	66
Şekil 5.9. Fan gerilimi	66
Şekil 5.10. Fan akımı.....	66
Şekil 5.11. Fan gerilimi (0-0,2 sn).....	67
Şekil 5.12. Fan akımı (0-0,2 sn)	67
Şekil 5.13. Gerçekleştirilen hibrit sistemin devre şeması.....	68
Şekil 5.14. Deney düzenneği	68
Şekil 5.15. PEM Yakıt Pili	69
Şekil 5.16. Güneş Pilleri.....	69
Şekil 5.17. Elektrolizör.....	69
Şekil 5.18. Hidrojen tüpü.....	69
Şekil 5.19. Tasarlanan konverter	70
Şekil 5.20. 200 W alçaltıcı konverter	70
Şekil 5.21. Güneş pili için kullanılan alçaltıcı konverter	70
Şekil 5.22. İnverter	71
Şekil 5.23. Elektronik ölçüm kartı.....	71
Şekil 5.24. Gerilim ve akım bilgisinin elde edilmesine ilişkin devre prensip şeması	72
Şekil 5.25. Kontrol devresinin iç yapısı	73
Şekil 5.26. Kontrol devresinin çalışması	74
Şekil 5.27. Sistemin LabVIEW arayüzü.....	75
Şekil 5.28. FC-PV Sisteminin blok diyagramı	76
Şekil 5.29. Yakıt pili hücre gerilimi	76
Şekil 5.30. Yakıt pili yığın gerilimi.....	76
Şekil 5.31. Alçaltıcı konverter.....	77
Şekil 6.1. FC'nin devreye alınma anındaki gerilimi.....	78
Şekil 6.2. Konverterin devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	79
Şekil 6.3. Konverterin devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	79
Şekil 6.4. FC'nin devreden çıkma anındaki gerilimi.....	80
Şekil 6.5. İnverterin devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi	80
Şekil 6.6. İnverterin devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi	80
Şekil 6.7. İnverter çıkış gerilimi	81
Şekil 6.8. 15 W'lık yükün devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	82
Şekil 6.9. 15 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)	82
Şekil 6.10. 15 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu).....	82
Şekil 6.11. 15 W için yük akımı (deneysel sonuç)	83
Şekil 6.12. 15 W için yük akımı (benzetim sonucu)	83
Şekil 6.13. 15 W'lık yükün devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	84
Şekil 6.14. 25 W'lık yükün devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	84
Şekil 6.15. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)	85
Şekil 6.16. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu).....	85

Şekil 6.17. 25 W için yük akımı (deneysel sonuç)	86
Şekil 6.18. 25 W için yük akımı (benzetim sonucu)	86
Şekil 6.19. 25 W'lık yükün devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	87
Şekil 6.20. 40 W'lık yükün devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	87
Şekil 6.21. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)	88
Şekil 6.22. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu).....	88
Şekil 6.23. 40 W için yük akımı (deneysel sonuç)	89
Şekil 6.24. 40 W için yük akımı (benzetim sonucu)	89
Şekil 6.25. 40 W'lık yükün devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi.....	90
Şekil 6.26. Fanın devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi	90
Şekil 6.27. Fan gerilimi (deneysel sonuç)	91
Şekil 6.28. Fan gerilimi (benzetim sonucu).....	91
Şekil 6.29. Fan akımı (deneysel sonuç).....	92
Şekil 6.30. Fan akımı (benzetim sonucu)	92
Şekil 6.31. 0,85 bar basınçta FC'nin devreye alınma anındaki gerilimi	93
Şekil 6.32. 0,85 bar basınçta konverterin devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi	93
Şekil 6.33. Basıncın sıfırlandığı andaki FC ve konverter gerilimi	94
Şekil 6.34. PV'nin devreye alınma anındaki gerilimi	95
Şekil 6.35. Konverterin devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi	95
Şekil 6.36. İnverterin devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi	96
Şekil 6.37. İnverterin devreden çıkma anındaki PV ve konverter gerilimi	96
Şekil 6.38. Konverterin devreden çıkma anındaki PV ve konverter gerilimi.....	97
Şekil 6.39. PV'nin devreden çıkma anındaki gerilimi	97
Şekil 6.40. Yüksüz durumda çıkış gerilimi	98
Şekil 6.41. 25 W'lık yükün devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi	98
Şekil 6.42. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)	99
Şekil 6.43. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu).....	99
Şekil 6.44. 25 W için yük akımı (deneysel sonuç)	100
Şekil 6.45. 25 W için yük akımı (benzetim sonucu)	100
Şekil 6.46. 25 W'lık yükün devreden çıkma anındaki PV ve konverter gerilimi.....	101
Şekil 6.47. 40 W'lık yükün devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi	101
Şekil 6.48. 40 W'lık yükün devreden çıkma anındaki PV ve konverter gerilimi.....	102
Şekil 6.49. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)	102
Şekil 6.50. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu).....	103
Şekil 6.51. 40 W için yük akımı (deneysel sonuç)	103
Şekil 6.52. 40 W için yük akımı (benzetim sonucu)	104
Şekil 6.53. 75 W'lık yükün devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi	104
Şekil 6.54. 75 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)	105
Şekil 6.55. 75 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu).....	105
Şekil 6.56. 75 W için yük akımı (deneysel sonuç)	106
Şekil 6.57. 75 W için yük akımı (benzetim sonucu)	106
Şekil 6.58. Fanın devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi.....	107
Şekil 6.59. Fan gerilimi (deneysel sonuç)	107
Şekil 6.60. Fan gerilimi (benzetim sonucu).....	108
Şekil 6.61. Fan akımı (deneysel sonuç).....	108
Şekil 6.62. Fan akımı (benzetim sonucu)	108

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1. Yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları.....	10
Tablo 2.2. Anot ve Katot için elektrokimyasal yarı reaksiyonlar.....	10
Tablo 2.3. Yakıt pili türlerinin karşılaştırılması	12
Tablo 3.1. Yeni matematiksel modellerin karşılaştırılması	30
Tablo 4.1. Yakıt pili model parametreleri	44
Tablo 4.2. Reaktant akışı model parametreleri.....	47

SİMGELER LİSTESİ

V_{cell}	: Hücre gerilimi
E	: Açık devre hücre gerilimi
V_{act}	: Aktivasyon aşırı gerilimi
V_{ohm}	: Omik aşırı gerilim
V_{conc}	: Konsantrasyon aşırı gerilimi
T	: Hücre sıcaklığı
E_0	: Referans gerilimi
R	: Üniversal gaz sabiti
F	: Faraday sabiti
P_{H_2}	: Hidrojen basıncı
P_{O_2}	: Oksijen basıncı
P_{H_2O}	: Su buharı basınçları
P	: Yığın içindeki toplam basınç
I	: Akım yoğunluğu
C_{O_2}	: Oksijen konsantrasyonu
C_{dl}	: Çift katman kapasitesi
R_{act}	: Aktivasyon direnci
R_{mem}	: Membran direnci
t_m	: Membran kalınlığı
σ	: Membran iletkenliği
τ_{H^+}	: Zaman sabiti
α_{H^+}	: İlgili parametre
D_{H^+}	: Difüzyon katsayısı
C_{H^+}	: Proton konsantrasyonu
$\dot{m}_{in}$	: Reaktant giriş akış oranı
$\dot{m}_{out}$	: Reaktant çıkış akış oranı
P_{amb}	: Ortam basıncı
V_a	: Anot hacmi
k_a	: Anot akış sabiti
V_c	: Katot hacmi
k_c	: Katot akış sabiti
PC_{H_2}	: H_2 (saf) yüzdesi(saf)
CF_{H_2}	: H_2 akış oranı değişim faktörü
PC_{O_2}	: O_2 (saf) yüzdesi
CF_{O_2}	: O_2 akış oranı değişim faktörü
PC_{H_2O-C}	: Katot buhar katkı oranı
a	: İdeal faktör
I_0	: PV hücre ters saturasyon akımı
I_{pv}	: PV hücre çıkış akımı
I_{sc}	: Hücre kısa devre akımı
k	: Boltzmann sabiti
N_p	: Paralel dizi sayısı
N_s	: Her bir dizi için seri hücre sayısı,
q	: Elektron yükü
R_s	: PV hücrenin seri direnci
V_{pv}	: PV hücre için çıkış gerilimi

η_{H_2}	: Her bir saniyede üretilen hidrojen molü
η_C	: Seri elektrolizör hücre sayısı
i_e	: Elektrolizör akımı
η_F	: Faraday verimi
T_m	: Motor yükü

KISALTMALAR LİSTESİ

PEMFC	: Polimer elektrolit membranlı yakıt pili
SOFC	: Katı oksit yakıt pili
DMFC	: Doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri
MCFC	: Erimiş karbonat yakıt pilleri
AFC	: Alkalın yakıt pili
PAFC	: Fosforik asit yakıt pili
CHP	: Kombine ısı ve güç
PV	: Fotovoltaik panel
SLPM	: Standart litre/dakika
PWM	: Darbe genişlik modülatörü
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
DÜ	: Dağıtık üretim
MPPT	: Maksimum güç noktası izleyicisi

1. GİRİŞ

Sanayileşme ve nüfus artışıyla birlikte enerji ihtiyacının da artması fosil yakıtlara olan talebi arttırmıştır. Bunun sonucu olarak da hava kirliliği, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi ciddi sorunlar ortaya çıkmıştır. Ayrıca, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve hızla tükenmesi alternatif enerji kaynakları arayışını doğurmuştur [1]. Günümüzde fosil yakıtlara alternatif olarak doğal üretim kaynakları (güneş, rüzgâr, jeotermal, hidroelektrik vb.) ve nükleer enerji ele alınmaktadır. Fosil yakıtların yerini alabilecek ve dünyanın artan enerji ihtiyacını karşılayabilecek alternatif enerji kaynaklarından biri de hidrojen enerjisidir [2-5].

Yaşam standartlarının yükselmesi ve konutlarda elektriğe olan ihtiyacın artması, enerjinin kesintisiz olmasını zorunlu hale getirmektedir. Bu nedenle şebekeye bağlı durumlarda yedek sistem olarak çalışacak, şebekeden bağımsız durumlarda ise gereken enerjiyi sağlayacak sistemlere ihtiyaç vardır. Hidrojen ile çalışan yakıt hücresi bir sistem bu ihtiyacı karşılamak amacıyla kullanılabilir. Ayrıca konutlarda hidrojen enerjisinin kullanımı, özellikle sabit veya taşınabilir cihazların güç ihtiyacının karşılanması için alternatif bir yöntemdir.

Yakıt pilleri, geleceğin güç kaynağı olarak görülmektedir. Elektriksel güç elde etmek için fosil yakıtların kullanımının bazı olumsuz sonuçlara sebebiyet vermesi, yakıt pillerine olan ilgiyi arttırmıştır. Günümüzde sınırsız bir yakıt kaynağına ve düşük kirlitici emisyonu sahip olan güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Yakıt pilleri hem ticarileşmeye oldukça yakındır, hem de çevresel beklentileri ve global güç ihtiyaçlarının tümünü karşılayabilecek yeteneğe sahiptir [4].

Yakıt pilleri performanslarının üstünlüğü ve çevre ile dost bir teknoloji olması gibi avantajları sayesinde elektrik üretimi ve kojenerasyon uygulamalarının her ikisi için de uygun potansiyelli bir teknolojidir. Yakıt pili kojenerasyon sistemlerinin avantajları, düşük gürültü seviyesini, düşük bakım potansiyelini ve kısmi yük yönetimini, düşük emisyonlar ve küçük üniteler ile dahi % 85-90'lık bir verimle gerçekleştirmeleridir [6]. Sabit güçlü yakıt pilleri tipik olarak doğal gazı yakarlar ve daha az zararlı emisyonlar açığa çıkarırlar. Düşük emisyon ve gürültü seviyeleri, yakıt pillerini özellikle evsel, ticari ve kurumsal uygulamalar için uygun hale getirmektedir. Bununla birlikte, yakıt pili sistemlerinin yüksek maliyeti ve nispeten kısa ömürleri dezavantajlarıdır. Teknolojik problemleri

çözmek, daha ucuz malzeme üretim yöntemleri geliştirmek ve yakıt pillerinin maliyetini azaltmak için araştırmalar devam etmektedir.

Yakıt pili sistemleri, kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal araçlardır. Elektrokimyasal bir işlem ile yakıtı elektriğe dönüştürdükleri için yakıt pillerinin, klasik güç santrallerine göre emisyonları daha azdır. Düşük emisyonları yakıt pillerini çevresel olarak tercih edilebilir bir hale getirmektedir. İlerleyen yıllarda, yakıt pili sistemlerinin yüksek olan maliyetlerinin düşeceği ve daha yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilmektedir [6].

Polimer elektrolit membranlı yakıt pilleri (PEMFC) en popüler yakıt pili türüdür. Bu yakıt pili türünde genellikle yakıt olarak hidrojen kullanılır. PEM yakıt pilleri hidrojen biyokütle kaynaklı materyallere ve etanole kadar değişen birçok başka yakıt opsiyonlarına da sahiptir. Bu yakıtlar ya yakıt pili içine doğrudan beslenir, ya da saf hidrojen açığa çıkarmak için bir dönüştürücüye gönderilir [7].

1.1. Tezin Amacı

Son yıllarda enerji üretimi için birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının oluşturduğu hibrit sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu enerji kaynakları içerisinde güneş ve hidrojen enerjisi ön plana çıkmaktadır. Ülkemiz güneş enerjisi yönünden oldukça iyi bir potansiyele sahiptir. Bu nedenle Türkiye’de ana enerji kaynağının güneş olduğu hibrit sistemlere öncelik verilmelidir.

Bu çalışmanın amacı; evsel uygulamalar için güneş ve hidrojen enerjisini bir arada kullanan hibrit bir enerji üretim sistemi geliştirerek, verimi düşük olan yenilenebilir enerji sistemlerinin toplam verimini arttırmaktır. Ayrıca, evsel uygulamalar için gerçekleştirilen prototip yakıt pili-güneş pili sistemi ile bu tür temiz enerji sistemlerinin evlerde kullanımının yaygınlaştırılması da amaçlanmıştır. Bu tez çalışmasında sunulan hibrit sistemin şebekeden bağımsız olarak gerçekleştirilmesi ile enerji nakil hatlarının tesis edilmesinin zor ve maliyetli olduğu yerlerde ekonomik bir çözüm olacağı beklenmektedir.

1.2. Literatür Özeti

Yenilenebilir enerjiye duyulan ilginin her geçen gün artmasıyla birlikte, literatürde yakıt pili sistemleri üzerine de oldukça fazla çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Özellikle son yıllarda yakıt pili sistemlerinin evsel uygulamaları ile ilgili çalışmalar artmıştır. Bu bölümde tez konusu ile ilgili literatürde yer alan alan çalışmalara yer verilmiştir.

Evsel uygulamalar için geliştirilen kombine ısı ve güç üretim sistemlerinde, genellikle yakıt pili olarak PEMFC ve katı oksit yakıt pili (SOFC) kullanılmaktadır ve bu konu ile ilgili birçok çalışma mevcuttur [8-10]. Bu çalışmalar içerisinde şebekeye doğrudan bağlanan sistemler mevcut olduğu gibi, bağımsız olarak bir evin enerji ihtiyacını karşılayan sistemler de vardır. Shaneb ve Taylor [11], Matlab-Simulink kullanarak, konutlar için farklı güçlerde mikro kombine ısı ve güç (CHP) sistemleri tasarlamışlar, bu sistemler üzerinde farklı çalışma maliyeti ve CO₂ emisyonuna göre, farklı çalışma stratejileri geliştirmişlerdir. PEM yakıt pilinde yakıt olarak doğal gaz kullanılan bu sistemde bir termal depo ve bir yedek ısıtıcı kullanılmıştır. Sistem, sadece doğal gazdan enerji dönüşümünü içermektedir. Güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi gibi farklı yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmamıştır.

Geliştirilen bazı CHP sistemlerinde [12-14], PEM yakıt pili ile birlikte ısı dönüştürücü, radyatör ve sıcak su deposu gibi elemanlar kullanılmıştır. Bu tür sistemlerde, yakıt olarak hem doğal gaz, hem LPG, hem de hidrojenden yararlanılabilmektedir. CHP sistemlerinde yakıt pili ile birlikte güneş panellerinin de kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [15].

Pamukkale Üniversitesi'nde yapılan pratik bir çalışmada [16], evsel uygulamalar için yakıt pili, güneş pili ve rüzgar türbininden oluşan hibrit bir sistem gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada doğru akımın üretimi, dağıtımı ve elektrikli cihazlarda tüketimi üzerinde yoğunlaşmıştır. Mikro DC dağıtım sistemlerinin gelecekte yaygın olarak kullanılacağı öngörülerek, konut içerisinde doğru gerilim ile çalışan cihazlar seçilmiştir. DC/AC invertere ihtiyaç duyulması, bazı harmonikler içermesi, enerji kaybı, hem boyutun hem de maliyetin artması ve enerji kalitesinin azalması gibi problemleri önlemek için çalışmada doğru gerilim kullanılmıştır. Rüzgar enerjisi ile üretilen alternatif gerilim de doğru gerilime çevrilmiştir. Aynı konut için yapılan farklı bir çalışmada [17], yakıt pili-güneş panelleri ve bataryadan oluşan hibrit bir enerji sisteminin elektriksel enerji analizi yapılmıştır.

Elektriksel ölçüm sonuçları sistemde kompanzasyona gerek olmadığını göstermiştir. Fakat özellikle motorların ve pompaların kullanıldığı sistemlerde kompanzasyon ihtiyacı belirlenmeli ve uygun kondansatör grupları seçilmelidir. Ayrıca uzun hatlarda gerilim düşümünü engellemek için teçhizat kablolarının doğru seçilmesi gereklidir. Bu sistem için ekserji analizinin yapıldığı farklı bir çalışmada [18], tüketicilerden gelen farklı taleplere göre güç üretimi ve verim hesaplanmıştır. Ayrıca, kurulan bu güneş pili-yakıt pili hibrit sisteminin tasarımı ve ekserji analizi de yapılmış, çalışma durumları ve enerji yönetimi incelenmiştir.

Colson ve Nehrir [19], SOFC ve bataryalar kullanarak, 500 evden oluşan bir sitenin hem elektrik hem sıcak su ihtiyacını karşılamak için, 1 MW'lık bir kombine ısı ve güç sistemi tasarlamışlardır. Matlab-Simulink ile modellenen bu çalışmada, her mevsim için, gün içerisinde konutun güç ihtiyacı ve sıcak su kullanımı data analizi ile elde edilerek, aktif ve reaktif güç değişimleri, sıcak su kapasitesi ve sıcak su talebinin günlük değişimleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, SOFC'nin ısı çıkışından sadece sıcak su temini için yararlanılmıştır.

Rohandel ve Seyedin tarafından geliştirilen yakıt pili-güneş pili sisteminde [20]; PEM elektrolizör, hidrojen tankı ve bataryalar kullanılarak, yakıt pili-güneş pili ve bataryalar için günlük güç zaman eğrileri elde edilmiş ve yakıt pili sisteminin performansını iyileştirmek için modelleme yapılmıştır. Scrivano vd. tarafından yapılan benzer bir çalışmada [21], PEMFC-güneş pili hibrit sisteminin deneysel sonuçları, LabVIEW kullanılarak elde edilmiştir. Farklı bir çalışmada ise [22] PEM tipi bir elektrolizörün özellikleri verilerek, şebeke bağlantılı ve şebeke bağlantısız sistemlerdeki çalışma şartları incelenmiştir. Li vd. tarafından yapılan bir çalışmada ise [23], üç tip bağımsız güneş pili sistemi (güneş pili-batarya, güneş pili-yakıt pili, güneş pili-yakıt pili-batarya), farklı enerji depolama teknolojileri kullanılarak modellenmiş ve optimize edilmiştir. Bu çalışmaların çoğunluğu sistemin modellemesine yöneliktir.

El-Sayed ve Obara tarafından yapılan bir çalışmada [24], SOFC ve PEMFC birlikte kullanılarak 30 konuttan oluşan şebeke bağlantılı 30 kW'lık bir kombine yakıt pili sistemi oluşturulmuştur. Konutlar için günlük ve aylık, güç ve sıcaklık değişimleri incelenmiştir. SOFC'nin çıkış ısısı ise ısı depolama tankında sıcak su temin etmek amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada güneş panellerinin sistemin verimine olan etkisi de incelenmiştir.

Hamada vd. [25], evsel uygulama için yakıt pili-güneş pili ve güneş kollektöründen oluşan şebeke bağlantılı hibrit bir sistem gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemler için elektriksel güç ve evsel sıcak su talebinin hesabı üzerine çalışmışlardır. PEM yakıt pilinde, yakıt olarak nitrojen ve doğal gaz kullanılmıştır. Sistemde teorik sonuçlarla birlikte deneysel sonuçlar da elde edilmiştir. Geleneksel sistemler ile karşılaştırıldığında bu sistem, birincil enerji tüketimini önemli ölçüde azaltabilmeyi başarmıştır. Sistemin birincil enerji tüketimini minimize etmek için yakıt pili, güneş pili ve solar kollektörlerin optimum kapasiteleri benzetim sonuçlarından elde edilmiştir.

Literatürde evsel uygulamalar için rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve yakıt pillerinin bir arada kullanıldığı çeşitli pratik çalışmalar ve modellemeler de mevcuttur [26, 27]. Rüzgar türbini, hidrolik türbinler, güneş pili ve PEM yakıt pilinden oluşan bir yenilenebilir enerji sistemi kurularak, sistemde kullanılan elemanlar ile hem elektriksel hem de termal güç elde edilmiştir. Yapılan projede üretilen 15 kW'lık elektriksel ve 38 kW'lık termal gücün herhangi bir uygulama alanında kullanılabilirliği gösterilmemekle birlikte, evsel uygulamalar için uygun olduğu belirtilmiş ve şebekeyle paralel çalışması düşünülmüştür. Ayrıca sistem Matlab-Simulink'te modellenerek, elde edilen sonuçlar LabVIEW arayüzü ile değerlendirilmiştir [26].

Santarelli vd. tarafından yapılan bir çalışmada [28], yıllık 3 MW'lık elektrik ihtiyacını karşılayabilecek, şebekeden bağımsız çalışan ve üç farklı yenilenebilir enerji kaynağı (güneş pili-yakıt pili, mikrohidro-yakıt pili, rüzgar-yakıt pili) kullanan bir sistemin tasarımı ve analizi yapılmıştır. Sistemde yakıt pili türü olarak PEM kullanıldığı için, sistemin çıkış ısısı düşük kalmış ve herhangi bir ısı dönüştürücü sistem kullanılmamıştır.

Shahnia vd. [29] güç kalitesini iyileştirmek için PEM yakıt pili, güneş paneli, dizel generatör ve batarya kullanan şebeke bağlantılı bir hibrit sistem üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Farklı bir çalışmada ise [30] SOFC ve güneş panelleri ile birlikte kullanılan inverterlerin mikro şebeke sistemleri için kontrol stratejilerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Her iki sistem modellenirken PSCAD-EMTDC yazılımından faydalanılmıştır.

Fargali vd. [31] bir jeotermal ısıtma sistemi modellemişlerdir. Bu modelde üç farklı binada (okul, ev, hastane) elektriksel yükleri beslemek için güneş, rüzgar ve jeotermal enerji kaynakları kullanılmıştır. Güneş ve rüzgar enerjisinden elde edilen elektrik enerjisiyle pompalar çalıştırılarak, binalara sıcak su temin edilmiştir. Jeotermal enerjiden, sadece sıcak su ve ısı temini için yararlanılmıştır. Sistem yakıt pili içermemektedir.

Jalizadeh vd. [32] şebekeden uzak bölgeler için güneş pili-PEM yakıt pili üretim sisteminin benzetimini ve maliyet optimizasyonunu yapmışlardır. Bu hibrit enerji sistemi önemli olmakla beraber, sadece benzetime yönelik bir çalışmadır.

Stewart vd. tarafından yapılan bir çalışmada [33]; bulanık mantık kontrol sistemi ve adaptif kontrol stratejileri kullanılarak şebekeden çekilen enerji maliyetini azaltmak için, güneş-yakıt pili ve batarya grubundan oluşan evsel uygulamalar için hibrit bir sistem tasarlanmıştır. Bu çalışmada batarya gerilimi ve yük akımının zamana göre değişimleri ile yakıt pilinin gerçek ve referans akım değişimleri elde edilmiştir. Benzer bir çalışmada [34], güneş ışıınımı tahmini için yapay sinir ağı modeli kullanılarak, elektroliz yoluyla üretilen hidrojen ve yakıt pilinin ürettiği enerji ile birlikte şebekeden alınan ve şebekeye verilen enerji değerleri elde edilip grafiksel olarak incelenmiştir. Bu çalışmalar, yakıt pili çıkış sıcaklığının değerlendirilmesine yönelik olarak herhangi bir teknik veya yöntem içermeyen ve deneysel olmayan, sadece benzetime dayalı çalışmalardır.

SOFC tabanlı entegre sistemler için farklı konsept ve stratejileri araştıran bir çalışmada [35], SOFC-PEMFC, SOFC-CHP ve SOFC-güneş pili sistemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle SOFC'nin çıkış sıcaklığının değerlendirilmesine yönelik tasarım bilgileri de çalışmada bulunmaktadır. Çalışmalar teorik olarak detaylı bir şekilde incelenmiş olmasına rağmen önerilen sistemler pratik olarak gerçekleştirilmemiştir. Erdinç ve Uzunoğlu [36], PEMFC tabanlı hibrit bir sistemin uygulama alanları, tasarımı, enerji yönetim yaklaşımları ve kontrol tekniklerini anlatan detaylı bir çalışma yapmışlardır. Özellikle dağıtık üretimde (distributed generation), araçlarda ve taşınabilir cihazlardaki önemli avantajlarından dolayı PEM yakıt piline dayalı hibrit bir sistem oluşturmuşlardır. Bu çalışmada, benzetimden ziyade sistem tasarımları ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

Shabani ve Andrews [37], bir güneş pili-yakıt pili sisteminde CHP ünitesi kullanılması halinde, 500 W'lık bir yakıt pilinin ısı ve güç üretim performansını incelemişlerdir. Bu çalışmada geliştirilen güneş pili-yakıt pili benzetim modelinde, şebekeye uzak bir konutun sıcak su ve elektrik ihtiyacını tahmin etmek için deneysel sonuçlar kullanılmıştır. Sistemde yakıt pili türü olarak PEM yakıt pili seçilmiştir. PEM yakıt pilinin çıkış sıcaklığı SOFC'ye göre oldukça düşük olmasına rağmen, bu sisteme CHP ünitesi de eklenerek % 35-50 arasında değişen verim değeri ortalama % 72'ye çıkarılmıştır.

Ahmed vd. [38] şebekeden bağımsız çalışan sistemler için rüzgar türbini, güneş pili ve PEM yakıt pilinden oluşan bir sistemin çıkış enerjisini maksimum yapan ve çıkış

gerilim dalgalanmalarını azaltan ve şebekeye yüksek kalitede enerji sağlayan hibrit bir sistem model benzetimi yapılmıştır. PEM yakıt pilinin kullanıldığı bu sistemde kombine ısı ve güç sistemleri kullanılmamıştır.

Jain vd. tarafından yapılan çalışmada [39], 1,2 kW'lık PEM yakıt pili kullanılarak, şebeke bağlantılı bir yakıt pili güç sistemi, Matlab-Simulink'te modellenmiştir. Bu sistemde sadece yakıt pili sisteminin analizi yapılmış olup, farklı kaynaklar kullanılmamıştır. Ganguly vd. [40] bir sera için güneş pili, PEM yakıt pili ve elektrolizörden oluşan bir güç sisteminin modellenmesini ve analizini yapmışlardır. Her iki çalışma da PEM yakıt pilinin açığa çıkardığı ısıнын kullanılmadığı, modellemeye yönelik benzetim çalışmasıdır.

Mahlia ve Chan [41] ise Malezya'da tesis edilmiş yakıt pilli kullanan, şebekeden bağımsız, kojenerasyon sistemi için fizibilite çalışması yapmışlardır. Konutun saatlik ortalama elektriksel ve termal yükünü belirlemek için Homer yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, yakıt pilinden üretilen elektriğin kullanımını optimize eden bataryalı ve bataryasız sistem model benzetimi yapılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, kojenerasyon sistemleri ile birincil enerji kullanımı %30-40 oranında azaltılabilmektedir. Ayrıca suyun ısıtılması için kullanılan elektriğin %14'lük kısmı da geri kazanılmaktadır.

Maclay vd. [42] ise Kaliforniya'da altı kişilik bir ailenin evsel güç talebini belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmanın verilerini toplamak için LabVIEW yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca, yakıt pili-güneş pili sistemlerinin şebekeye bağlı olup olmama durumları için maliyet analizi yapılmıştır.

Son zamanlarda, evsel uygulamalar için birçok şirket yakıt pili sistemleri geliştirmektedir. Plug Power Şirketi, şebekeye bağlı olmayan tek bir konut için 7 kW'lık bir PEMFC geliştirmiştir. Energy Partners Şirketi ise şebekeye bağlı evsel uygulamalar için 3 kW'lık PEMFC geliştirdiğini duyurmuştur. Toyota Motor Firması, sabit yakıt pillerinin karbondioksit kullanımını azaltan yakıt pili kojenerasyon ünitesini evsel kullanım için geliştirmiştir. 5-10 kW'lık kapasiteye sahip birçok yakıt pili, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız çalışabilme özelliğine sahiptir [41].

Güneş enerjisi sistemleri üzerine literatürde yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur ve güneş pillerinin seri üretimi sayesinde, güneş enerjisinden yararlanma oldukça yaygınlaşmıştır. Yakıt pili sistemleri ve uygulama alanları ile ilgili çalışmalar da son yıllarda hız kazanmıştır. Evsel yakıt pili sistemlerinde, PEMFC daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü SOFC'ye göre hem daha ucuzdur, hem de uygulama alanı daha

fazladır. Ancak büyük güçlü uygulamalarda ve kombine ısı ve güç sistemlerinde yüksek sıcaklığından dolayı SOFC tercih edilmektedir. Son yıllarda bir alternatif olarak, yüksek sıcaklıklı PEM yakıt pilleri de geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır.

Literatürden görüldüğü gibi, son yıllarda yakıt pillerinin evlerde kullanımı üzerine yapılan birçok çalışma vardır. Bu çalışmaların çoğunda kombine ısı ve güç sistemleri de yakıt pilleri ile birlikte incelenmiştir. Ancak evsel yakıt pilli kombine ısı ve güç sistemleri için, hem sistemin toplam maliyetini azaltmak, hem de verimi arttırmak için çalışmalar devam etmektedir.

1.3. Tez İçeriği

Bu tez çalışması, 5 ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde; yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi vurgulanarak, yakıt pilleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Daha sonra tezin amacı belirtilmiş, yakıt pilleri ve hibrit sistemler ile ilgili literatür taraması yapılarak konu hakkında kısa bir özet verilmiştir.

İkinci bölümde, yakıt pillerinin genel yapısı ve çalışma prensibi ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. Yakıt pili türleri kısaca incelenerek, PEMFC daha detaylı anlatılmıştır. Ayrıca yakıt pilinin uygulama alanları alt başlıklarla ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

Üçüncü bölümde, PEM yakıt pilinin matematiksel ve dinamik modellerinin nasıl oluşturulduğuna dair bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, evsel uygulamalar için bir yakıt pili-güneş pili sistemi tasarlanmış ve bu sistemin benzetimi yapılmıştır. Sistemde kullanılan tüm elemanların matematiksel denklemleri verilerek Matlab-Simulink'te benzetimi yapılmıştır. Geliştirilen bu sistemin farklı yükleri besleme durumu için yük analizi yapılmıştır.

Beşinci bölümde, laboratuvar ortamında kurulan bir güneş pili yakıt pili sisteminin prototipi hakkında bilgi verilmiştir. Geliştirilen hibrit sistemin ana elemanlarını güneş pili, yakıt pili, elektrolizör, konverterler, inverter ve kontrol devresi oluşturmuştur. Sistem farklı yüklerde çalıştırılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, hibrit sistemin benzetimi de yapılarak benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde, gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ileriiki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi tarafından FÜBAP- MF.12.17 nolu proje ile desteklenmiştir.

2. YAKIT PİLLERİ VE UYGULAMALARI

2.1. Yakıt Pilinin Yapısı ve Çalışması

Bir yakıt pili, negatif yüklü anot, pozitif yüklü katot ve bir elektrolit membrandan oluşur. Bir yakıt pilinde özetle hidrojen anot üzerinde oksitlenir, oksijen ise katot üzerinde indirgenir. Protonlar anottan katota elektrolit membran içinden geçerek transfer edilir. Elektronlar ise dış devre üzerinden katota taşınır.

Doğada, moleküller iyonik bir durumda kalamaz, bu yüzden hemen nötr duruma geri dönmek için diğer moleküllerle hızlı bir şekilde yeniden birleşirler. Yakıt pilindeki hidrojen protonları özel maddelerin kullanımı ile molekülden moleküle transfer edilerek iyonik durumda kalırlar. Protonlar bir teflon omurgası ile birlikte persülfonik asit gruplarından oluşan bir polimer membran içine doğru ilerlerler. Elektronlar ise iletken malzemeye doğru çekilir ve ihtiyaç durumunda da yüke doğru hareket ederler. Oksijen, katot üzerinde proton ve elektronlarla reaksiyona girer. Reaksiyon sonucunda su oluşur ve ısı üretilir. Elektrokimyasal süreci hızlandırmak için hem anot hem de katot birer katalizör içerir. Yakıt ve oksidan herhangi bir noktada karışmaz ve gerçek bir yanma meydana gelmez.

Yakıt hücreleri öncelikle elektrolit malzemesine göre sınıflandırılırlar. Elektrolit malzeme seçimi de yakıt hücresinin çalışma sıcaklığını etkiler. Ayrıca Polimer Elektrolit Membranlı olarak bilinen PEMFC en popüler yakıt pili türüdür ve genellikle yakıt olarak hidrojen kullanılır. PEM yakıt hücreleri; hidrojenden etanole ve biyokütleden türevli malzemelere kadar değişen birçok yakıt seçeneğine sahiptir. Bu yakıtlar doğrudan yakıt hücresini besleyebilir ya da saf hidrojen açığa çıkarmak için bir dönüştürücüye gönderildikten sonra kullanılabilirler [43].

Bir yakıt pili, bir yakıt kaynağı gerektiren bataryalardan farklı olarak elektrokimyasal bir makina gibidir. Yakıt sağlandığı sürece yakıt pilleri, şayet nemlendirme ve soğutma sistemleri iyi düzenlenirse, temiz, sessiz ve güvenilir güç sağlarlar. Katı oksit ya da fosforik asit gibi birçok yakıt pili türleri gelişim sürecindedir. Yakıt pili türleri arasındaki farklılık kullanılan elektrolit (transfer edilen iyon) ve çalışma sıcaklığına bağlıdır. Tablo 2.1’de yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları verilmiştir.

Tablo 2.1. Yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek çalışma verimine sahiptir.	Maliyeti yüksektir.
Yakıt piline gerekli yakıtı sağlamak için birçok kaynak ve metot vardır.	Yakıt dönüştürme teknolojisi maliyetli ve sıkıntılı olabilir ve çalışması için güç gerektirebilir.
Yakıt pilleri oldukça ölçeklenebilir bir tasarıma sahiptir.	Katalizör indirgemelerinden dolayı zamanla performansı azalır.
Yakıt pilleri sağlığa zararlı madde üretmez.	
Yakıt pilleri çok bakım gerektirmezler.	
Yakıt pilleri bataryalar gibi şarj gerektirmezler.	

Hidrojen, difüzyon tabakası içinden yayılarak anotun besleme kanallarına doğru akar ve elektron ile protonları açığa çıkarmak için okside olduğu katalitik tabakaya ulaşır. Açığa çıkan elektronlar katalitik tabakaya doğru uzanır ve dış devre aracılığıyla katota ulaşır. Protonlar ise katot katalitik tabakasına membran içinden transfer edilir. Aynı zamanda, oksijen katotun besleme kanallarına enjekte edilir ve difüzyon tabakası içinden proton ve elektronlarla reaksiyona girip su oluşturduğu katalitik tabakaya doğru yayılır (Tablo 2.2) [43].

Tablo 2.2. Anot ve Katot için elektrokimyasal yarı reaksiyonlar

Birim	Reaksiyon
Anot	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
Katot	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Toplam	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

2.2. Yakıt Pili Türleri

Yakıt pillerinin, 1839 yılında Sir William Grove tarafından icadından itibaren, çeşitli tiplerde yakıt pilleri geliştirilmektedir. Literatürde birçok sınıflandırma olmasının sebebi yakıt pili sistemlerinde yakıt ve elektrolit türü, çalışma sıcaklığı, birincil ve rejenerasyon sistemleri ve doğrudan ya da dolaylı sistemler gibi çok sayıda değişkenin var olmasıdır.

Yakıt pilleri atık olarak su ve ısı oluşturarak, oksijen ve hidrojen arasındaki elektrokimyasal bir reaksiyon ile elektrik üretme ilkesine dayanırlar. Yakıt pillerinin çoğu,

oksijeni havadan temin edebilirler. Yakıt pilleri ya saf hidrojeni ya da hidrokarbon veya diğer yakıtlardan elde edilen reforme hidrojeni kullanırlar. Tablo 2.3. kullanılan elektrolit, çalışma sıcaklığı ve elektrot reaksiyonlarına göre yakıt pillerinin çeşitli türlerini listelemektedir [43].

Yakıt pilleri elektrokimyasal bir reaksiyon sonunda kaliteli ve sürekli elektrik enerjisi üretirler. Havadaki oksijen ve yakıt olarak da hidrojen sağlandığı sürece kesintisiz olarak çalışmaya devam ederler [44]. Üretim ve malzeme fiyatları gibi pratik konuların dışında, yakıt pillerinin teknik iki temel problemi vardır. Bunlar; düşük güç ve akıma yol açan yavaş reaksiyon oranı ve hidrojenin hazır kullanılabilir bir yakıt olmamasıdır. Bu problemleri çözebilmek için, farklı yakıt pili türleri geliştirilmiştir. Farklı yakıt pili türleri genellikle kullanılan elektrolite göre birbirinden ayrılırlar. Bununla beraber başka önemli farklılıklar da vardır [1].

Yakıt pilleri çalışma sıcaklıklarına göre üçe ayrılırlar:

1. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (0-100 C⁰)
2. Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (100-500 C⁰)
3. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri (500-1000 C⁰)

Kullandıkları elektrolite göre ise altı farklı yakıt pili türü vardır:

1. Proton değişim membranlı yakıt pili (PEMFC)
2. Doğrudan metanol kullanan yakıt pili (DMFC)
3. Alkalın yakıt pili (AFC)
4. Fosforik asit yakıt pili (PAFC)
5. Erimiş karbonat yakıt pili (MCFC)
6. Katı oksit yakıt pili (SOFC)

En çok kullanılan sınıflandırma şekli kullanılan elektrolite göre yapılan sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmadaki yakıt pili tipleri ile ilgili temel bilgiler Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3. Yakıt pili türlerinin karşılaştırılması [7]

	PEMFC	DMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolit	Katı polimer membran	Katı polimer veya sıvı alkalın	KOH	Sıvı fosforik asit	Sıvı erimiş karbonatlar	Y ₂ O ₃ içeren zirkonya
Çalışma Sıcaklığı	80 °C	50 °C– 90 °C	65 °C – 220 °C	150 °C – 220 °C	650 °C	600 °C– 1000 °C
Katalizör	Platinyum	Pt veya Pt/Ru	Platinyum	Platinyum	Nikel	Perovskites
Anot gazı	Hidrojen	Su içinde metanol	Hidrojen	Hidrojen	Hidrojen, metan	Hidrojen, metan
Katot gazı	Saf oksijen veya hava	Havadan oksijen	Saf oksijen	Havadan oksijen	Havadan oksijen	Havadan oksijen
Isı yönetimi	Soğutucu	Soğutucu	Soğutucu-koj.	Kojenerasyon	Kojenerasyon	Kojenerasyon
Verim	% 35-60	% 35-40	% 50-70	% 35-50	% 40-55	% 45-60
Diğer Özellikler	Elektrolitin katı olması ve düşük sıcaklıkta çalışması avantajlarıdır.	Yakıtın elektrik üretmeden anottan katoda geçiş problemi vardır.	Hidrojen ve oksijenle iyi performans gösterir.	Performansı AFC'den düşüktür.	Pil yapısı için paslanmaz çelik gerekir. Pahalı metaller gerekmez.	Materyaller arasında ısıl genleşme oranısızlıkları oluşabilir.

PEM yakıt pilleri en popüler yakıt pili türüdür ve bu yakıt pili türünde genellikle yakıt olarak hidrojen kullanılır [7]. PEM yakıt pilleri oldukça düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Bu pillerde düşük sıcaklıktan kaynaklanan yavaş reaksiyon oranı problemi, nitelikli katalizörler ve elektrotlar kullanılarak çözülmüştür. Bu pillerde kullanılan katalizörlerden biri platindir. Ancak son yıllardaki gelişmelerle, çok az miktarda platin kullanılmaktadır. Hidrojen temin etme problemi, hidrojeni sağlamanın çeşitli yolları mümkün olmasına rağmen tam olarak çözülememiştir. Bu yakıt pilinde oldukça saf hidrojen kullanılması gerekmektedir.

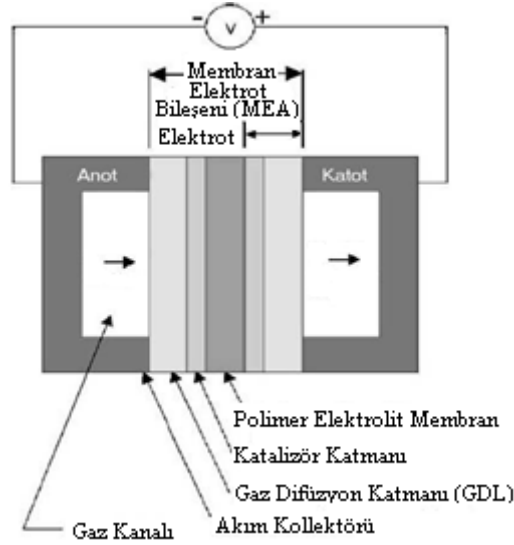
Hidrojen temin etmede, yakıt olarak oldukça kullanışlı ve akıcı bir yakıt olan metanol kullanmak teorik olarak da cazip bir çözümdür. Bu piller doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri (DMFC) olarak adlandırılmaktadırlar. Bu pillerin adındaki doğrudan kelimesinin sebebi, metanolden hidrojen elde etmek yerine, yakıt olarak sıvı formda metanolün kullanılmasıdır. Ancak bu piller çok düşük güce sahiptirler. Bu piller, yakın gelecekte, çok düşük güçlü, uzun periyotlar boyunca elektrik tüketiminin yavaş ve sabit olmasını gerektiren uygulamalarda kullanılabileceklerdir.

Her bir yakıt pili türü bazı problemlere çözüm üretir, fakat yeni zorlukları da beraberinde getirir. Katı oksit yakıt pili (SOFC) 600 °C- 1000 °C bölgesinde çalışır. Bu sıcaklık, yüksek reaksiyon oranının pahalı katalizörler olmadan da başarılabildiği anlamına gelir. Doğal gazlar ve benzeri gazlar da ayrı bir üniteye ihtiyaç göstermeden, doğrudan veya yakıt pili içinde düzenlenmiş olarak kullanılabilirler. Bu yakıt pili, böylece reaksiyon oranı ve yakıt problemlerini çözer ve yakıt pili kavramının tabiatındaki basitliğin tüm avantajlarını kullanır. Bununla beraber, seramik materyallerden yapılan bu pillerin incelenmesi zordur ve imalatları pahalıdır. SOFC 1000 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda çalıştırılmasına rağmen daima katı halde bulunur. Bu durum erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC) için geçerli değildir. MCFC, çalışması için havadaki karbondioksit gereksinim duymak gibi ilginç bir özelliğe sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda, oldukça ucuz bir katalizör olan nikel kullanılarak iyi bir reaksiyon oranı elde edilebilmektedir. SOFC gibi MCFC de metan ve kömür gazı (H_2 ve CO) gibi gazları bir dış düzenleyici olmadan doğrudan kullanabilir [1].

2.3. PEM Yakıt Pili

PEM yakıt pili aynı zamanda katı polimer yakıt pili olarak da adlandırılır. Bu yakıt pili; ilk olarak 1960'lı yıllarda ABD'de NASA tarafından ilk insanlı uzay araçlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir [1]. PEM yakıt pilinin ilk versiyonları NASA Gemini uzay aracında kullanılanlar gibi sadece yaklaşık 500 saatlik bir ömre sahipti. Fakat bu ömür, sınırlı ilk görevler için yeterliydi. Son yıllardaki gelişmeler, büyük oranda platin kullanımını azaltırken, aynı zamanda akım yoğunluğunu 1 A/cm^2 veya daha büyük değerlere kadar getirmiştir. Bu gelişmeler sayesinde kW başına düşen maliyet azalmakta ve güç yoğunluğu artmaktadır. PEM yakıt pili; güçlü mobil telefonlar ve bilgisayarlar gibi diğer elektronik teçhizatlar için birkaç W'a, ev sistemleri için birkaç kW'a, arabalar için 10 kW'a, otobüsler ve endüstriyel kombine ısı sistemleri için 100 kW'a kadar güç sağlayabilirler.

Tipik olarak bir PEM yakıt pili Şekil 2.1'de gösterildiği gibi bir polimer elektrolit membran, elektrik iletken gözenekli gaz difüzyon katmanı, membran ve difüzyon katmanı arasında bulunan katalizör ve akış kanalları vasıtası ile yakıt ve oksitleyiciyi reaksiyon bölgesine ulaştıran grafit yapılı akış alanı plakalarından oluşmaktadır [45]. Elektroliti iyon geçişli bir polimerdir. Anot-elektrolit-katod grubu bir adettir ve çok incedir. Bu zar elektrot grupları genellikle iki kutuplu levhalar kullanılarak sırayla bağlanmışlardır. Polimerlerin kullandığı hareketli iyonlar; bir H^+ iyonu veya protonudur. Böylece pilin temel çalışması asit elektrolit yakıt pili ile esas itibarıyla aynıdır [1]. Hidrojen anot kısmına verilir ve burada katalizörün yardımıyla hidrojen iyonlarına (protonlara) ayrılır ve elektronlar serbest bırakılır. Elektronlar dış çevrim vasıtasıyla katot tarafına geçerken elektrik enerjisi olarak kullanılabilir. Daha sonra protonlar membran üzerinden katot tarafına geçerler, burada hidrojen atomları ile birleşerek su oluşur ve çevrim tamamlanır.



Şekil 2.1. PEM yakıt pili ve bileşenleri [7]

PEM yakıt pili sistemi adını kullanılan elektrolit türünden alır. Bu elektrolit türü, membranın uygun olarak sulu olması halinde yüksek proton iletkenliğine sahip olan bir polimerik membrandır [1]. Bir yakıt pili, bir yakıt kaynağına ihtiyaç duyan bataryalardan farklı olarak elektrokimyasal bir motordur. Yakıt sağlandığı sürece, nemlendirme ve soğutma sistemleri de iyi ayarlanmışsa, yakıt pilleri temiz, sessiz ve güvenilir bir güç sağlarlar. Temel olarak bir PEM yakıt pili, proton değişim zarlı bir membran (PEM), katalist ve gaz difüzyon tabakaları, akış alan tabakaları ve uç tabakalardan oluşur. Gerçek bir yakıt pili tabakaları ise PEM, gaz difüzyon ve katalist tabakalarıdır. Bu tabakalar, çeşitli işlemler kullanılarak birbirine sıkıştırılmıştır ve membran elektrot düzeneği olarak adlandırılır. Birçok hücreden oluşan bir yığın, bipolar akış alan plakaları ve sadece bir set uç plakaları arasına sıkıştırılmış membran elektrot düzeneğine sahiptir.

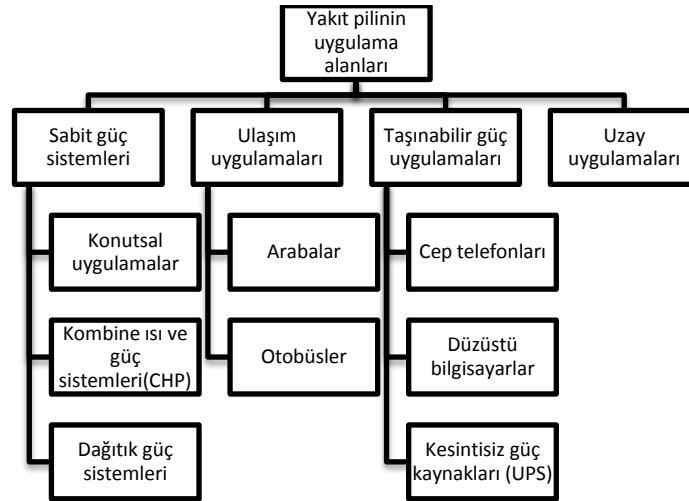
Tipik olarak suyun kaynama noktasının altında çalışan PEM yakıt pili yığınları, hidrojen ve oksijenin reaksiyonundan elektrik, su ve ısı üretmek için kimyasal enerjiyi kullanırlar. Bir PEM yakıt pili yığını; elektriksel olarak seri halde birleştirilmiş çok sayıda yakıt pillerinden oluşur [43].

Polimer elektrotlar, bir PEM yakıt pilini hızlıca başlatabilecek düşük sıcaklıklarda çalışırlar. Bu durum bu tip yakıt pilleri için bir üstünlük sağlar. Zar elektrot grubunun inceliği; yoğun yakıt pillerinin yapılabildiği anlamına gelir. Aşındırıcı akıcılara sahip olmaması ve pilin herhangi bir çevre şartında çalışabilmesi PEM'in diğer avantajlarıdır. Bu

durum, PEM yakıt pilinin özellikle araçlar ve taşınabilir uygulamalar için uygun olduğu anlamına gelir.

2.4. Yakıt Pillerinin Uygulama Alanları

Yakıt pili teknolojisi, güç talebine göre oldukça geniş bir uygulama alanında kullanılmaktadır. Yakıt pillerinin birkaç W'lık sistemlerden birkaç MW'lık sistemlere kadar geniş bir aralıkta kullanılabilir olması, yakıt pilene özgün bir özelliktir. Yakıt pili uygulamaları mobil veya sabit uygulamalar olarak sınıflandırılabilir. Mobil uygulamalar öncelikle ulaşım sistemleri ve taşınabilir elektronik cihazları kapsarken sabit uygulamalar ise evsel ve ticari taleplere göre kombine ısı ve güç sistemlerini içermektedir [46]. Yakıt pillerinin uygulama alanlarının sınıflandırılması Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yakıt pillerinin uygulama alanlarının sınıflandırılması

Ayrıca yakıt pillerinin askeri, dış aydınlatma, bisikletler, tekerlekli sandalyeler gibi bu bölümde bahsedilenler dışında farklı uygulamaları da vardır. Küçük ölçekten büyük ölçeğe kadar farklı pazarlama alanları için yakıt pillerinin uygulama örnekleri genişletilmektedir.

2.4.1. Sabit Güç Sistemleri

Sabit güç üretimi; 1 kW ile birkaç MW aralığındaki evler, işyerleri, okullar, hastaneler vb. yerlerdeki uygulamaları içermektedir. Bu yerler, genellikle merkezi üretim ile beslenmektedir. Sabit uygulama bölgeleri için kullanılan diğer bir teknik ise hidrojen türbinlerinin istihdamıdır [47]. Sabit yakıt pili sistemleri; şehir ve kasabalar için bağımsız güç santralleri, binalar için dağıtık üretim, uzak bölgeler için güç üretimi ve kojenerasyon uygulamaları için kullanılmaktadır.

Yakıt işlemcili sabit PEM yakıt pili sistemlerinin kontrolü, yakıt işletim sistemi eklenen hidrojenli PEM yakıt pili sistemlerinden daha zordur. Yakıt işletim sistemi, yakıt pili yığını için gerekli reaksiyon aşamalarının fazlalığından dolayı büyük bir alt sistemdir. Yakma işlemi, genellikle üç farklı yolla yapılır. Bunlar; katalizör kısmı oksidasyonu, katalizör buhar reformasyonu ve oto termal reformasyonudur. Membran ayırma kullanılarak reaksiyon-ayırma sistemlerini ve entegre edilmiş işlevselliği sağlayan reaktör tasarımları, yakıt işletim sistemi karmaşıklığını azaltmak için geliştirilmektedir [48].

Yakıt pillerinin gelecekte nasıl bir rol alacağı, ekonomik verimliliğin ve emisyonların ne kadar azaltılacağına bağlı olarak gelişecektir. Yakıt pilinin ömrü ve yakıt pili sisteminin maliyeti, CHP sistemleri için yakıt pili teknolojisinin kullanılmasında belirsizlikler doğurmaktadır. Yakıt pili teknolojisinin ticarileştirilme başlangıcını kolaylaştırmak için yüksek yatırımları haklı çıkaran avantajlara sahip olduğunu ilgili pazarlarda göstermesi gerekir [49, 50].

2.4.1.1. Evsel Uygulamalar

Evsel yakıt pili sistemleri, konutun temel ya da yedek gücünü sağlamak için kullanılabilir. Mevcut şebekeye paralel olarak bağlanabilirler veya bağımsız olarak çalışabilirler. Normal bir soğutucu kadar yer kaplayan ve temiz, sessiz ve emniyetli bir güç sağlayan evsel bir yakıt pili güç sistemi, konutun bodrum katına ya da bahçeye yerleştirilebilir. Evsel yakıt pili sistemleri yaklaşık 5 kW'lık güç veya günlük 120 kWh'lık enerji üretebilirler.

Yakıt pillerinin farklı şartlar altında gösterdiği yetersiz performans, hızla gelişen yeni teknolojiler arasında yakıt pillerinin de yer almasını geciktiren faktörlerden biridir. Yine de şu anda evsel yakıt pilleri üzerine çalışan pek çok şirket vardır. Evsel yakıt pili sistemleri

gelişiminde çözüm bekleyen sorunlar da vardır. Bu sorunlar, yakıt dönüştürücü sorunları, maliyet, ısınma süresi, hidrojenin depolanması ve taşınması, hidrojenin ekonomik üretilmesi ve kojenerasyon sistemleridir.

Bir konutun enerji tüketimi, elektriksel ve termal olarak ikiye ayrılabilir. Bir evin enerji talebi, yapı malzemelerinin tiplerinin ve malzemelerin atmosferden ısı transfer etme kabiliyetlerinin doğrudan doğruya bir fonksiyonudur. Konutlar için verimli bir enerji tasarımına sahip olmak çok önemlidir. Çünkü verimli bir tasarım, hem evin enerji talebini azaltacak, hem de hidrojen üretim ve kullanım sistemi konfigürasyonlarının ekonomik bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olacaktır.

Hidrojen üretim ve kullanım sisteminin tasarımı için en uygun senaryo, ev için bir yıllık gerçek enerji talebi verilerini kullanmaktır. Eğer bu veriler mevcut değilse, o zaman evin saatlik elektriksel enerji talebi elde edilebilir. İlk önce, belirli bir yapı için kullanılan materyallerin fonksiyonu olarak ısıtma-soğutma yük talebi ve tasarım şartları tahmin edilebilir. Değişken yapılar için veriler ve materyaller (duvar yapısı, çatı, bodrum, kapılar, pencereler, binada oturan kişi sayısı vb.) çeşitli teknikler kullanılarak bulunabilir. Daha sonra, belirli bir yerin tasarım şartları kullanılarak, ev için tam bir ısı transfer katsayısı tahmin edilebilir. Bu ısı transfer katsayısı, ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak, evin saatlik elektriksel enerji talebini hesaplamak için kullanılabilir. Böylece bir hidrojen üretim ve kullanım sistemi tasarlanabilir ve sistemin performansı herhangi bir bölgede, belirli bir konut için tahmin edilebilir. Eğer konut şebekeye bağlı ise şebeke bir batarya ile karşılaştırıldığında kısa süreli depo olarak kolaylıkla kullanılabilir. Ancak, şebeke harici bir uygulama için bu durum geçerli olmayacaktır. Son zamanlarda, enerji verimli binaların tasarımı için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [51, 52].

2.4.1.2. Kombine Isı ve Güç Sistemleri

Yakıt pili teknolojisinin binalar, endüstriyel tesisler ve yedek generatörlerde elektrik ve ısıнын birlikte üretimi için kullanılması öncelikli sabit uygulamaya örnektir. Yakıt pili güç sistemlerinin boyutunun verimi etkilemiyor olmasından dolayı ilk sabit tesislerin gelişimi, birkaç yüz kW'tan düşük MW seviyesindeki kapasitelere kadar olan daha küçük tesisler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tesisler öncelikle doğal gaz ile beslenerek kendi kendine yetebilen sabit tesislerin nasıl işletildiği gösterilmiştir [53].

Küçük şirketler için binalarda elektrik ve ısı temini amacıyla yakıt pillerinin

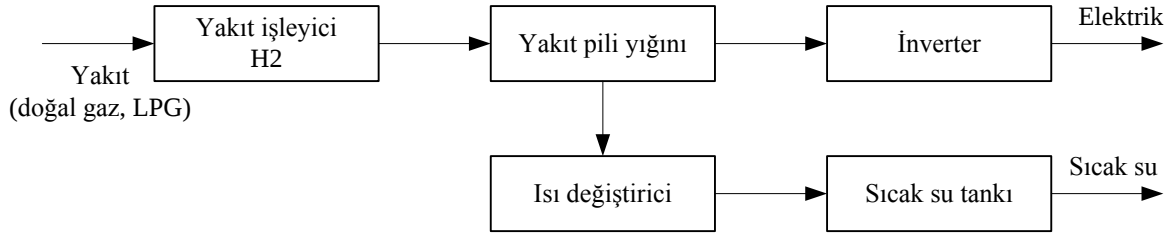
kullanımı önemli bir iş alanı haline gelmektedir. Bunun sebebi; yakıt pillerinin oldukça yüksek yakıt verimliliği, düşük gürültü seviyesi, geleneksel teknolojilere göre düşük bakım gerektirmesi ve mükemmel kısmi yük yönetimi gibi potansiyellere sahip olmasıdır. Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojen yakıtlı PEM yakıt pillerine dayalı bir kojenerasyon sisteminin küresel olarak emisjonsuz olması ilave avantaj olacaktır [54].

Yakıt pillerinin veriminin nispeten yüksek olması, çevreyle dost bir enerji üretimine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, bilhassa son tüketiciye yakın, merkezi olmayan sabit bir enerji kaynağı için uygundurlar. Son kullanıcı pazarı ise elektrik ve ısı talebine göre karakterize edilir. Böylece ısı ve güç üretilmesi ile enerji sağlanmasına uygun olur [49]. Enerji tasarruflu modern bir evin yeterli ısı ve elektriğini sağlamak üzere evsel uygulamalar için geliştirilen 7 kW'lık bir yakıt pili sistemi Şekil 2.3'te görülmektedir [55].



Şekil 2.3. Evsel uygulamalar için bir kombine ısı ve güç sistemi

CHP sistemleri otellerde, alışveriş ve iş merkezlerinde ve büyük binalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sistemler, şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak doğal gaz veya petrolden elektrik üretmek için tüketicilere seçenek sağlar. Şekil 2.4'te yakıt pillerini kullanan bir CHP sistemi gösterilmiştir. Evsel yakıt pili sistemleri genel olarak bir yakıt pili yığını, fosil bir yakıttan (doğal gaz, LPG veya gazyağı) hidrojen üretmek için yakıt işleyici, sıcak su tankı ve yedek su ısıtıcısından oluşurlar.



Şekil 2.4. Eysel ısı ve güç sistemi [8]

Yakıt pili sistemleri, binalarda CHP teknolojileri olarak kullanılabilirler. PEMFC ve SOFC, CHP sistemleri uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu sistemlerin toplam verimleri %30'dan daha düşüktür. Ayrıca, PEM yakıt pilinin çalışma sıcaklığının daha düşük olması, hidrojen gibi çok iyi geliştirilmiş yakıtların kullanımını gerektirir ve daha çok emilim olmasını veya su ısıtma teknolojileri için harcanan ısınn etkili kullanımını engeller. SOFC sistemlerinde, iç düzenlemeler ile birlikte halen yaygın altyapı kaynağına sahip bir yakıt olan doğal gaz ile doğrudan doğruya güç sağlanabilir. Ofisler, apartmanlar, hastaneler, yüzme havuzları, süper marketler gibi büyük evsel veya ticari yapılarda kullanılabilecek kombine bir sistem, yakın gelecek için ümit verici olabilecektir [56].

Günümüzde, mikro-CHP sistemleri için ticari olarak mevcut teknolojiler, motorlara ve türbinlere dayanmaktadır. İçten yanmalı motorlar, düşük sermaye maliyeti, büyük boyut aralığı, hızlı başlangıç kabiliyeti, nispeten yüksek elektrik dönüşüm verimi (büyük dizel sistemler için %43'e kadar), iyi çalışma güvenilirliği ile birlikte ispatlanmış bir teknolojidir. Dıştan yanmalı motorlar, güç üretmek için harici bir ısı kaynağı kullanırlar. Bu motorlar, 25 kW'dan daha az güce ihtiyaç duyulan güç uygulamaları için uygundur. Nispeten daha düşük elektriksel verime (%10) sahiptirler, fakat bir ısıtma sistemi ile birleştirildikleri zaman % 90'dan daha büyük sistem verimine ulaşabilirler.

Mikro türbinler; gaz-türbin teknolojisini daha küçük boyutlara ulaştırırlar. Özellikle gerekli olan sıcaklıktaki buhar, içten yanmalı bir motor tarafından üretilebilen buhardan daha yüksek olduğu zaman faydalıdır. 30-200 kW aralığındaki üniteler, tek aileli konutlar için oldukça büyük olabilir [57].

2.4.1.3. Dağıtık Güç Sistemleri

Dağıtık üretim (DÜ) sistemleri, genel olarak kullanıcının bir servis alanına yerleştirilen herhangi bir modüler teknoloji olarak tasarlanırlar. Hizmet maliyetini düşürmek için dağıtım veya yan iletim sistemine bağlanırlar. DÜ, dizel ve içten yanmalı motorlar, küçük gaz türbinleri, yakıt pilleri, güneş pilleri, bataryalar ve diğer depolama teknolojilerini kapsayan doğru bir terimdir [58].

Rüzgar türbini, fotovoltaiik paneller, mikro türbinler ve yakıt pilleri gibi küçük boyutlu güç üretim sistemleri, DÜ konseptini kullanan tüketici taleplerini karşılamak için önemli bir rol oynamaktadır. DÜ terimi; merkezi ya da uzaktan kontrol bölgelerinden ziyade tüketicilerin yanında yer alan küçük boyutlu bir üretim birimi anlamına gelmektedir. DÜ sistemlerinin en büyük faydası, uzun iletim ve dağıtım hatları boyunca kayıpları koruması, kurulum maliyetinin uygunluğu ve bölgesel gerilim regülasyonudur. Ayrıca, pik yük durumları süresince çalışan büyük bir ünite yerine daha küçük bir ünite ekleme özelliğine de sahiptir [47].

PEMFC sistemleri; oteller, ofisler, bakım evleri, hastaneler, okullar gibi birçok dağıtık merkezde yaygın olarak kullanılmaktadır [59]. Ayrıca, PEMFC teknolojisi tamamen güvenilir bir elektrik kaynağına ihtiyaç duyulan telekomünikasyon alanında da tercih edilmektedir [48]. Bu gibi durumlarda, PEMFC sistemi, tesise ilave elektriksel güç sağlamak için şebekeye bağlanır. Ayrıca, münferit ya da uzaktan kontrol edilen alanlarda ise elektrik üretmek için şebekenin bağımsız bir sistemi gibi kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde PEMFC ya bir ana güç kaynağı ya da bir yedek ünite olabilir [36].

Ballard Power firması tarafından geliştirilen prototip bir yakıt pilli dağıtık güç santrali Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Bu ünite, 250 kW’lık elektrik ve buna eşdeğer miktarda ısı üretmektedir. Bu enerji de yaklaşık 50 konutluk bir site ya da küçük bir hastane için yeterlidir. Bu ünite bir yakıt işlemci ile birleşerek yakıt olarak doğalgaz kullanabilir. Yakıt işlemci; doğalgazı, reformasyon işlemi ile başlıca hidrojen ve karbondioksitin birleşiminden oluşan hidrojen açısından zengin bir gaza dönüştürür [55].



Şekil 2.5. Yakıt pili kullanan bir dağıtık güç santrali

2.4.2. Ulaşım

Otomotiv uygulamalarında yakıt pili sistemlerinin kullanımı, sabit güç tesisleri ile kıyaslandığında tasarım açısından bazı sınırlamalar gerektirir. Yakıt pili sistemlerinin deneysel karakteristiği maksimum yığın performansı için öncelikle üretici firma tarafından tavsiye edilen çalışma şartları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [54].

Geleneksel enerji depolama sistemleri ile donatılmış elektrikli araçların sınırlarının olması, sıfır emisyon gibi önemli bir avantajı koruyarak yakıt ikmali süresini azaltabilen yeni çözümlerin araştırılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Özellikle, hidrojenli PEM yakıt pilleri yeni tahrik sistemleri için gelecek vaat eden bir çözüm olarak önerilmiştir [60-62].

Hidrojen kullanımının bir araç içerisindeki bağlantı zorluklarına rağmen (depolama ve güvenlik konuları), yakıt pili güç trenleri, sıfır emisyonun ve yüksek verimli ulaşımın gerçekleştirilmesinin mümkün olduğunu gösterir [54].

Araç uygulamaları için kullanılacak bir PEMFC sistemi, elektrik sürücü gereksinimleri hesaba katılarak tasarlanmalıdır. Özellikle işlemsel değişkenler ve bileşenlerin seçimi, elektriksel tahrik için bir güç kaynağı gerçekleştirme durumunda ihtiyaç olarak görülmektedir. Bu, yakıt pili sisteminin elektriksel verimliliğinin termal verimliliğine göre maksimize edilmesi gerektiği anlamına gelir. Bu amaçla, yığının düzgün çalışması için, verimden ödün vermeden yardımcı alt-sistemlerin elektrik tüketimi azaltılmalıdır [63].

Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorların gürültü ya da kirliliğinin yasaklandığı yerlerde (iç mekanlarda ve maden araçlarında) ve ayrıca havanın olmadığı yerlerde (deniz altı ve uzay araçları) de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alternatifin başlıca eksikleri

çok düşük kapasite, yüksek maliyet, uzun şarj zamanı, küçük işletim sıcaklık oranı ve düşük periyot kararlılığı olarak adlandırılan elektriksel enerji depolamaya dayandırılmaktadır [64].

Yakıt pilleri, araç uygulamaları için içten yanmalı motorlara göre birçok avantaj sunmaktadır. Çünkü yakıt pillerinin temiz ve verimli olmalarının yanı sıra yakıt esneklikleri de vardır. Yakıt pili sistemleri düşük ısı değeri esasına göre % 60'luk yüksek verimliliğe ulaşma potansiyeline sahiptirler [65].

Otomobiller, otobüsler, golf arabaları, forklift ve havaalanı araçları gibi kamu hizmetine yönelik araçlar, lokomotifler, tramvaylar, tekneler, uçaklar ve su altı araçları; PEMFC sistemlerinin ulaşım alanındaki bazı uygulamaları olarak sıralanabilir. Özellikle otomobil sistemlerinde, hemen hemen tüm büyük otomobil üreticileri yakıt pilli araçlarının prototiplerini tanıtmakta ve yakın gelecekte üretim ve ticarileştirme için gelecek planlarını açıklamaktadırlar [66]. Öte yandan, otobüslerin gelecekte yakıt pili teknolojisini en erken kullanan karayolu aracı olarak ortaya çıkacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak, ulaşım araçları sektörü; PEMFC teknolojisi için en çok umut vaat eden sektör olarak görünmektedir [36].

2.4.2.1. Otomobiller

Dünyanın önde gelen otomobil üreticileri, yakıt pillerini kullanarak en az bir prototip araç tasarlamışlardır. Otomobil üreticilerinden bazıları (Toyota, Ford) yakıt pilini metanolle beslemeyi tercih ederken, diğerleri (Opel sıvı hidrojen kullanmıştır, General Motors hidrojeni hidrit formunda depo etmiştir) ise saf hidrojen kullanmayı tercih etmişlerdir. Yakıt pili için yakıt türü olarak iyileştirilmiş metanolün kullanılması, kısa vadede otomobil üreticileri arasında genel bir eğilimdir. Ancak uzun vadede hidrojen, otomobil üreticilerinin çoğunluğu tarafından tercih edilen yakıt olarak kalacaktır.

1994 yılından bu yana, Ballard ile işbirliği içinde çalışan Daimler-Benz, bir dizi PEM yakıt pilli araçlar üretmiştir. Bu tür araçların ilki yakıt olarak hidrojen ile beslenmiştir. 1997 yılında ise Daimler-Benz, 640 km'lik bir menzile sahip metanol yakıtlı bir arabayı piyasaya sürmüştür. 1996 yılında, Toyota hidrojen ile çalışan (metal hidrid deposu) yakıt pili ve bataryadan oluşan hibrit binek bir araç, bunu takiben 1997 yılında ise aynı RAV4 platformu üzerinde metanol yakıtlı bir araç üretmiştir. Renault ve PSA-Peugeot Citroën, Fever prototipinden elde edilen sonuçlara dayanan gelişmiş bir tasarım üzerinde

hali hazırda çalışmaktadırlar. General Motors, Volkswagen, Volvo, Honda, Chrysler, Nissan ve Ford gibi firmalar da hidrojen, metanol veya benzinle çalışan PEMFC’li prototip arabalar üretimine yönelik planları olduğunu açıklamışlardır. Uluslararası Yakıt Pilleri, Plug Power ve Ballard Güç Sistemleri gibi büyük üreticiler otomobillerde 50 ila 100 kW’lık yakıt pili sistemleri kurmak için çalışmalar yapmaktadırlar [46].

Şekil 2.6’da gösterilen ve Daimler Chrysler tarafından geliştirilen NECAR 5 yakıt pilli otomobillerin en son prototipidir. Bu otomobil, taşıt üzerine yerleşik bir yakıt işlemcinin kullanımı yoluyla, hidrojen ve karbondioksit döndürülen sıvı metanol ile beslenmektedir. Kükürtdioksit, azot oksitleri, karbonmonoksit veya partikülleri, içten yanmalı motorun başlıca kirlenici emisyonları bu araçta hemen hemen hiç yoktur. Bir yakıt pilli motorunun verimi, içten yanmalı bir motora kıyasla daha yüksek, karbondioksit çıkışı ise daha düşüktür.



Şekil 2.6. Yakıt pilli otomobiller

2.4.2.2. Otobüsler

Transit otobüsler, yakıt pili teknolojisi için ilk ulaşım uygulamaları içinde en iyilerinden biridir. Otobüsler, kirliliğin zaten bir sorun olduğu kalabalık alanlarda faaliyet göstermektedir. Devlet tarafından finanse edilen bu otobüsler merkezi konumlu ve merkezi yakıt beslemelidirler. Sıfır emisyon yakıt pilli otobüsler geleneksel dizel veya dizel hibrit sistemler ile karşılaştırıldığında, çevresel faydalarının yanı sıra hem ekonomik hem de işlevseldirler. Ekonomik açıdan faydalar, yakıt pilinin verimlilik ve güvenilirliğinin artmasının doğrudan bir sonucudur. Yakıt pilli otobüsler, azot oksitler, kükürt oksitler ve partikül gibi hava kirlenici maddeleri elimine ederek sadece su buharı yayarlar. Geleneksel teknolojiler ile karşılaştırıldığı zaman yakıt pili otobüsler de önemli ölçüde sera gazı

emisyonlarını azaltabilirler.

Ballard tasarımları ve üreticileri, otobüs pazarında kullanılmak üzere 75 kW veya 150 kW güç üreten yakıt pili modülleri üretmektedir. Modern hibrit otobüs sistemi tasarımları ile birlikte kombine edilmiş Ballard'ın yakıt pilindeki son teknolojisi, gelişmiş araç performansı, dayanıklılık ve düşük maliyet göstermiştir. Bu gibi gelişmelerin tümü, yakıt pili hibrit otobüslerin ticarileştirilmesi için bir yol oluşturmuştur.

Ballard Güç Sistemleri 1993 yılında, 120 kW'lık yakıt pili sistemi ile birlikte 10 metrelik hafif bir transit otobüs, bunu takiben 1995 yılında ise 200 kW, 12 metrelik ağır bir transit otobüs üretmiştir. 1997 yılında, Ballard hidrojen yakıtlı 205 kW'lık PEMFC ünitesi piyasaya sürmüştür [63]. Ballard ve ortakları, yakıt hücreli hibrit otobüslerin, transit otobüs pazarında dizel ve dizel hibritler için bir maliyet-rekabetçi ticari alternatif olma yolunda uygun bir yol takip ettiğini hacim dağılımları ile göstermektedirler.

Şekil 2.7'de gösterilen otobüs, alçak zeminli, 40 adımlık New Flyer modelidir. Bu model performans, güvenilirlik ve dayanıklılığı iyileştiren en son teknolojiler ile tasarlanmıştır. Bu otobüs; Bluways, Ballard ve New Flyer şirketlerinin işbirliği ile tasarlanmıştır. Birincil güç kaynağı, 150 kW'lık PEMFC modülüdür. Enerji depolama sistemi lityum-iyon pillerden oluşmaktadır. Bu otobüs aslında ilk 20 otobüs siparişi için bir örnek olarak geliştirilmiştir [67].



Şekil 2.7. İleri teknoloji yakıt pilli bir otobüs

2.4.3. Taşınabilir Yakıt Pilleri

Bazı üreticiler de, taşınabilir uygulamalar için birkaç W'dan birkaç kW'a kadar elektrik enerjisi sağlayan yakıt pili güç kaynakları geliştirmektedirler. Taşınabilir uygulamalar için yakıt olarak depolanan doğal gaz, propan, metanol ya da hidrojen

kullanılabilir. Gelecekte, taşınabilir uygulamalar (uzaktan kumandalı aydınlatma, dizüstü bilgisayarlar ve cep telefonları vb.) için kullanılan yakıt pilleri geleneksel bataryaların yanı sıra benzinli ve dizel generatörlerin her ikisinin de yerini alabilir.

Taşınabilir yakıt pili uygulamaları, güç gereksinimi olan her sistemde kullanılabilir. Bu sistemler; kameralar, cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, radyolar, elektronik aletler, güç aletleri vb. bir elektriksel çıkışa bağlı değildirler. Taşınabilir pazar; uzun çalışma zamanı, hafiflik, kısa cevap zamanı, uzun ömür, düşük maliyet, küçük fiziksel boyut, güvenlik ve dayanıklılık gibi çeşitli gereksinimlere sahiptir [68].

Mikro yakıt pilleri, büyük ölçekli enerji üretiminin yanı sıra, cep telefonları, taşınabilir bilgisayarlar ve video kameralar gibi güç tüketen elektronik ürünlerde kullanılan bataryaların yerini alabilirler. Ayrıca, güç telekomünikasyon uyduları, değişen veya artan güneş panelleri için kullanılabilirler. Mikro yakıt pilleri bilgisayar çiplerine güç sağlayabilirler. Ayrıca mikro yakıt pilleri güvenli bir şekilde işitme cihazları ve kalp pilleri gibi biyolojik uygulamalar için de kullanılabilirler. Ulaşım uygulamalarında yakıt pilleri, dolaylı olarak mekanik bir çıkış üretmek için içten yanmalı motorlar ile yarış içindedir. Bu durumun aksine taşınabilir elektronik cihazlarda ise yakıt pilleri, bir elektriksel çıkış üretmek için batarya gibi cihazlar ile rekabet halindedir [46].

Tüketiciler sürekli olarak küçük elektronik cihazları bünyesinde bulunduran daha fazla özellik talep etmektedirler. Bu özellikler ise yakıt pilleri tarafından sağlanabilen uzun çalışma süreleri ve daha yüksek güç çıkışı gerektirmektedir. Yakıt pilleri, standart bataryalardan daha hafiftir. Bu durum özellikle tüketici elektroniği pazarının dizüstü bilgisayar sektörü için bir avantajdır. Taşınabilir yakıt pilleri çalışma esnasında çok az gürültü çıkışının olması avantajına sahiptir. Bu askeri uygulamalar için bir gerekliliktir.

Taşınabilir güç uygulamalarının diğer bir alt uygulaması ise havaalanı bagaj kamyonları, arazi araçları ve personel taşıyıcılar gibi özel araçlardır. Bu tür uygulamaların avantajlarını kullanan birkaç tesis vardır. Ancak bu gibi amaçlar için kullanılan geleneksel ekipmanlar ile karşılaştırıldığında uygun maliyetli olduğu henüz kanıtlanmamıştır [69].

Yakıt pilleri, şebeke bağlantısının mevcut olmadığı yerlerde elektriksel güç sağlayabilirler ve taşınabilir güç üniteleri olarak kullanılabilirler. Batarya şarjları, navigasyon sistemleri, sensörler gibi yakıt pilinin bazı uygulama alanları, taşınabilir askeri uygulamalar için örnek olarak gösterilebilir [36]. 50 W'lık elektriksel güç sağlayan taşınabilir bir prototip yakıt pili Şekil 2.8'de görülmektedir. Bu ünite için hidrojen temini, sabitlenmiş metal hidrit kutu içinde depo edilir.



Şekil 2.8. Taşınabilir prototip bir yakıt pili

2.4.3.1. Mobil Telefonlar

Daha güçlü mobil elektronik cihazlar için sürekli artan talep, geleneksel lityum-iyon pillerinin sınırlarını zorlarken, taşınabilir son yakıt pili sistemleri daha uzun ömürlü bir alternatif olarak umut vericidirler. Uluslararası Standartlar (IEC) ise yakıt pili geliştiricilerine ürünlerini pazara güvenli bir şekilde sunmak için yardımcı olmaktadır. Bir yakıt pili, hemen hemen bir batarya gibi çalışır. Her iki teknolojiye de bir elektrolit tarafından ayrılmış bir anot ve bir katot bulunmaktadır. Ancak, her iki uygulama arasında önemli bir fark mevcuttur. Bir batarya, tüm gerekli elektrokimyasal reaktantları kapalı bir birim içinde bulundurur ve şarj olmaya gereksinim duyar. Yakıt pili ise reaktantlar ile birlikte harici bir şekilde donatılır. Bu, sabit bir yakıt kaynağı var olduğu sürece yakıt pilinin elektrik üreteceği anlamına gelir. Motorola, Toshiba, Samsung, Panasonic, Sanyo ve Sony gibi tanınmış firmaların araştırmaları göstermiştir ki, yakıt pilli cep telefonu, eşdeğer boyuttaki bir lityum batarya kullanan cep telefonu ile kıyaslandığında iki kat daha uzun süre çalışabilmektedir ve şarj etmek için sadece 10 dakika yeterlidir.

2.4.3.2. Dizüstü Bilgisayarlar

Son zamanlarda taşınabilir bilgisayarlar (dizüstü bilgisayar) ve cep telefonları için PEMFC'nin kullanımı önerilmektedir ve bu fikir geniş çapta üreticilerin dikkatini çekmektedir. Yakıt pilli dizüstü bilgisayarlar, yakıt beslemesi yapılmadan 5 saate kadar çalışabilmektedir. Dizüstü bilgisayarlarda kullanılan bu tip yakıt pillerine “mikro yakıt pilleri” denilmektedir. Mikro yakıt pilleri; çağrı cihazları, duman dedektörleri, güvenlik alarmları vb. diğer uygulama alanlarını da kapsamaktadır. Bu alanlarda PEM yakıt pilinin

kullanımı halen araştırılmaktadır ve PEMFC teknolojisinin gelecekte yaygın kullanımı için dizüstü bilgisayarlar ciddi bir adaydır [36].

2.4.3.3. Kesintisiz Güç Kaynakları

Yakıt pilleri telekomünikasyon ya da tamamen kesintisiz güç gerektiren herhangi bir teknoloji için yedek güç olarak da kullanılabilir. Düşük sıcaklıkta çalışabilen yakıt pilleri tesis içinde kullanılan generatörler ile karşılaştırıldığında, daha hızlı başlangıç süresine sahiptir. Standart valf ayarlı kurşun-asit batarya sistemleri ile kıyaslandığında ise düşük maliyetli oldukları kanıtlanmıştır. Bu durum, şebekenin kesilmesi ve yakıt pilinin devreye girmesi anında güç sağlamak için köprülü batarya sistemi ile birlikte kullanıldığı zaman görülmektedir. Ayrıca yedek güç uygulamalarında kullanılan yakıt pilleri, uzaktan takip edilebilmekte ve daha az bakım gerektirmektedirler [69].

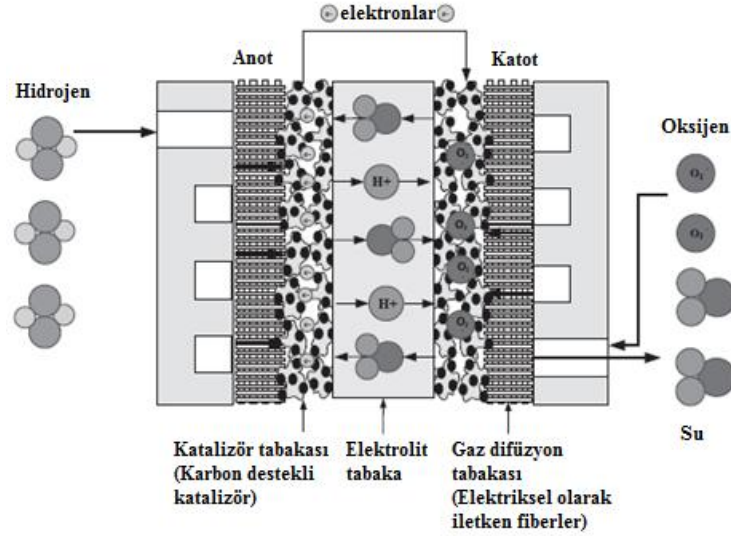
2.4.4. Uzay Uygulamaları

Uzay mühendisliği alanında, yakıt hücreleri 1960’lardan bu yana GEMINI ve diğer insanlı çalışmalar gibi uzay aracına uygulanmıştır. Bir yakıt pili elektrik üretirken yan ürün olarak da su ürettiği için, kapalı bir ortamda insanlı çalışmalar için oldukça caziptir. Ayrıca, yakıt pili, yüksek enerji yoğunluğuna sahip hidrojen ve oksijeni kullanarak enerji üretir. Bu yüksek potansiyeli nedeniyle, yakıt pilleri kısa süreli görevlerde uzay araçlarında uygulama için avantajlıdır [70-73]. Günümüzde, PEMFC havacılık uygulamaları için yeniden ciddi bir ilgi görmeye başlamıştır. Uzay uygulamaları için yakıt pili sistemi gerektirecek çeşitli görevler öngörülmüştür. Uzay uygulamaları için yakıt pili, izoleli düşük yerçekimi ortamından dolayı özel sistem ihtiyaçları, işlemsel şartlar ve tasarımlara sahiptir. Bu, zemin uygulamalarında oldukça farklıdır [74].

3. PEM YAKIT PİLİ MODELLERİ

3.1. Matematiksel Modeller

Yakıt pili üzerinde çalışan araştırmacılar için yakıt pilini modellemek oldukça önem taşıyan bir konudur. Çünkü yakıt pilinin modellenmesi ile tasarım açısından daha ucuz, daha iyi ve daha verimli yakıt pilleri geliştirmek mümkün olacaktır. Yapılacak model doğru tasarlanmalıdır ve yakıt pili problemlerine hızlı bir şekilde çözümler üretebilmelidir. İyi tasarlanmış bir model, yakıt pilinin geniş bir çalışma şartları aralığı altında yakıt pili performansını tahmin edebilmelidir. Bir yakıt pili modeline dahil edilebilecek birkaç önemli parametre vardır. Bunlar; hücre, yakıt ve oksidant sıcaklıkları, yakıt veya oksidant basıncı, hücre potansiyeli ve her bir reaktantın ağırlık parçasıdır. Bir matematiksel model içerisinde çözülmesi gereken parametrelerden bazıları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Matematiksel bir modelde çözülmesi gereken parametreler

Yakıt pili performansı ve çalışması için gerekli düzenlemeler daha iyi bir tasarım, materyaller ve optimizasyon gerektirir. Bunlar, sadece gerçekçi matematiksel yöntemler ile yapılan modeller mevcut ise gerçekleştirilebilir. PEM yakıt pilleri için literatürde yayınlanan birçok model vardır. Fakat yakıt pili modellerinin oluşturulması, modellerin karmaşıklığı nedeniyle oldukça zor bir iştir. Son zamanlardaki çalışmalarda sunulan yakıt pili modellerinin karakteristikleri ve kullanılan denklemler Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Yeni matematiksel modellerin karşılaştırılması

Boyut Sayısı	1 boyutlu, 2 boyutlu veya 3 boyutlu
Dinamik/Sürekli hal	Dinamik veya sürekli hal
Anot ve Katot Fazı	Tafel denklemleri, Butler-Volmer, Kompleks kinetik denklemleri
Anot ve Katot Kinetikleri	Gaz, sıvı, gaz ve sıvı kombinasyonu
Kütle Geçişi (Anot ve Katot)	Efektif Fick difüzyonu, Nernst-Planck, Nernst-Planck+Schlogl, Maxwell-Stefan
Kütle Geçişi (Elektrolit)	Nernst-Planck+Schlogl, Nernst-Planck+sürüklenme katsayısı, Maxwell-Stefan, Efektif Fick difüzyonu
Membran Kabartısı	Deneyssel veya termodinamik modeller
Enerji Balansı	İzotermal veya tam enerji balansı

Tablo 3.1'in ilk satırı literatürde kullanılan modellerin boyut sayısını göstermektedir. 1990'ların başında çoğu model bir boyutlu iken, 1990'ların sonu ile 2000'lerin başında ise bu modeller iki boyutluya dönüşmüştür. Son zamanlarda belirli yakıt pili bileşenleri için daha çok üç boyutlu modeller kullanılmaktadır. İkinci satır, modelin dinamik veya sürekli halde olduğunu gösterir. Yayınlanan çoğu modeller sürekli hal gerilim karakteristiklerine ve konsantrasyon profillerine sahiptir. Tablo 3.1'in bir sonraki satırı, kullanılan kinetik elektrot ifadelerinin tiplerini gösterir. Basit Tafel tipi denklemleri sık sık kullanılır. Bazı araştırmacılar, Butler-Volmer tipi denklemleri kullanırken, diğer birkaç model elektrokimyasal reaksiyonlar için daha gerçekçi, kompleks ve çok adımlı reaksiyon kinetiklerini kullanırlar. Bir sonraki satır, anot ve katot yapıları için kullanılan fazları karşılaştırır. Farklı çalışma şartları altında iki fazın (sıvı ve gaz) bir arada olduğu bilinen bir gerçektir. Katot yapısı içerisinde su yoğunlaşabilir ve taze oksijenin katalizör tabakaya ulaşma yolunu engelleyebilir.

Her bir modelin önemli bir özelliği anot, katot ve elektrolitin kütle geçiş çeşitleridir. Birkaç kütle geçişi modelleri kullanılmaktadır. Basit Fick difüzyon modelleri ve efektif Fick difüzyon modelleri tipik olarak Fick ayrıntılarının yerine belirli efektif taşıma katsayılarını deneyssel olarak kullanır ve iletimli akış katkıları hesaplanmaz. Bu sebeple bazı modeller, Fick difüzyonlarını iletimli akış ile birleştiren Nerst-Plank kütle geçişi ifadelerini kullanırlar. İletimli akış, tipik olarak hidrolik geçirgenlik katsayısının farklı formülasyonları kullanılarak, Darcy'nin kurallarından hesaplanır. Bazı modeller elektroozmotik akışa sebep olan Darcy'nin kuralları yerine iletimli akış için Schlogl'in formülasyonlarını kullanır ve bu formülasyon PEM içerisindeki kütle geçişi için de

kullanılabilir. Membran içinde birleştirilmiş elektroozmotik akışın basit bir metodu, su ve yakıt akışının proton akışına oranını kullanarak sürüklenme katsayı modelinin uygulanmasıdır. Çok bileşenli karışımlar için Maxwell-Stefan formülasyonu kütle geçişi tanımlamasının diğer bir popüler çeşididir. Bu bazı modellerde gaz-faz geçişi için kullanılmaktadır. Fakat bu denklem sıvı-buhar-faz kütle geçişi için daha iyi bir şekilde kullanılabilir. Çok az sayıda model bu denklemi her iki faz için kullanır. Yüzey difüzyonu modelleri ve tersinmez termodinamiklerden türetilen modeller nadiren kullanılır. Efektif geçiş katsayıları ve sürüklenme katsayılarını kullanan kütle geçiş modelleri, genellikle sadece çalışma şartlarının limitli bir aralığı altında deneysel verilere iyi bir yaklaşım sağlar.

Tablo 3.1'in altıncı satırı, polimer membranların kabartısının PEM yakıt pillerinin deneysel veya termodinamik modeller sayesinde modellendiğini gösterir. Çoğu model tamamıyla su ile birleştirilmiş bir proton değişim membranı (PEM) olduğunu kabul eder. Belirli durumlarda, su borusu deneysel bir bağıntı ile tanımlanır, diğer durumlarda ise termodinamik bir model su içeriğine dayalı PEM içinde Gibbs serbest enerji değişimine dayanarak kullanılır.

Son satır, yayınlanan modelin enerji balansı içerip içermediğini belirler. Çoğu model izotermal bir pil çalışması olarak kabul edilir. Bu yüzden içinde enerji balansları yoktur. Ancak enerji balans denklemlerini içermesi, yakıt pili modellerinin önemli bir parametresidir. Çünkü sıcaklık, yakıt pili içinde su yönetimini ve katalizör reaksiyonlarını etkiler.

Bir model sadece varsayımların izin verdiği kadar doğrudur. Modelin sınırlamalarını anlamak ve sonuçlarını doğru olarak yorumlamak için varsayımlar çok iyi anlaşılmalıdır. Yakıt pilinin modellenmesinde kullanılan ortak varsayımlar şunlardır;

- İdeal gaz özellikleri,
- Sıkıştırılmaz akış,
- Katmanlı akış,
- İzotropik ve homojen elektrolit, elektrot ve iki kutuplu materyal yapılar,
- Bileşenlerde ihmal edilebilir bir omik potansiyel düşümü,
- Kütle ve enerji geçişi, ortalama hacim koruma denklemleri kullanılarak büyük bir perspektiften modellenir.

Anlatılan bu yapı yakıt pili geometrisini göz önüne almadan tüm yakıt pili türlerine uygulanabilir. Basit yakıt pili modelleri bile bir yakıt pili sisteminin neden iyi veya kötü bir şekilde performans gösterdiğini belirlemek için oldukça yardımcı olacaktır [7].

Yakıt pilinin modellenmesi yakıt pili konusunda çalışan araştırmacılar için oldukça faydalıdır. Bu modeller dayanıklı ve doğru olmalıdır. Ayrıca yakıt pili problemlerine hızlıca çözümler de sağlayabilmelidir. İyi bir model; yakıt pili çalışma koşullarına ilişkin geniş bir yelpaze altında yakıt hücresi performansını tahmin edebilmelidir. Yalın bir yakıt hücresi modeli bile geniş tahmin gücüne sahip olacaktır. Yakıt ve oksidan sıcaklığı, yakıt veya oksidan basıncı ve hücre potansiyeli bir yakıt pili modelini oluşturan birkaç önemli parametredir.

Yakıt hücresi performansı ve çalışması için gerekli iyileştirmeler; daha iyi tasarım, malzemeler ve optimizasyon talebidir. Bu konular ancak gerçek matematiksel işlem modelleri mevcut ise ele alınabilir. Literatürde PEM yakıt pilleri için yayınlanmış birçok model mevcuttur. Ancak genellikle yeni başlayan birisi için; mevcut modellerin karmaşık olması bu modellerin anlaşılmasını oldukça zorlaştırır.

Modellerin herbirinde anot, katot ve elektrolit için kütle transfer tanımlaması önemli bir özelliktir. Birkaç kütle transfer modeli kullanılmıştır. Fick yayılma gücü yerine deneysel olarak tanımlanan efektif transfer katsayıları basit Fick difüzyon modelleri ile efektif Fick difüzyon modelleri tipik olarak kullanılır.

Bu nedenle, birçok model konvektif akışı ile Fick difüzyonunu birleştiren Nernst-Planck kütle transfer ifadelerini kullanmaktadır. Konvektif akış; tipik olarak hidrolik geçirgenlik katsayısının farklı formülasyonlarıyla Darcy Kanunu kullanılarak hesaplanır. Bazı modeller, Darcy kanunları yerine konvektif akış için Schlogl's formülasyonlarını kullanır ve PEM içindeki kütle transferi için de kullanılabilir.

Membranda elektroozmotik akış içeren oldukça basit bir yöntem, bir oranda sürtünme katsayısı modeli uygulamaktır. Bu proton akışına su ve yakıt akışının oranını tahmin eder. Bir diğer popüler kütle transfer tanımlaması ise çok bileşenli karışımlar için Maxwell-Stefan formülasyonudur. Bu, birçok modelde gaz-fazlı transfer için kullanılmaktadır. Fakat bu denklem sıvı-buhar-fazlı kütle transferi için kullanılması durumunda daha doğru olacaktır. Bu denklemi oldukça az sayıda model her iki faz için kullanır. Geri dönüşü olmayan termodinamiklerden elde edilen modeller ve yüzey difüzyon modelleri nadiren kullanılmaktadır. Efektif transfer katsayıları ve sürtünme katsayıları kullanan kütle transfer modelleri genellikle sadece çalışma şartlarının sınırlı bir alanı altında deneysel verilere iyi bir yaklaşım sağlar.

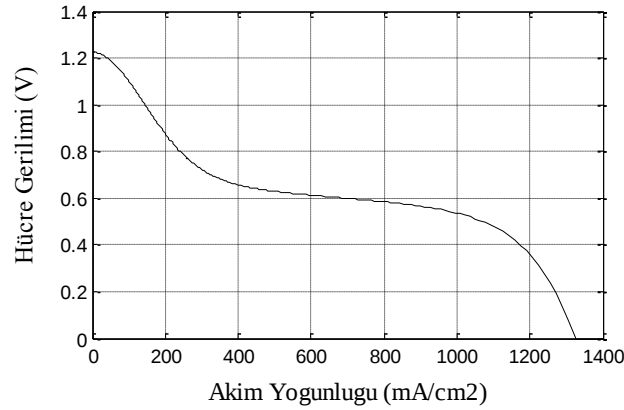
Matematiksel bir model oluşturmak için kullanılan temel adımlar modellenen sistem dikkate alınmaksızın aynıdır. Detaylar metottan metoda biraz farklılık gösterir. Fakat ortak

adımların anlaşılması; değerlendirilebilen ve anlaşılabilen herhangi bir yöntemden elde edilen sonuçlar için bir çerçeve oluşturur. Model oluşturma sürecinin temel adımları şunlardır:

1. Model seçimi
2. Model uydurma
3. Model doğrulama

Bu üç temel adım, veriler için uygun bir model geliştirilinceye kadar tekrarlanarak kullanılır. Model seçim adımında, verilerin çiziminde, süreç bilgisi ve süreç hakkındaki tahminlerde, verilere uygun olacak model şeklini belirlemek için kullanılır. Daha sonra, seçilen model ve veriler kullanılarak, modeldeki bilinmeyen parametreleri tahmin etmek için uygun bir model-uydurma yöntemi kullanılır [43].

Bir yakıt pilinin karakteristiğini elde etmek için matematiksel modeller kullanılır. Matlab-Simulink ortamında yakıt pilinin matematiksel denklemleriyle oluşturulan benzetim sonucunda polarizasyon eğrisi elde edilmiştir. Şekil 3.2'deki polarizasyon eğrisinden de görüldüğü gibi yakıt pilindeki bir hücrenin davranışı oldukça nonlineer olarak değişmektedir. Ayrıca bu karakteristik; akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, membran nemliliği ve reaksiyona giren gazların kısmi basıncı gibi çok sayıda faktöre bağlıdır.



Şekil 3.2. Polarizasyon Eğrisi

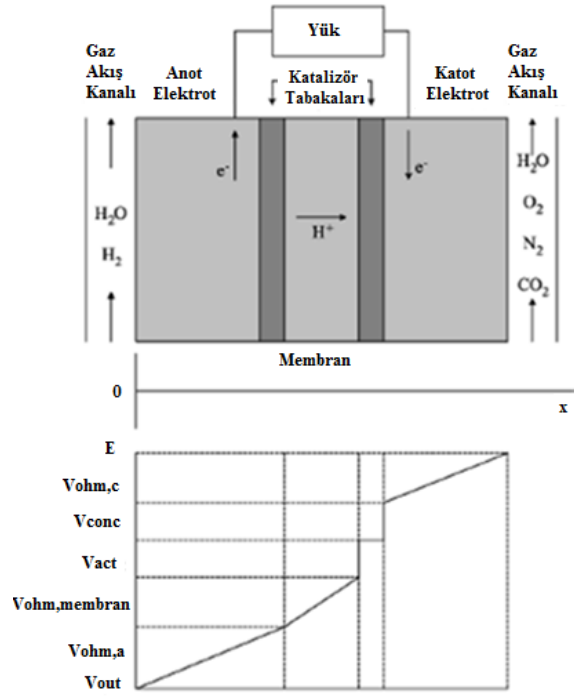
Hücre gerilimi akım yoğunluğunun artışıyla azalmaktadır. Bir PEM yakıt pili, genellikle 70-80 °C sıcaklık civarında en iyi performansı sergilemektedir. Bu sebeple yakıt pili modellenirken hücre sıcaklığı 80 °C'de sabit tutulmuştur. Bir reaktantın basıncı 3-5 atm arasında, membran nemliliği ise %100 olarak seçilmiştir [7].

3.2. Dinamik Modeller

Bu bölümde, bir PEM yakıt pili yığnında dinamik bir model oluşturmak için matematiksel bir yaklaşım sunulmuştur. Bu analizi basitleştirmek için aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır;

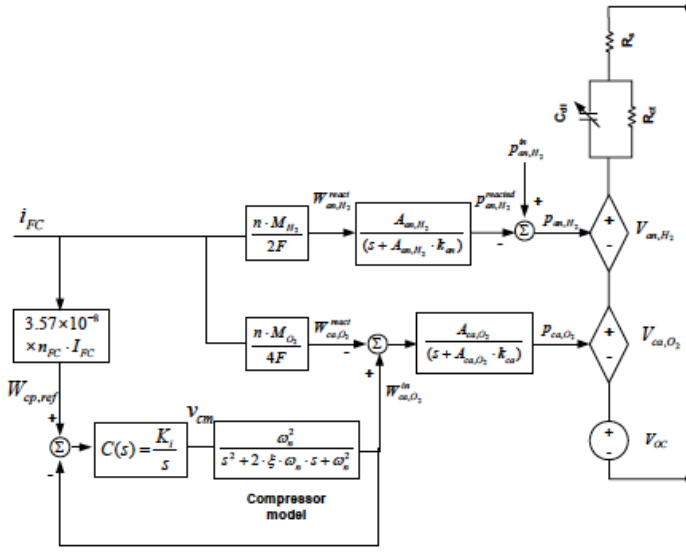
1. Bir boyutlu model olduğu düşünülmüştür.
2. Gazlar ideal ve homojen dağılmıştır.
3. Yakıt pili kanallarında sabit basınçlı gaz akışı vardır.
4. Yakıt H_2 ve oksidant ise havadır. Katot efektif su basıncı %100 iken anot efektif su buhar basıncı, doymuş buhar basıncının %50'sidir.
5. Yakıt pili $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ altında çalıştığı ve reaksiyon sonucu oluşan ürünün sıvı fazda olduğu düşünülmüştür.
6. Termodinamik özellikler yığın sıcaklığı ortalama değerlendirilir, yığna karşı sıcaklık değişimleri ihmal edilir ve yığının tüm özel ısı kapasitesi bir sabit olarak varsayılır.
7. Özel pillerin parametreleri bir yakıt pili yığını temsil etmek için birleştirilebilir.

Bir PEM yakıt pilinin şematik diyagramı ve iç gerilim düşümleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir [75]. Yakıt pilinin anot ve katot kanallarında ve membranda oluşan omik, konsantrasyon ve aktivasyon kayıpları grafik halinde gösterilmiştir.



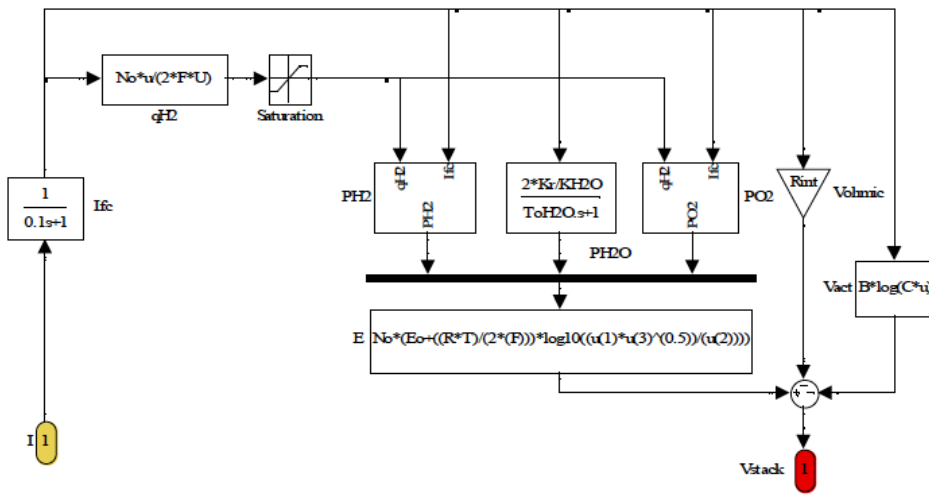
Şekil 3.3. Bir PEMFC'nin şematik diyagramı ve gerilim düşümleri

Literatürdeki dinamik modeller incelendiği zaman ön plana çıkan birkaç model için kısa bir tarama yapılmıştır. Lee ve Cho [76] analitik kuram ve deneysel verilere göre pratik bir yakıt pili sistemi için dinamik model tasarlamışlardır. Şekil 3.4'te verilen model, 3 bölümden oluşmuştur. Bu bölümler; kanallardaki yakıt akışı ve reaksiyonlarını içeren açık devre gerilim modeli, hücredeki elektrokimyasal reaksiyonların gerilim düşümlerinden kaynaklanan bir eşdeğer devre modeli ve hava kompresör modelidir. Tasarlanan bu model 1 kW'lık PEMFC sisteminin deneysel verileriyle de doğrulanmıştır. Özellikle güç sistemlerinin tasarımı ve yakıt pilli güç sisteminde sistem dinamiklerini analizi için faydalı bir model olmuştur.



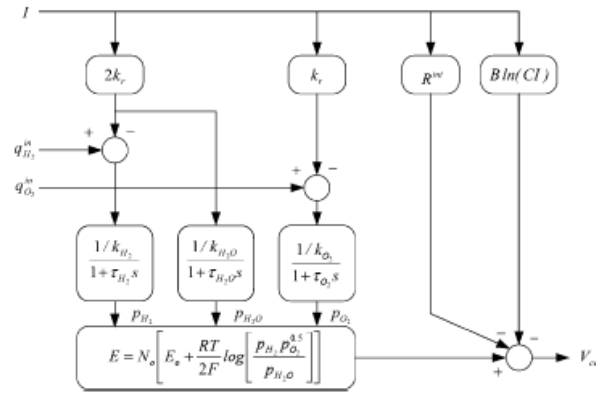
Şekil 3.4. Yakıt pili dinamik modeli [76]

Yalçınöz ve Alam [77] ise bir dizüstü bilgisayar için PEMFC'nin dinamik davranışlarını analiz eden bir dinamik model oluşturmuşlardır. Tasarlanan bu model ortam sıcaklığı (20 °C) ve basıncında (1 atm) çalışabilmektedir. Bu çalışmada tasarlanan 100 W gücündeki PEMFC'nin dinamik sistem modeli Şekil 3.5'de verilmiştir. Bu sistemdeki alçaltıcı DC-DC konverter için geri beslemeli bir PID kontrolör kullanılmıştır. Yakıt pili gerilimin yük akımının artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Böylelikle çeşitli çalışma şartları altında yük gerilimi arzu edilen bir seviyede muhafaza edilebilir.



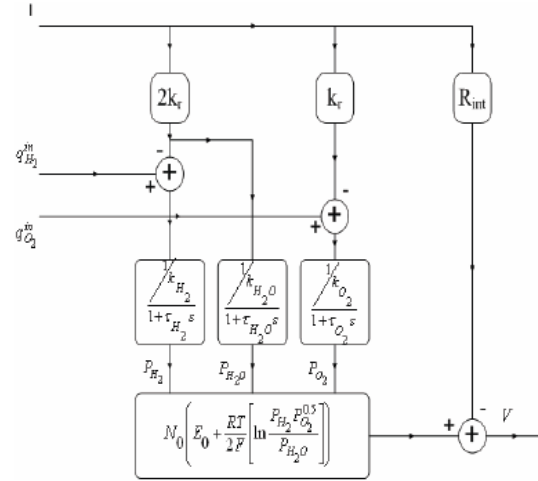
Şekil 3.5. Bir PEM yakıt pili sisteminin blok diyagramı [77]

El-Sharkh ve arkadaşları [78] ise şebekeden bağımsız bir PEMFC güç sisteminin elektrokimyasal bir dinamik modelini oluşturmuşlardır. Şekil 3.6'da verilen model; metanol reformer, PEM yığını ve güç düzenleme birimini içermektedir. PEM güç sistemine evsel bir yük bağlanması anındaki hızlı değişimler, geçici cevaplar ve çıkış gerilimini tahmin etmek için bu modeli kullanılmışlardır. Yükteki değişimleri takiben PEM güç sisteminin hızlı cevap kapasitesinin olduğu elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

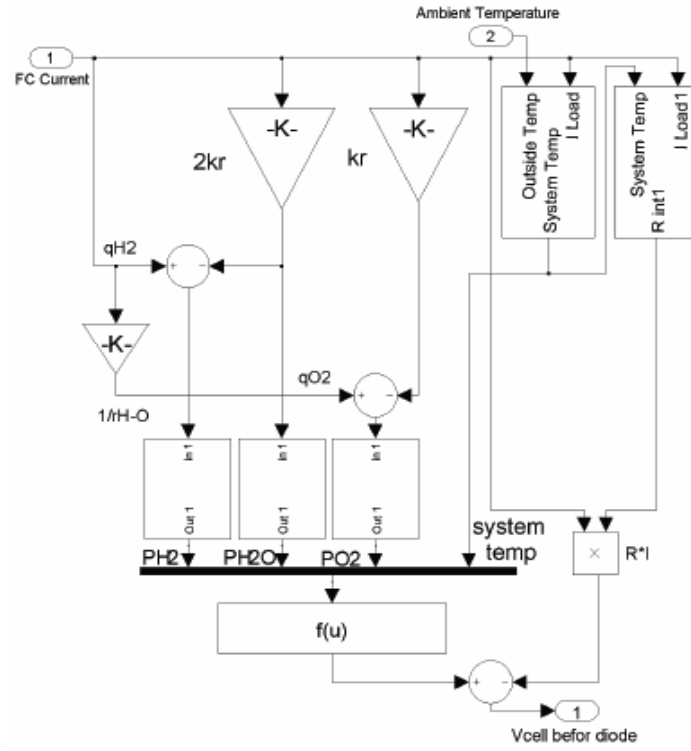


Şekil 3.6. PEM yakıt pili modeli [78]

Soltani ve Bathaee [79] ise Nexa PEM yakıt pili güç modülünün farklı yük durumları altında ölçülen değerlerine dayanarak bir yarı deneysel bir dinamik model oluşturmuştur. Bu model ile sıcaklığın etkisi, yakıt basıncı ve farklı yük durumlarında iç rezistansın değişimi gibi etkiler incelenmiştir. Yük değişimine karşın çıkış geriliminin dinamik karakteristiğinin belirlenmesi için bazı adım yükler denenmiştir. Sıcaklık etkisinin gözönüne alındığı ve alınmadığı iki ayrı model tasarlanmıştır. Şekil 3.7'deki sıcaklık etkisinin dikkate alınmadığı model ile deneysel veriler arasında önemli bir uyumsuzluk vardır. Şekil 3.8'deki geliştirilen diğer model ise geniş bir aralıktaki yüklerde Nexa PEM güç modülünün davranışını doğru bir şekilde yansıtmaktadır. Böylelikle yükün değişken olduğu uygulamalarda önerilen bu model kullanılır.



Şekil 3.7. PEM yakıt pili modülünün dinamik modeli [79]



Şekil 3.8. Matlab Simulink'te gerçekleştirilen PEM modülü dinamik modeli [79]

4. EVSEL YAKIT PİLİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

Elektrik üretimi için fosil yakıtların kullanımı yenilenebilir kaynakların kullanımından daha fazladır. Dünyadaki yakıt rezervlerinin azalmasıyla fosil yakıtların potansiyeli de azalmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı limitleri, değişken fiyatları ve zararlı etkilerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi önemli ölçüde artmıştır. Bundan dolayı elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtlardan yenilenebilir yakıtlara geçiş kaçınılmazdır. Ancak bu değişim maliyetten dolayı yavaş olmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi yaygın olarak kullanılmaktadır ve özellikle elektrik şebekesine ulaşımın zor olduğu yerlerde ve kırsal alanlarda ekonomiktir. Bir güneş sisteminde üretim, değişen meteorolojik koşullardan da önemli ölçüde etkilenmektedir. Güneş enerjisinin kesintili olmasından dolayı, kesintisiz enerji sağlayabilmek için genellikle bataryalar gibi tamamlayıcı güç kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu probleme olası bir çözüm de yakıt pillerinin kullanılmasıdır [32].

Son zamanlarda yenilenebilir yakıtların en popülerleri olan hidrojen, çevre dostu birçok kaynaktan elde edilmektedir. Yakıt pilleri, yakıt ve oksidanın kimyasal reaksiyonu ile kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren kimyasal reaktörler olarak düşünülebilir. Geleneksel elektrik enerjisi üretimi teknolojilerine kıyasla yakıt pillerinin önemli avantajları; yüksek verimlilik (özellikle atık ısı kojenerasyon için kullanılırsa), evsel uygulamalara uygun sessiz çalışma ve üretilen kirletici gazların neredeyse sıfır düzeyde olması olarak sıralanabilir. Bu avantajlar, yakıt pili sistemlerinde enerji üretiminin yakma teknikleri ve sıcaklık değişimlerine dayalı olmamasından kaynaklanmaktadır [14].

4.1. Güneş Pili-Yakıt Pili Hibrit Sistemi

Yenilenebilir hibrit enerji sistemleri; rüzgar, hidrojen, güneş vb. yenilenebilir enerji kaynaklarının aynı anda kullanıldığı sistemlerdir [15]. Hibrit güç üretim sistemi tabiri tüketicilerin ihtiyaç duyduğu elektriksel ve termal yükleri karşılamak için farklı enerji teknolojilerinin (rüzgar, hidrojen, biyokütle vb.) kombine edildiği tüm sistemler için kullanılabilir [34].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan güneş enerjisi, her yerde bulunması ve sürekli olması nedeniyle önemli ve öncelikli sürdürülebilir bir kaynaktır. Son zamanlarda, fotovoltaiik dizi sistemi, elektriksel enerji uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta ve

kabul görmektedir. Fotovoltaik diziler çevresel etki ve kirlilik olmadan elektriksel doğru akım üretebilirler [80]. Fosil yakıtların üzerindeki ekonomik ve çevresel kaygılar, PV enerji sistemlerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir. Güneş enerjisinin kesintili olması nedeniyle, bağımsız çalışan bir PV sistemde sürekli güç akışı sağlayabilmek için enerjinin depolanması gereklidir [23]. PV teknolojisi, fosil yakıt tabanlı elektrik enerjisi üretiminde oluşan çevresel zorluklara teknolojik olarak uygun bir çözüm sağlar. PV enerji üretimi, büyük bir net enerji üreticisidir ve dolayısıyla CO₂ emisyonlarını da azaltır [81].

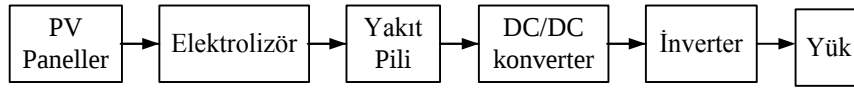
Hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji kaynakları ile tek başına çalışan bir yakıt pili yığınının entegrasyonu, kaynak güvenilirliği nedeniyle öncelikle izole tüketiciler için uygun bir çözümü temsil edebilir. Mevcut elektrik şebekesinin kolayca hizmet veremediği uzak bölgelerde bulunan konutlarda küçük ölçekli enerji üretimi için giderek artan bir ilgi gözlenmiştir. Yakıt pilleri gerekli tüm elektriği tedarik etmek veya temel yükü kapsayan uygun bir seçenek sunmak için kullanılabilir. Ayrıca pik yükleri kapsayan diğer küçük ünitelerin entegrasyonunda da kullanılırlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin dalgalı ve az güvenilir kaynak olmasından dolayı oluşan zorlukların üstesinden gelmek için, hidrojen depolama sistemleri kurulabilir. Bu sistem sonuç olarak elektriksel yükleri takip edebilmeli ve güç üretiminden H₂ üretim profilini bir ölçüde bağımsız yapabilmelidir [21].

Kısa vadede fosil yakıtlardan (özellikle doğal gaz) hidrojen üretimi planlanırken, uzun vadede ise hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi düşünülmektedir. Bu nedenle güneş enerjisi, hidrojenin kullanılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Çünkü hidrojenin çevresel etkileri azdır, sıkıştırılabilir depolama ve dağıtım özelliğine sahiptir. Güneş-hidrojen sistemi, güneş enerjisinin değişkenliğini dengelemek için potansiyel bir enerji depolama aracı olabilir [16]. Güneş enerjisinden hidrojen üretmek için çeşitli yöntemler vardır. Şu anda, en yaygın olarak kullanılan güneşten hidrojen üretim metodu, düşük sıcaklıkta suyun elektrolizi ile hidrojeni elde etmektir [17].

Uzak bölgelerde ya da diğer bağımsız uygulamalarda güç kaynağı için güneş-hidrojen sistemlerinin kullanımına artan bir ilgi vardır. Bu sistemler; sera gazı emisyonlarının hiç olmaması, uzun periyotlar boyunca tam bağımsız çalışması ve az bakım gerektirmesi gibi özelliklerden dolayı oldukça caziptir. Bataryaların yerine enerji depolamak için hidrojenin kullanımı, potansiyel olarak dönemlik enerji depolamaya olanak sağlar. Bundan dolayı, fotovoltaik dizi alanı çok daha küçük yapılabilir ve yedek bir dizel generatöre gerek duyulmaz [14].

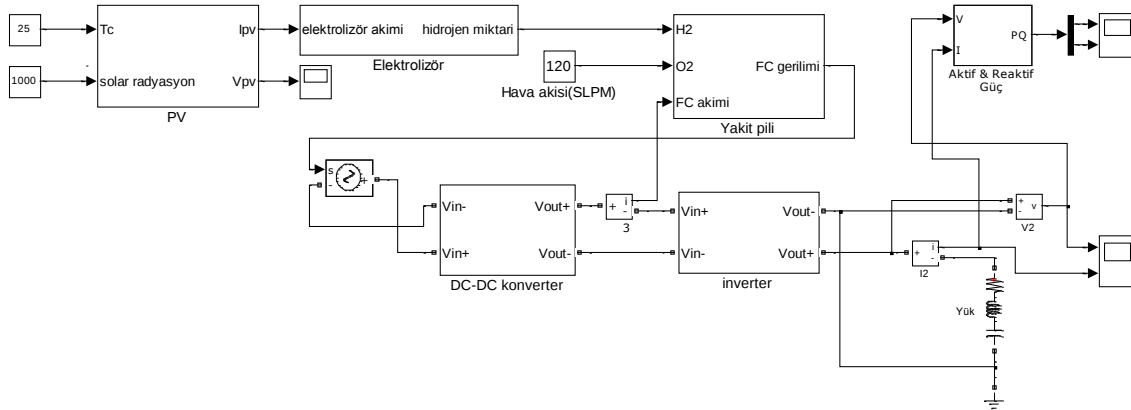
4.2. Tasarım ve Benzetim

Bu bölümde Matlab-Simulink'te geliştirilen bir yakıt pili güç sistemi incelenmiştir. Bu sistemin temel elemanı yakıt pili yığınıdır. Fotovoltaik paneller, elektrolizör, konverter, inverter ve yük eklenerek sistem tamamlanmıştır. PV paneller, elektrolizör için gerekli olan DC gerilimi sağlayan ikinci bir enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Yakıt pilinin çıkış gerilimini yükseltmek için DC-DC konverter kullanılmıştır. İnverter ise konverter çıkışındaki doğru gerilimi alternatif gerilime dönüştürmektedir. Sistemin genel şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bir yakıt pili güç sistemi

Şekil 4.2'de ise Matlab-Simulink ortamında gerçekleştirilen yakıt pili sisteminin modeli verilmiştir.

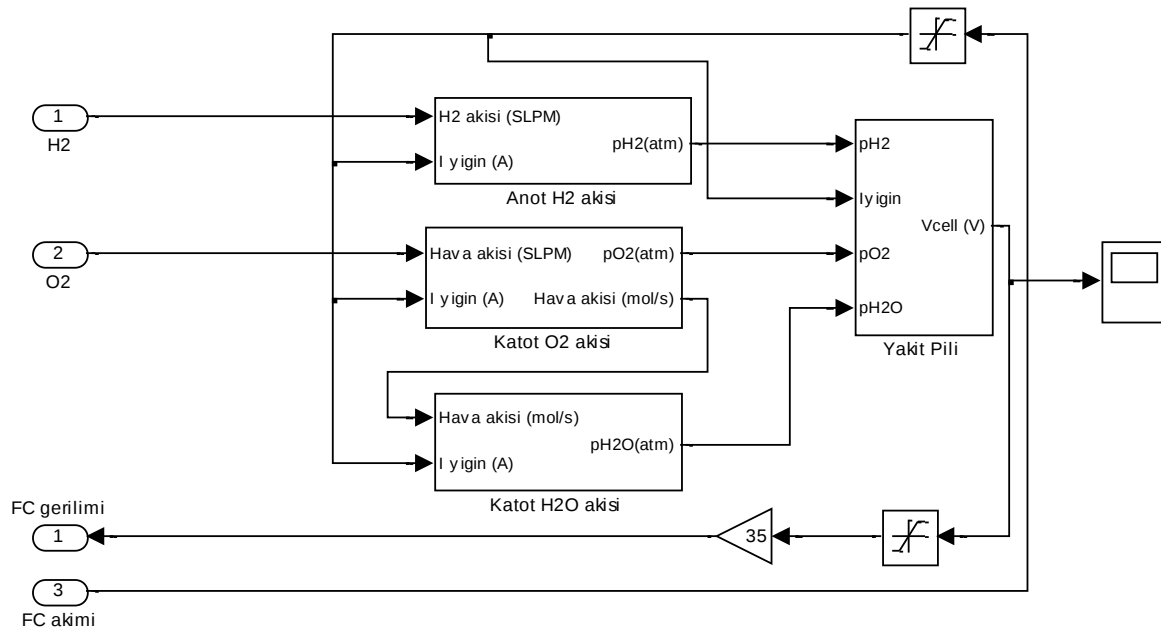


Şekil 4.2. Bir yakıt pili sisteminin modeli

4.2.1. Yakıt Pili Modeli

Yakıt pilinin girişleri; hidrojen, oksijen ve buhar basıncı ve yığının hücre akım yoğunluğudur. Hücre gerilimi yığındaki hücre sayısının çarpımıdır. Böylece, yığın gerilimi bu çarpımdan elde edilir. Bir PEM yakıt pilinin modeli Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

İncelenecek olan PEM yakıt pilinin gücü 5 kW'dır. Hidrojen akış oranı 8 standart litre/dakika (SLPM), hava akış oranı ise 120 SLPM olarak sabitlenmiştir. Her bir hücrenin ürettiği gerilim değeri ise 0,53 V dur. Her bir hücrenin aktif yüzey alanı 232 cm² dir.



Şekil 4.3. PEM yakıt pili modeli

Yakıt hücresinin gerilimi akımın artışıyla azalır. Bir PEM yakıt pili genellikle yaklaşık 70-80 °C sıcaklığında, 3-5 atm reaktant kısmi basıncında ve ~%100 membran nemliliğinde en iyi performansı gösterir [42]. Hücre gerilimi (V_{cell}); herhangi bir durum için denklem (4.1) kullanılarak bulunabilir. Bir hücrenin yüklü çalışması durumunda, yüksüz gerilim (E); aktivasyon (V_{act}), omik (V_{ohm}) ve konsantrasyon (V_{conc}) aşırı gerilimlerinin artmasıyla azalır [82].

$$V_{\text{cell}} = E - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \quad (4.1)$$

Yakıt pilinin karakteristik eğrisini oluşturabilmek için Nerst denklemi (4.2); açık devre hücre gerilimini (E), hücre sıcaklığı (T) ve reaktant kısmi basınçlarının bir fonksiyonu olarak verir [42].

$$E = E_0 - 0,85.10^{-3} (T - 298,15) + \frac{R.T}{2.F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O} \cdot P^{0,5}} \right) \quad V \quad (4.2)$$

E_0 ; referans gerilimi gösterir, R universal gaz sabiti ve F'de Faraday sabitidir. P_{H_2} , P_{O_2} ve P_{H_2O} ; hidrojen, oksijen ve su buharı basınçları, P ise yığın içindeki toplam basınçtır. İlgili parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir. Aktivasyon düşümü Tafel denklemi tarafından analiz edilebilir.

$$E_{act} = -0,9514 + 0,00312T - 0,000187.T.[\ln(I)] + 7,4.10^{-5}.T.[\ln(C_{O_2})] \quad V \quad (4.3)$$

Burada I akım yoğunluğudur. C_{O_2} ise oksijen konsantrasyonudur ve denklem (4.4)'de yığın sıcaklığının bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08.10^6 \exp(-498/T)} \quad \text{mol.cm}^{-3} \quad (4.4)$$

Aktivasyon aşırı gerilimi denklem (4.1)'de bir gerilim düşümü olarak görünür ve E_{act} denklem (4.3)'de tüm dizinin her yerinde negatiftir. Denklem (4.5) bu terimin çift negatifliğinden kaçınmak için kullanılır.

$$V_{act} = - E_{act} \quad V \quad (4.5)$$

Elektrot-elektrolit ara yüzeyinde şarj olan çift katman kapasitesinin etkisi; denklem (4.6) ile ifade edilebilir [1].

$$\frac{dV_{act}}{dt} = \frac{I}{C_{dl}} - \frac{V_{act}}{R_{act} \cdot C_{dl}} \quad V \quad (4.6)$$

Burada C_{dl} çift katman kapasitesi, R_{act} ise aktivasyon direncidir ve aktivasyon geriliminin (V_{act}), hücre akım yoğunluğuna (I) bölünmesi ile bulunur.

$$R_{act} = \frac{V_{act}}{I} \quad \text{k}\Omega.\text{cm}^2 \quad (4.7)$$

Burada R_{act} , verilen bir hücre akımı için efektif direnç yerine geçer ve aktivasyon aşırı gerilimine (V_{act}) katkıda bulunur. Diğer taraftan denklem (4.6), zamanın her bir örneğinde V_{act} 'ı belirlemek için kullanılır. Bu yüzden bu denklemlerin ayrı ayrı kullanılması gerekir ve değiştirilemezler.

Ortalama akım yoğunluğunda gerilim düşümü hemen hemen lineerdir ve doğal durumda omiktir. R_{mem} membran direncidir ve membran kalınlığının (t_m) iletkenliğe (σ) bölünmesi ile bulunur. Modelleme kullanılacak yakıt pili model parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

$$V_{ohm} = I.R_{mem} \quad (4.8)$$

$$R_{mem} = \frac{t_m}{\sigma} \quad k\Omega.cm^2 \quad (4.9)$$

Tablo 4.1. Yakıt pili model parametreleri [83]

Sembol	Parametre	Değer	Birim
E_0	Referans gerilim	1,229	V
R	Üniversal gaz sabiti	8,314	$J mol^{-1} K^{-1}$
F	Faraday sabiti	96485	$C mol^{-1}$
T	Yığın sıcaklığı	353	K
P	Hücre basıncı	1,2	atm
t_m	Membran kalınlığı	175.10^{-4}	cm
C_{dl}	Çift katman kapasitansı	0,035x232	F
τ_{H^+}	Zaman sabiti	12,78	s
α_{H^+}	İlişkisel parametre	5,78	$cm^6 A^{-3}$
D_{H^+}	Difüzyon katsayısı	$0,85 \times 10^{-6}$	$cm s^{-1}$

Membran su hacmi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlar; protonların hareketinden dolayı oluşan anottan katoda su akışı, reaktantların dış su hacmi ve katottan anoda geri su difüzyonu gibi olaylardır [1]. Su akışının etkisi önemli bir faktör olduğu için membran proton konsantrasyonunun sadece hücre akım yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu kabul edilebilir. Proton konsantrasyonunu (C_{H^+}) tanımlamak için ampirik diferansiyel bir denklem çözülebilir ve denklem 4.10 ve denklem 4.11 membran iletkenliğini (σ) tahmin etmek için kullanılabilir.

$$\frac{dC_{H^+}}{dt} + \frac{C_{H^+}}{\tau_{H^+}} = \frac{1 + \alpha_{H^+} \cdot I^3}{\tau_{H^+}} \quad (4.10)$$

$$\sigma = \frac{F^2}{R.T} D_{H^+} \cdot C_{H^+} \quad (4.11)$$

Daha yüksek akım yoğunluklarında, hücre potansiyeli kütle-geçiş sınırlamalarından dolayı hızla azalır. Bu non-lineerlik ise konsantrasyon aşırı gerilimi olarak adlandırılır.

$$V_{conc} = a \cdot e^{(bl)} \quad V \quad (4.12)$$

Burada a (V) ve b (cm².mA⁻¹) katsayıları sıcaklıkla değişir.

$$a = 1,1 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-6} \cdot (T-273)$$

$$b = 8 \cdot 10^{-3}$$

(4.1)-(4.12) nolu denklemler ile hücre potansiyeli (V_{cell}); akım yoğunluğu, hücre sıcaklığı, reaktant basıncı ve membran hidratlamanın bir fonksiyonu olarak çözülebilir. Eğer tüm hücreler seri olarak bağlanmışsa, yığın gerilimi hücre gerilimi ile hücre sayısının (N) çarpımına eşittir.

$$V_{yığın} = V_{cell} \times N \quad (4.13)$$

Hücre potansiyeli oksijen, hidrojen ve buhar kısmi basınçlarına bağlıdır. Bu durum Denklem (4.2) ile ifade edilmektedir. Bu basınçlar, anot ve katottaki reaktant akış oranları ve nemden oldukça etkilenir.

Tüm gazların ideal olduğu varsayılarak ideal gaz kanunu, dinamik analizler için genişletilebilir ve kütle korunum yasası, genel denklemler ile reaktant akış modeli kullanılabilir.

$$\frac{V}{R.T} \frac{dP_g}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \pm \frac{I}{n.F} \quad (4.14)$$

Burada; anot veya katot hacmi V(m³), gaz (oksijen, hidrojen, buhar) basıncı P_g (atm), reaktant giriş akış oranı $\dot{m}_{in}$ (mol.s⁻¹), reaktant çıkış akış oranı $\dot{m}_{out}$ (mol.s⁻¹), reaksiyonda kullanılan her bir molekülü kapsayan elektron sayısı ise n ile gösterilmiştir.

Hücre içerisinde ani durumları belirleyebilmek için gaz reaktantlarının korunumları aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanabilir.

Anot akışı model eşitlikleri;

$$\frac{V_a}{R.T} \frac{dP_{H_2}}{dt} = \dot{m}_{H_2-in} - \dot{m}_{H_2-out} - \frac{I}{2.F}$$

$$\dot{m}_{H_2-out} = k_a (P_{H_2} - P_{amb}) \quad (4.15)$$

$$\dot{m}_{H_2-in} = FR_{H_2} \cdot PC_{H_2} \cdot CF_{H_2}$$

Katot akışı model eşitlikleri;

$$\frac{V_c}{R.T} \frac{dP_{O_2}}{dt} = \dot{m}_{O_2-in} - \dot{m}_{O_2-out} - \frac{I}{4.F}$$

$$\dot{m}_{O_2-out} = k_c (P_{O_2} - P_{amb}) \quad (4.16)$$

$$\dot{m}_{O_2-in} = FR_{O_2} \cdot PC_{O_2} \cdot CF_{O_2}$$

Katot su akışı model eşitlikleri;

$$\frac{V_c}{R.T} \frac{dP_{H_2O-C}}{dt} = \dot{m}_{H_2O-in-C} - \dot{m}_{H_2O-out-C} + \frac{I}{2.F}$$

$$\dot{m}_{H_2O-out-C} = k_c (P_{H_2O-C} - P_{amb}) \quad (4.17)$$

Denklemlerde kullanılan reaktant akışı model parametreleri Tablo 4.2’de [83] verilmiştir.

Tablo 4.2. Reaktant akışı model parametreleri

Sembol	Parametre	Değer	Birim
P_{amb}	Ortam basıncı	1	atm
V_a	Anot hacmi	0,0159	m ³
k_a	Anot akış sabiti	0,004	mol s ⁻¹ atm ⁻¹
V_c	Katot hacmi	0,0025	m ³
k_c	Katot akış sabiti	0,01	mol s ⁻¹ atm ⁻¹
PC_{H_2}	H ₂ (saf) yüzdesi	% 99	-
CF_{H_2}	H ₂ akış oranı değişim faktörü (SLPM'den mol.s ⁻¹ ,ye)	6,85x10 ⁻⁴	-
PC_{O_2}	O ₂ (saf) yüzdesi	% 21	-
CF_{O_2}	O ₂ akış oranı değişim faktörü (SLPM'den mol.s ⁻¹ ,ye)	6,084.10 ⁻⁴	-
PC_{H_2O-C}	Katot buhar katkı oranı	% 1	-

4.2.2. Fotovoltaik Panel Modeli

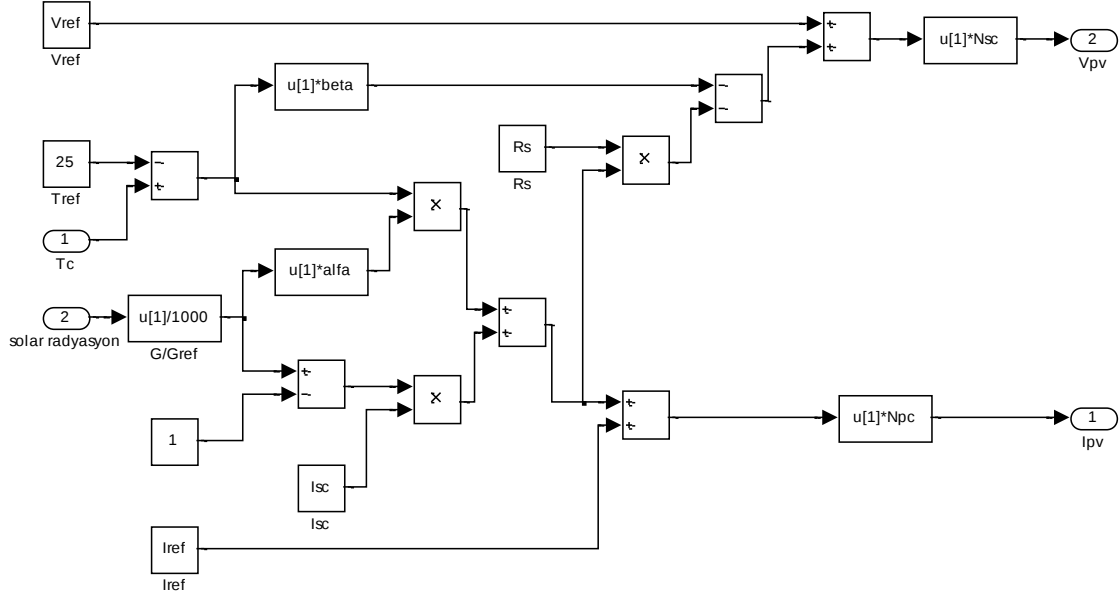
Bir fotovoltaik sistem; gerekli çıkış akım ve gerilimini sağlamak için seri ve paralel bağlı birçok hücreden oluşmaktadır. PV sistemin çıkış gerilimi denklem (4.18)'de verilmiştir [84];

$$V_{pv} = \frac{N_s a k T}{q} \ln \left[\frac{I_{sc} - I_{pv} + N_p}{N_p I_0} \right] - \frac{N_s}{N_p} R_s I_{pv} \quad (4.18)$$

PV sistemin matematiksel modellemesinde kullanılan parametreler şunlardır:

- a : İdeal faktör
- I_0 : PV hücre ters saturasyon akımı (A)
- I_{pv} : PV hücre çıkış akımı (A)
- I_{sc} : Hücre kısa devre akımı (A)
- k : Boltzmann sabiti (J/⁰K)
- N_p : Paralel dizi sayısı
- N_s : Her bir dizi için seri hücre sayısı
- q : Elektron yükü (C)
- R_s : PV hücrenin seri direnci (Ω)
- T : PV hücre sıcaklığı (⁰K)
- V_{pv} : PV hücre için çıkış gerilimi (V)

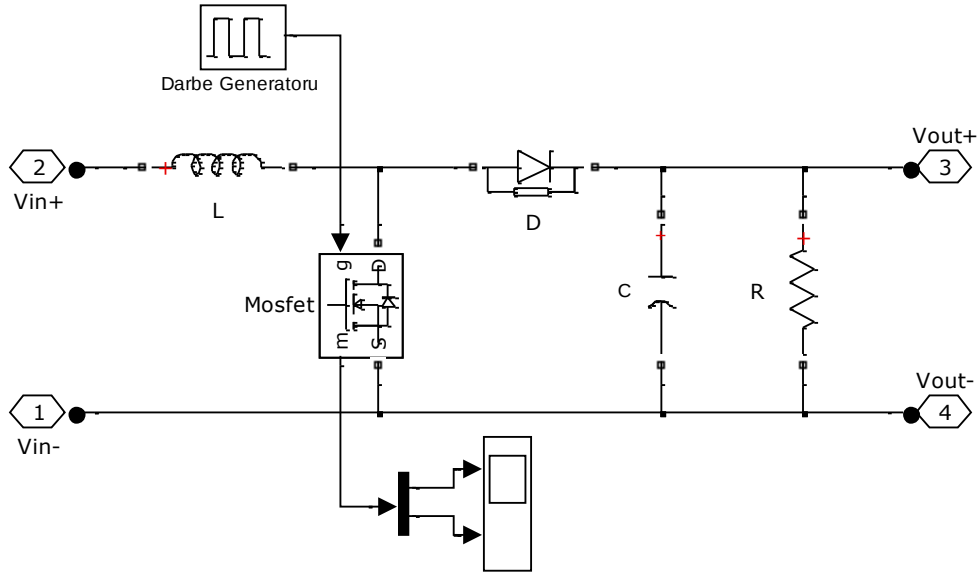
Matlab/Simulink ortamında geliştirilen fotovoltaik panel modeli Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Fotovoltaik panel modeli

4.2.3. DC/DC Konverter Modeli

DC/DC konverterler yakıt pili sistemlerinde, değişken yakıt pili gerilimini yükselterek sabit çıkış gerilimi elde etmek için oldukça önemlidirler. Yakıt pilinin çıkış gerilimini arttırmak amacı ile yakıt pilinin çıkışına yükseltici bir konverter bağlanır. Yükseltici konverterin blok diyagramı Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Boost konverter, giriş gerilimine ve gerekli çıkış gerilimine bağlı olarak tasarlanır. Konverterin giriş gerilimi, 48 V’luk gerilimden 310 V ile 312 V arasında dalgalanan doğru bir gerilime yükseltilmiştir. Kullanılan devre elemanlarının değerleri bu şartlara göre hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Yükseltici konverter modeli

Yükseltici konverterde çıkış gerilimi her zaman giriş geriliminden daha büyüktür. Yüksek güç faktörlü doğrultucularda kullanılır.

$$\Delta I_L = \frac{V_S \cdot dT}{L} = - \frac{(V_S - V_0) \cdot (1-d) \cdot T}{L} \quad (4.19)$$

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{1-d} \quad 0 < d < 1 \quad (4.20)$$

$$I_0 = \frac{\hat{I}_L + \tilde{I}_L}{2} \cdot (1-d) \quad (4.21)$$

Bu denklemlerde; V_S yakıt pili çıkış gerilimi, V_0 : konverter çıkış gerilimi, d : görev periyodu, I_0 : yük akımı, T : periyod, L : indüktansın değeri, ΔI_L : indüktans akımının değişimi, $\hat{I}_L$: indüktans akımının maksimum değeri, $\tilde{I}_L$: indüktans akımının minumum değeridir [85].

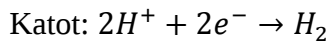
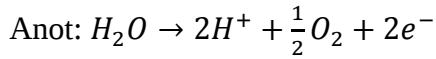
4.2.4. İnverter Modeli

Şebekeden bağımsız çalışan evsel yakıt pili sistemlerinde güç inverterlerinin tasarımı oldukça önemlidir. Bu sistemlerde kullanılan inverterlerden beklenen özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Değişken yakıt pili çıkış geriliminden 220, 50 Hz AC çıkış gerilimi üretebilmeli,

4.2.5. Elektrolizör Modeli

Elektrolizörler, elektrik enerjisini kullanarak, suyu hidrojene ve oksijene ayıran elemanlardır. Anot ve katotta oluşan reaksiyonlar aşağıda verildiği gibi gerçekleşir.



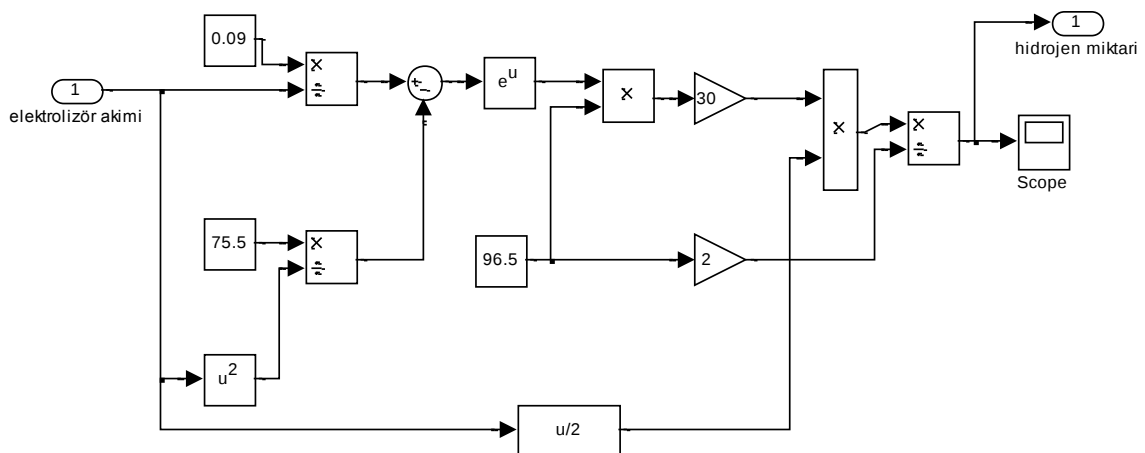
Bir elektrolizör hücresinin hidrojen üretim oranı, eşdeğer elektrolizör devresindeki elektriksel akımla doğrudan orantılıdır. Denklem (4.22)'de bu oran verilmiştir [84,87].

$$\eta_{H_2} = \frac{\eta_F \eta_C i_e}{2F} \quad (4.22)$$

Elektrolizör modelinin parametreleri: η_{H_2} her bir saniyede üretilen hidrojen molü [mol/s], η_c seri elektrolizör hücre sayısı, i_e elektrolizör akımı (A) ve F Faraday sabitidir (C/kmol). Elektrolizörün çalışma sıcaklığı 40 °C olarak kabul edilmiştir. Faraday verimi, elektrolizörde üretilen hidrojenin teorik olarak maksimum ve gerçek miktarı arasındaki bir orandır. Faraday verimi (η_F) denklem (4.23) ile hesaplanır [84];

$$\eta_F = 96,5e^{(\frac{0,09}{i_e} - 75,5/i_e^2)} \quad (4.23)$$

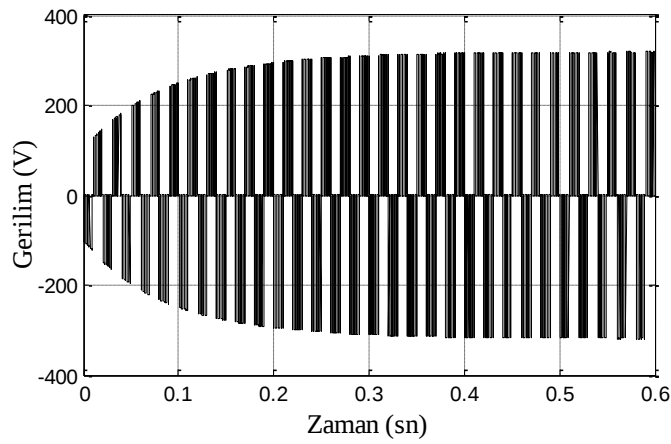
Bu denklemler kullanılarak Matlab/Simulink ortamında basit bir elektrolizör modeli geliştirilmiştir. Bu model Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



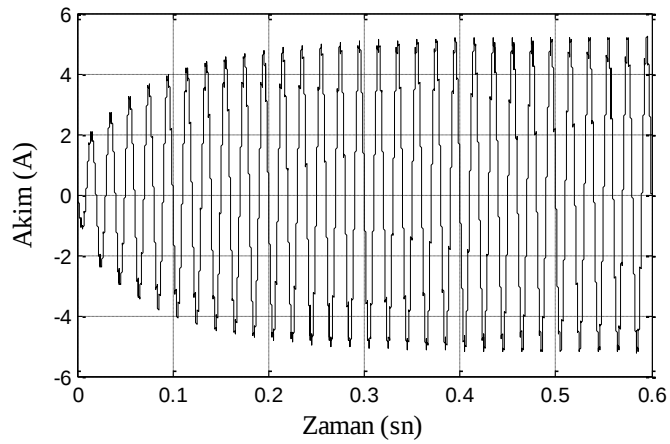
Şekil 4.7. Elektrolizör modeli

4.3. Yakıt Pili Sisteminin Yük Analizi

PEMFC sistem modeli için benzetim zamanı 0,6 saniye seçilmiştir. Yakıt pili sisteminde inverterin çıkışına bir RLC yükü bağlanmıştır. $R=50 \Omega$, $L=100 \text{ mH}$ ve $C=1,013.e^{-4} \text{ F}$ olarak seçilirse devrede rezonans meydana gelir. Bu durumda, inverter çıkış gerilimi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekil 4.8’den görüldüğü gibi inverter yaklaşık olarak şebeke gerilimine uygun bir sinüzoidal gerilim üretmektedir. Yük akımının zamana göre değişimi ise Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Akım ile gerilim arasında faz farkı yoktur.

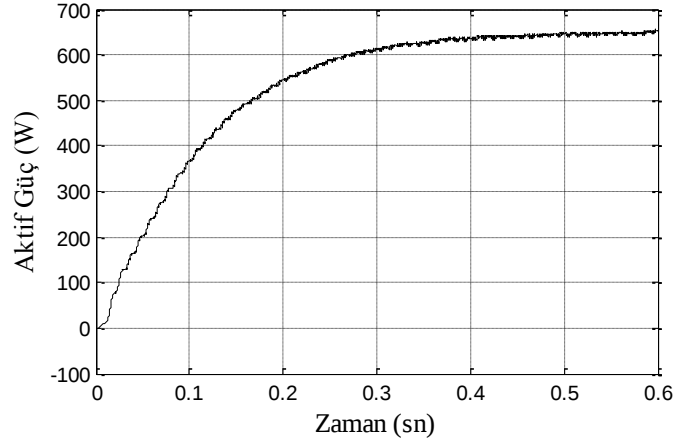


Şekil 4.8. Omik yük için inverter çıkış gerilimi



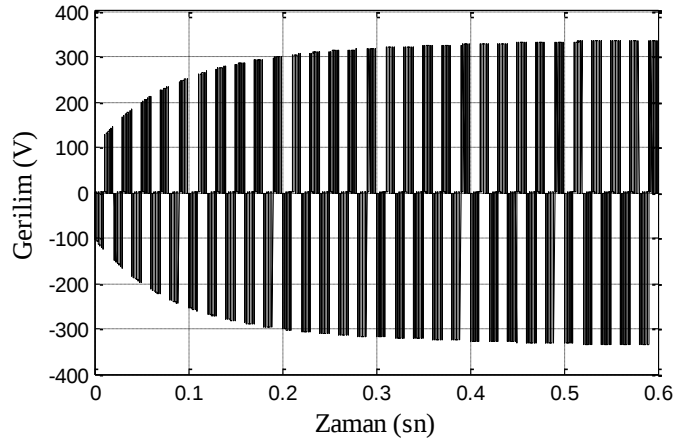
Şekil 4.9. Omik yük için yük akımı

Rezistif yük analizi durumunda elde edilen aktif güç eğrisi ise Şekil 4.10’da gösterilmiştir.

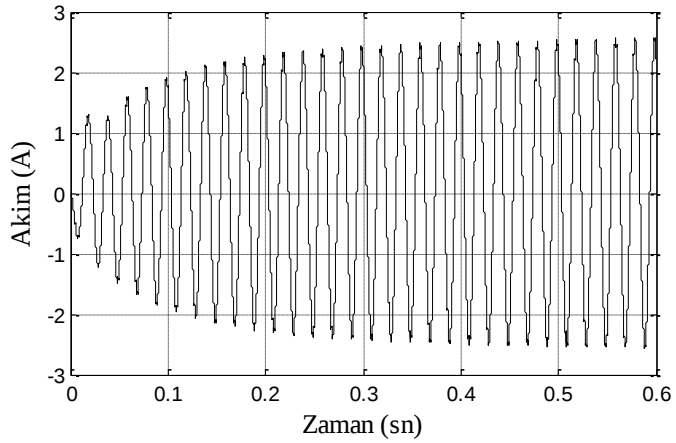


Şekil 4.10. Omik yük için aktif gücün değişimi

İndüktif yük analizi için, $R=50 \Omega$, $L=400 \text{ mH}$ ve $C=1,013.e^{-4} F$ olarak seçilmiştir. Bu konfigürasyon için inverter çıkış gerilimi ve yük akımı sırasıyla Şekil 4.11 ve 4.12’de verilmiştir.

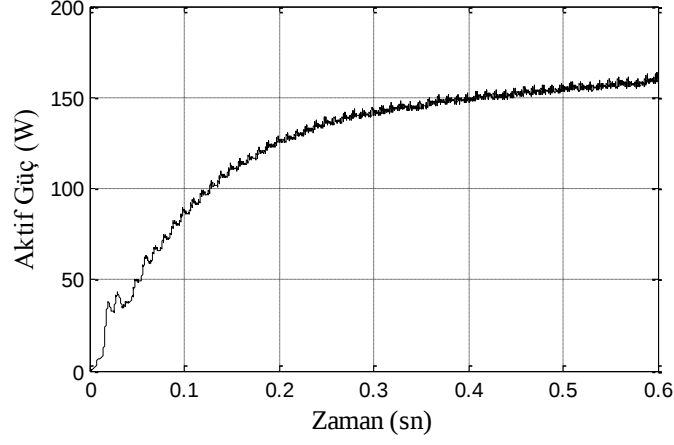


Şekil 4.11. İndüktif yük için inverter çıkış gerilimi

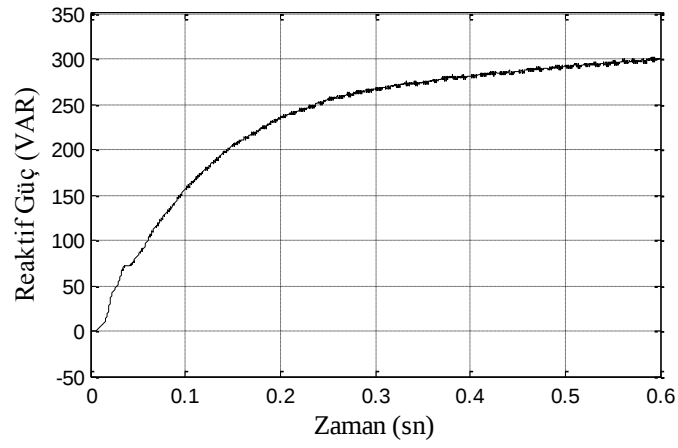


Şekil 4.12. İndüktif yük için yük akımı

İndüktif yük için elde edilen aktif ve reaktif güç eğrileri ise Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

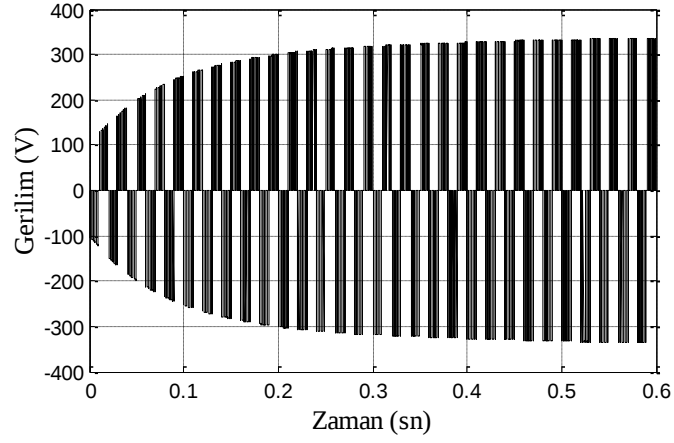


Şekil 4.13. İndüktif yük için aktif gücün değişimi

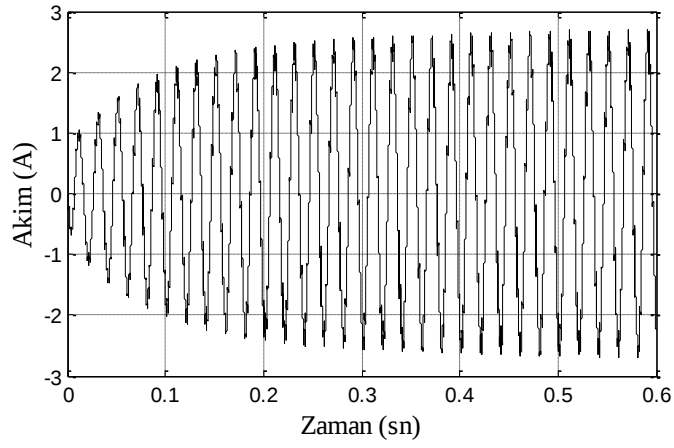


Şekil 4.14. İndüktif yük için reaktif gücün değişimi

Kapasitif yük analizi için $R=50 \Omega$, $L=100 \text{ mH}$ ve $C=0,2532.e^{-4} \text{ F}$ seçilmiştir. Bu durum için akım ve gerilim grafikleri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

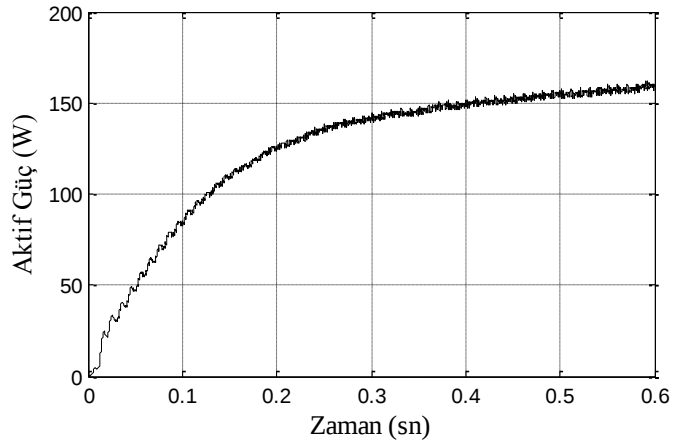


Şekil 4.15. Kapasitif yük için inverter çıkış gerilimi

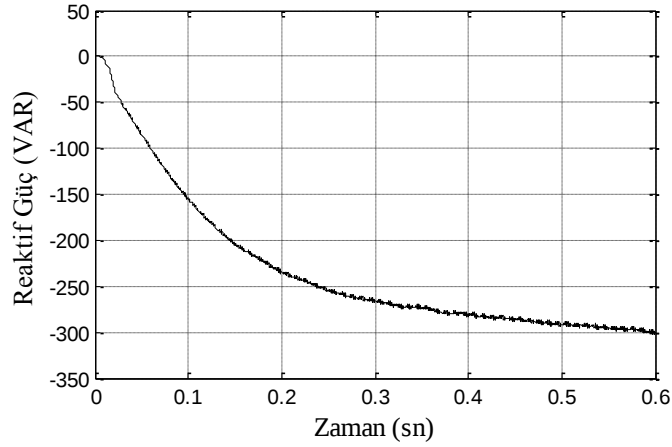


Şekil 4.16. Kapasitif yük için inverter çıkış gerilimi

Kapasitif yük için aktif ve reaktif güç eğrileri ise Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Kapasitif yük için aktif gücün değişimi



Şekil 4.18. Kapasitif yük için reaktif gücün değişimi

Bu benzetimde, bir solar hidrojen sistemi, omik, indüktif ve kapasitif yükler için modellenmiştir. Yükün indüktans ve kapasitesinde gerilim düşümü önemlidir.

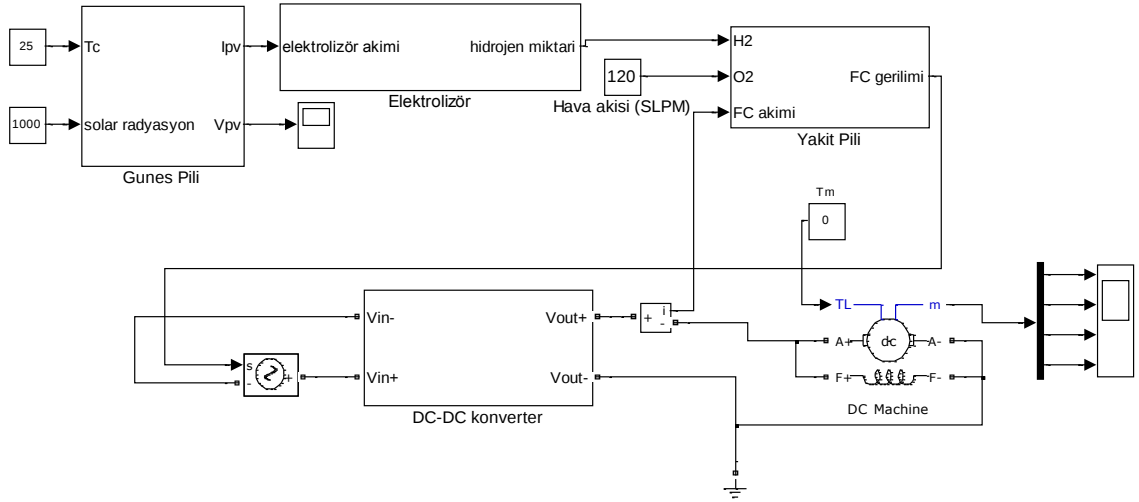
Hidrojen ve oksijen girişi sabit bir akışa sahip olduğu müddetçe yakıt pili yükün değişimini gözetmeksizin yüke gerilim sağlar. Sistem yaklaşık 0,4 saniye sonra kararlı duruma geçmektedir. Bu yakıt pilinden küçük güçlü bir yükü beslemek için, yakıt girişi ile kontrol edilen bir sistem gereklidir.

Akım ve gerilim eğrilerinden görüldüğü gibi, yük değişimi sistem çıkış gerilimini etkilememektedir. Ancak, farklı yükler için sistemden doğal olarak farklı akımlar çekilmektedir.

Güç eğrilerinden de görüldüğü gibi rezistif yükler için reaktif güç yaklaşık olarak sıfırdır. Reaktif güç değişimi indüktif ve kapasitif yükler için zıt yöndedir.

4.4. Yakıt Pili Sisteminin DC Motor Analizi

Fotovoltaik hücrelerde solar enerji doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Fotovoltaik modüllerin matematiksel denklemi ve kullanılan parametreler; Bölüm 4.2’de verilmiştir.



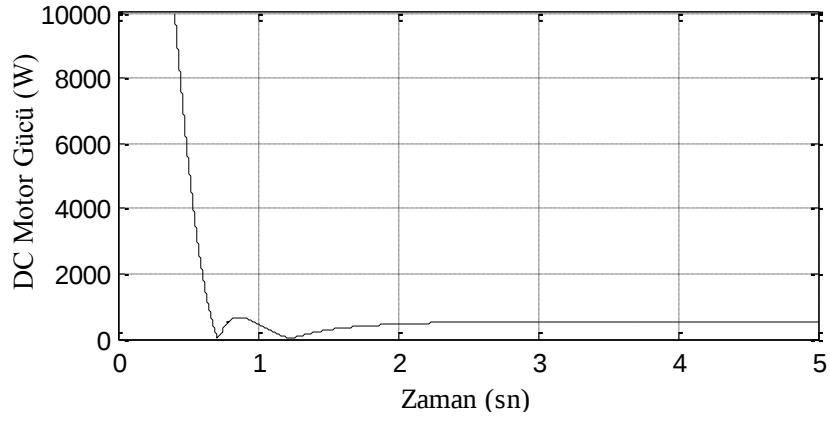
Şekil 4.19. DC motorlu PV-Yakıt Pili sisteminin blok diyagramı

Yakıt pilleri ise hidrojen ve oksijenin kimyasal reaksiyonu ile elektrik üretebilmektedir. Yakıt pili denklemleri ise Bölüm 4.2.1’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 4.19’da gösterilen yakıt pili bloğunun girişi hidrojen ve oksijen gazıdır. Yakıt pilinin çıkışı daha sonra, DC-DC konverter bloğuna girer. Konverterin çıkışı ise doğru akım motor akımıdır.

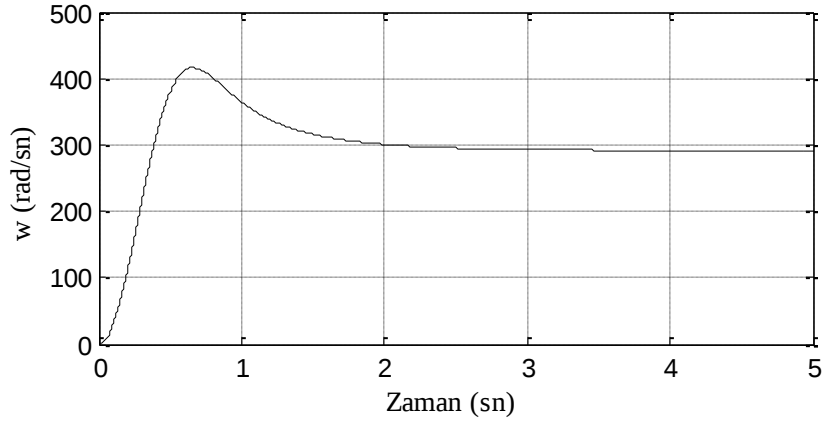
Bu benzetim sisteminde 5 BG, 240 V’luk şönt bağlı bir doğru akım motoru kullanılmıştır. Yakıt pilinin gücü ise 5 kW’dır. Yakıt pili yığınınındaki her bir hücre 0,9 V gerilim üretmektedir, yığın gerilimi ise 31,5 V’tur. Öncelikle DC motor yüksüz ($T_m=0$) olarak çalıştırılmıştır. Bu durumda DC motorun güç, hız ve akım eğrileri sırasıyla Şekil 4.20-Şekil 4.22’de verilmiştir. DC motorun kalkış esnasında fazla akım çekmesi sebebiyle daha fazla güç harcadığı Şekil 4.20’den de açıkça görülmektedir.

Daha sonra, DC motorun yüklü ($T_m=10$ N.m) durumu incelenmiştir. Bu durumda her bir hücre 0,79 V gerilim üretirken yığın gerilimi ise 27,7 V’tur. Benzetim zamanı 5 saniye olarak seçilmiştir. 3,5 saniye sonra sistem kararlı hale gelmektedir. Yüklü durumdaki DC motorun eğrileri Şekil 4.23-Şekil 4.25’de verilmiştir. Şekil 4.23’ten de görüldüğü gibi yüksüz duruma göre yüklü durumda daha fazla güç harcanmıştır. Şekil 4.24’ten motor hızının yük artışına bağlı olarak azaldığı görülmektedir.

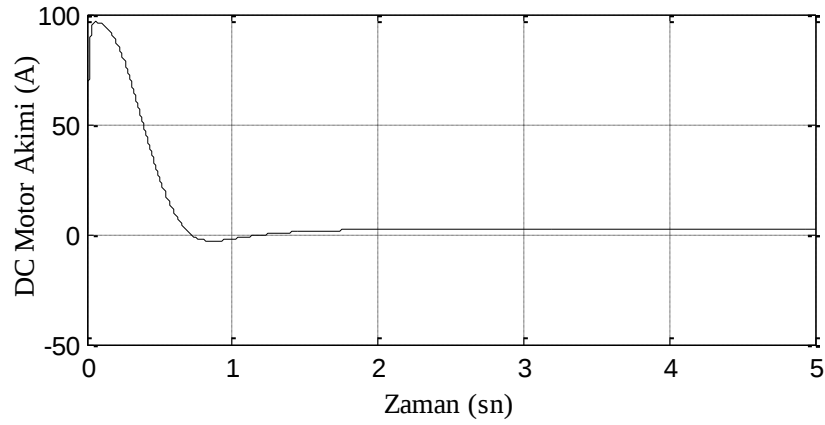
Şekil 4.20-Şekil 4.25’de verilen doğru akım makinasına ait grafiklerin başlangıç anındaki anlık değişimler, Şekil 3.2’de verilen yakıt pilinin karakteristiğinden kaynaklanmaktadır.



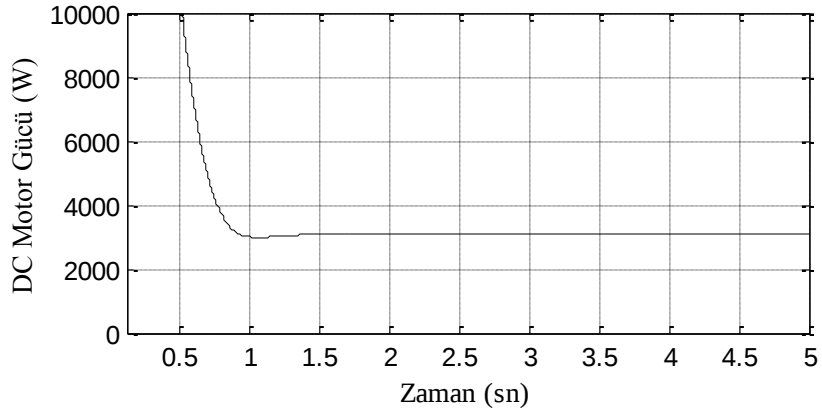
Şekil 4.20. DC motor gücü (yüksüz durum)



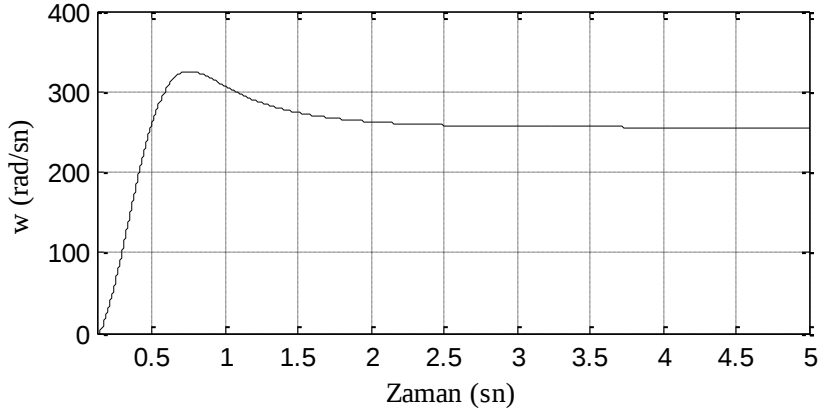
Şekil 4.21. DC motor hızı (yüksüz durum)



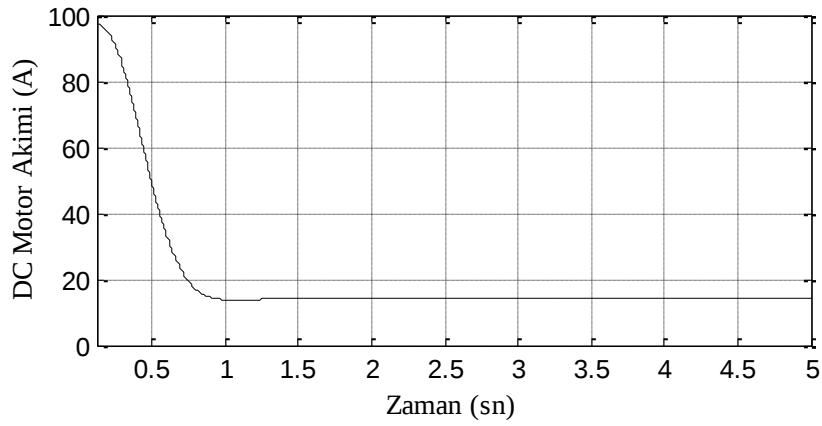
Şekil 4.22. DC motor akımı (yüksüz durum)



Şekil 4.23. DC motor gücü ($T_m=10$ N.m)



Şekil 4.24. DC motor hızı ($T_m=10$ N.m)

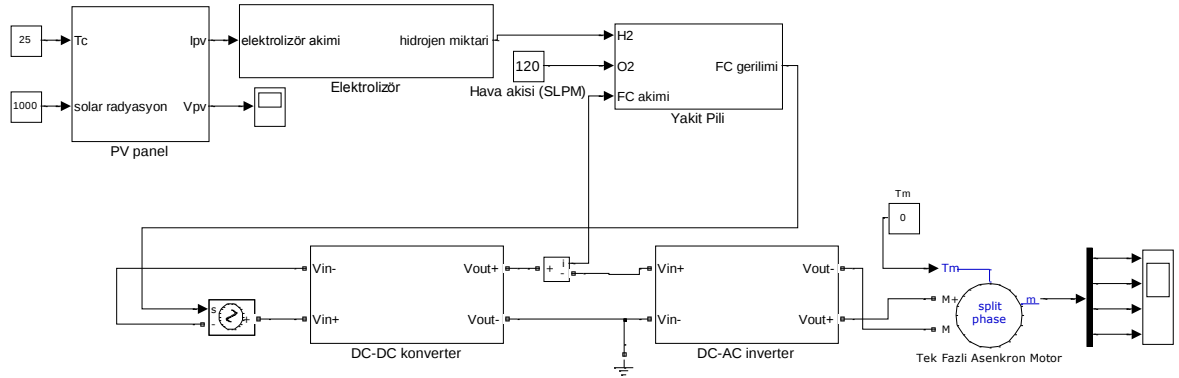


Şekil 4.25. DC motor akımı ($T_m=10$ N.m)

4.5. Yakıt Pili Sisteminin AC Motor Analizi

Fotovoltaik paneller ya da yakıt pilleri gibi doğru gerilim üreten güç sistemleri, doğru gerilimi alternatif gerilime dönüştürecek bir güç dönüşüm ünitesine ihtiyaç duyarlar. Bu güç, dağıtım şebekesi veya iletim hattına bağlanabilmelidir. AC ve DC taraflar arasındaki güç akışının kontrol edilebildiği diğer uygulamalar da vardır. Tüm durumlar için güç düzenleme ünitesi kullanılmıştır. Güç düzenleme ünitesi, DC gerilimi AC gerilimine dönüştüren bir inverter, DC gerilimi istenilen gerilim seviyesine yükselten bir konverter gibi elektronik üniteleri içerir.

Bu benzetimde, DC/DC konverterin giriş gerilimi 30 V, çıkış gerilimi ise 240 V olarak seçilmiştir. Konverterin ideal olduğu yani veriminin %100 olduğu kabul edilmiştir. İndüktans, kondansatör ve anahtardan dolayı gerçek verim %100'den daha azdır. PEM yakıt pili uygulamalarında kullanılan yükseltici konverterlerin verimi %95 civarındadır.



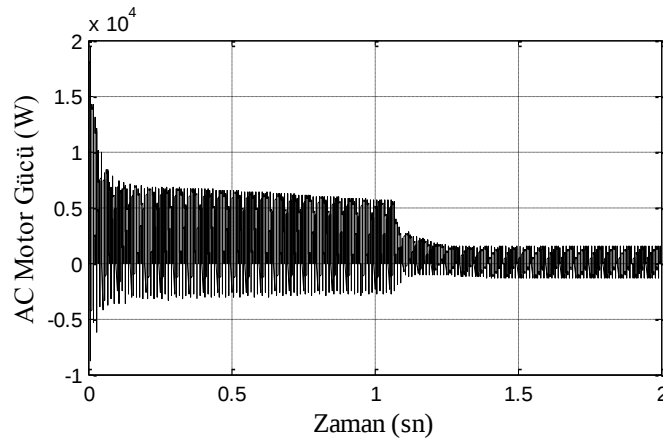
Şekil 4.26. AC motorlu PV-Yakıt Pili sisteminin blok diyagramı

Şekil 4.26'daki benzetimde, AC motoru olarak tek fazlı asenkron makina kullanılmıştır. Öncelikle AC motorunun yüksüz durumu incelenmiştir. AC motorunun güç, hız ve akım eğrileri sırasıyla Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'da verilmiştir. Sistem 1,5 saniyeden sonra kararlı hale geçtiği için benzetim zamanı 2 saniye olarak seçilmiştir. Yakıt pili yığınındaki her bir hücre 0.93 V iken yığın gerilimi ise 32,6 V olarak ölçülmüştür.

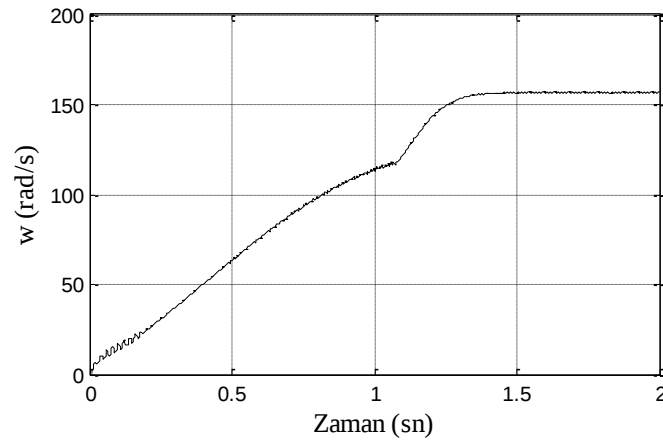
Daha sonra AC motorun yükte çalışma ($T_m=1$ N.m) durumu incelenmiştir. Sırasıyla Şekil 4.30-4.32 AC motorun güç, hız ve akım eğrileridir. Bu durum için benzetim zamanı 3

saniye seçilmiştir. Çünkü yaklaşık 2,5 saniye sonra sistem kararlı hale geçmiştir. Her bir hücrenin ürettiği gerilim 0.81 V iken yığın gerilimi ise 28,3 V'dur.

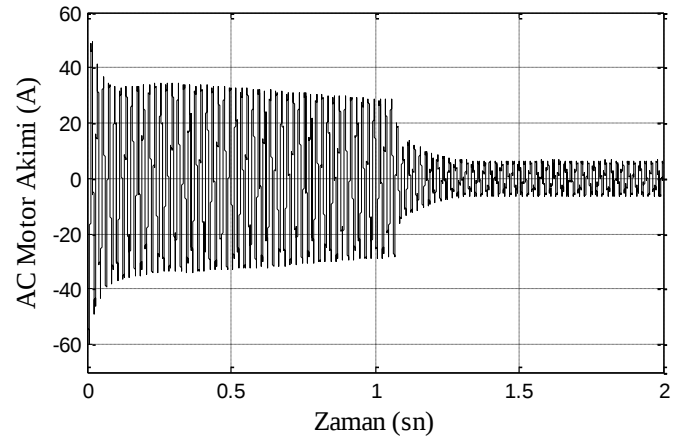
Şekil 4.28 ve Şekil 4.31'den AC motorun hızının yüksüz durumda iken daha erken kararlı duruma geçtiği görülmektedir. Şekil 4.27 ve 4.30'dan da görüldüğü gibi AC motor yüklü durumda daha fazla güç harcamaktadır. Her iki durumda da başlangıç anında motorun daha fazla akım çektiği Şekil 4.29 ve Şekil 4.32'den görülmektedir. Fakat AC motor yüklü duruma göre yüksüz durumda daha uzun süre akım çekmiştir.



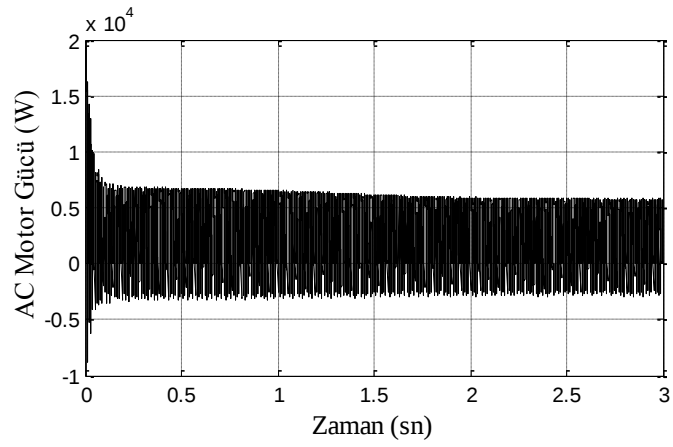
Şekil 4.27. AC motor gücü (yüksüz durum)



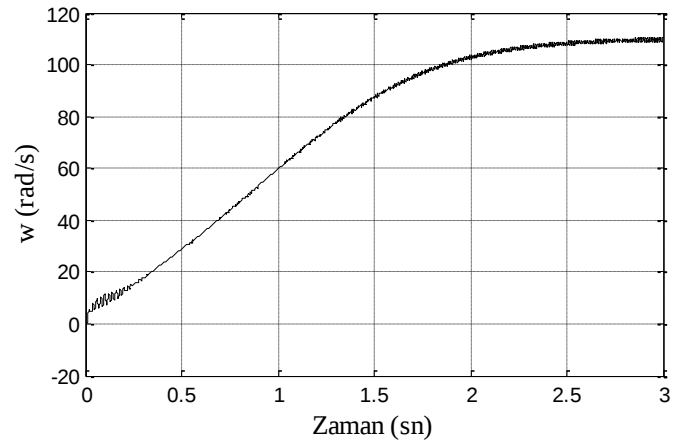
Şekil 4.28. AC motor hızı (yüksüz durum)



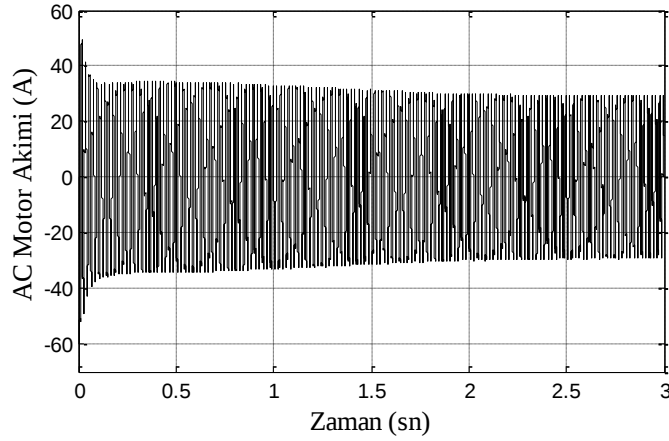
Şekil 4.29. AC motor akımı (yüksüz durum)



Şekil 4.30. AC motor gücü ($T_m=10$ N.m)



Şekil 4.31. AC motor hızı ($T_m=10$ N.m)



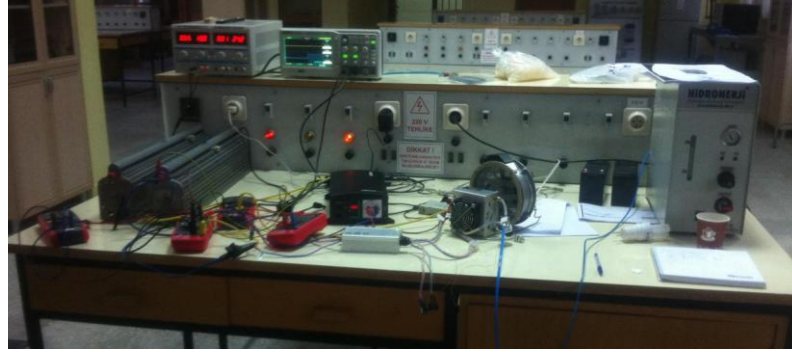
Şekil 4.32. AC motor akımı ($T_m=10$ N.m)

Sonuç olarak, bu benzetimin amacı, PV-FC sistemleri ile birlikte elektrik motorlarının çalıştırılması ve etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla, yakıt piline hidrojen sağlamak için PV paneller, elektrik motorlarına gerekli enerjiyi sağlamak için ise yakıt pilleri kullanılmıştır. Böylece, yakıt pillerinin elektrik motorlarının sürücü sistemlerinde kullanılabilirliği gösterilmiştir. Elektrik motorlarında PV-FC hibrit sisteminin kullanımı ile ekonomik kazanç sağlanabilir. Elektriksel uygulamalar için bu hibrit sistem daha uygundur. Çünkü hidrojen üretimi için ek bir kaynağa ya da maliyete gerek yoktur. Daha sonraki çalışmalarda bu sistem farklı elektrik motorlarının çalıştırılması için kullanılabilir. Bunun yanında, aynı sistem farklı yük şartlarında aynı tür motorlarda da kullanılabilir.

5. YAKIT PİLİ-GÜNEŞ PİLİ HİBRİT SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

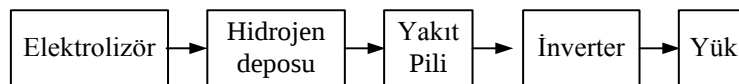
5.1. Yakıt Pili Sistemi

Deneyel çalışmada kullanılan 100 W'lık bir PEM yakıt pili sistemi Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Deney Düzeneği

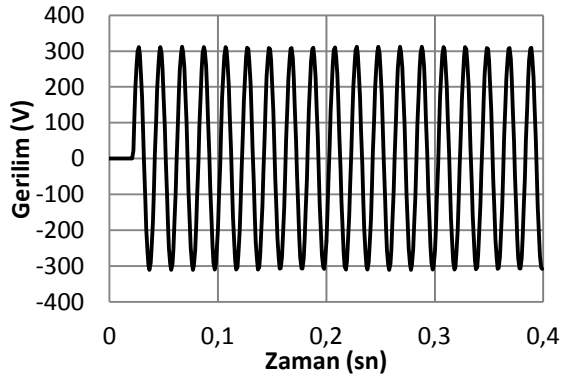
Deney düzeneğindeki yakıt pili için hidrojen temini elektrolizör ünitesinden sağlanmaktadır. Elektrolizör sonucu elde edilen hidrojen gazı yüksek basınçlı bir tüpte depo edilmektedir. Hidrojen; 0,55 bar sabit basınçla yakıt pilinin anot kanalını beslemektedir. Yakıt pilinin çıkışına bağlı inverter sayesinde üretilen doğru gerilim alternatif gerilime dönüştürülmüştür. İnverter çıkışına ise farklı dirençler bağlanarak yakıt pilinin akım-gerilim karakteristikleri incelenmiştir. Yükün akım ve gerilimini incelemek için bir akım-gerilim dönüştürücü devre kullanılmıştır. Bu devreden alınan verileri gözlemlemek ve kaydetmek için ise bir veri toplama cihazı ile birlikte LabVIEW arayüzünden faydalanılmıştır. Sistemin genel blok diyagramı ise Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



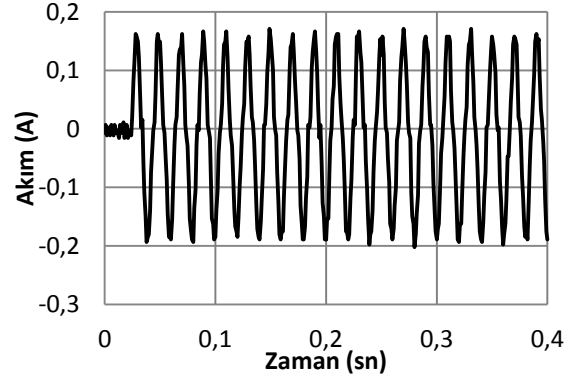
Şekil 5.2. Sistemin Blok Diyagramı

100 W'lık bir PEM yakıt pili ile yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Yakıt pilinin çıkışına 1,8 k Ω , 1,2 k Ω ve 0,7 k Ω değerinde dirençler bağlanarak akım gerilim eğrileri gözlenmiştir. Bu eğriler, Şekil 5.3-Şekil 5.8 arasında gösterilmiştir.

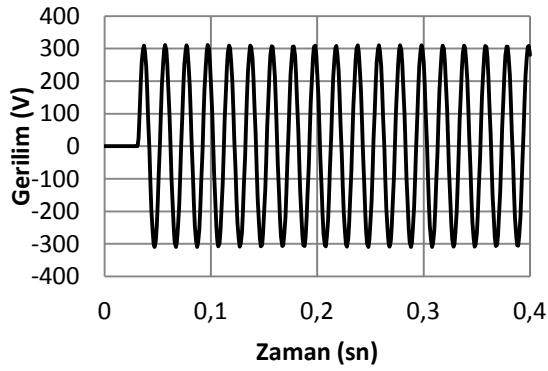
Şekil 5.4, Şekil 5.6 ve Şekil 5.8'den görüldüğü gibi yakıt pili sisteminin yüklenmesine bağlı olarak çekilen akım artmıştır.



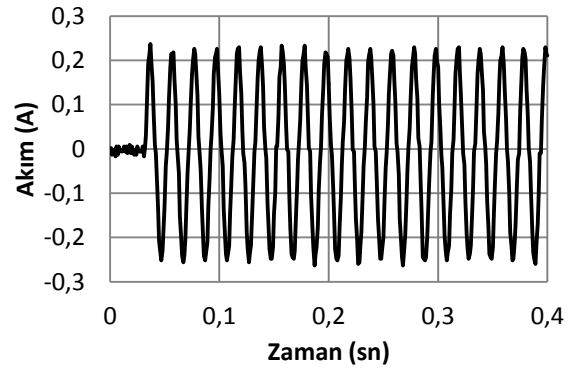
Şekil 5.3. 1,8 k Ω için çıkış gerilimi



Şekil 5.4. 1,8 k Ω için yük akımı

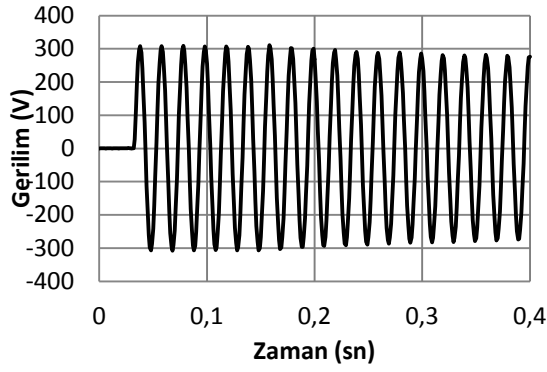


Şekil 5.5. 1,2 k Ω için çıkış gerilimi

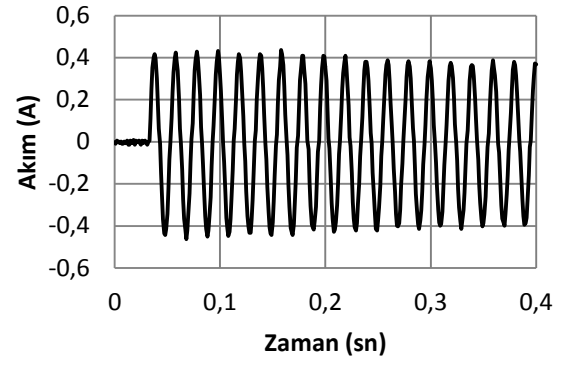


Şekil 5.6. 1,2 k Ω için yük akımı

Şekil 5.3, Şekil 5.5 ve Şekil 5.7'de görüldüğü gibi gerilimin tepe değeri yaklaşık 311 V'dur. Yüklenmenin artmasıyla birlikte Şekil 5.7'den görüldüğü gibi gerilimin tepe değerinde bir miktar düşme gözlenmiştir.

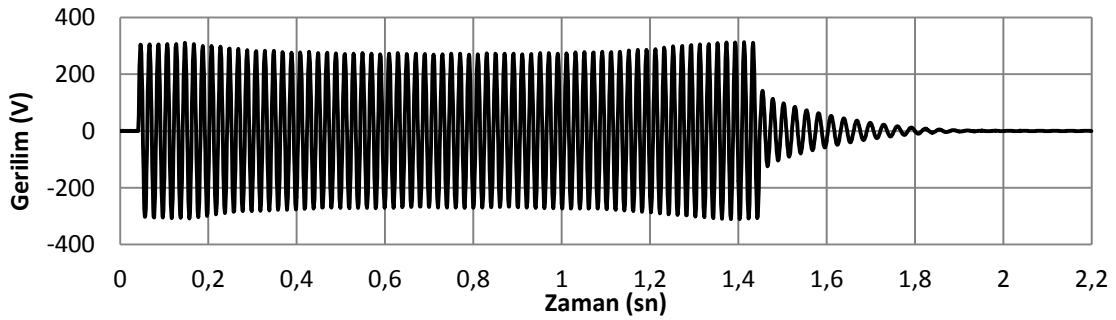


Şekil 5.7. 0,7 kΩ için çıkış gerilimi

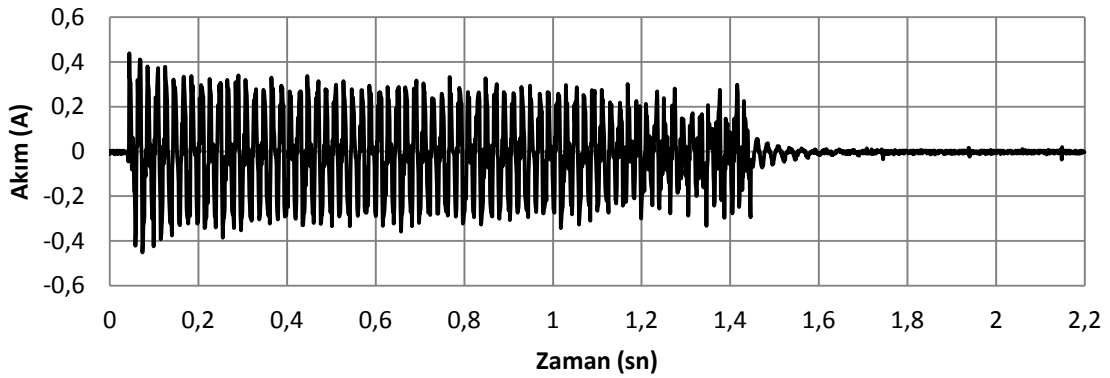


Şekil 5.8. 0,7 kΩ için yük akımı

Ayrıca yakıt pilinin çıkışına, direnç değeri $8,77 \Omega$, indüktans değeri $33,73 \text{ mH}$, kapasite değeri ise 750 nF olan yaklaşık 50 W gücünde bir fan bağlanarak yine akım-gerilim eğrilerindeki değişim elde edilmiştir. Şekil 5.9’da çıkış gerilimi, Şekil 5.10’da ise yük akımı görülmektedir. Yaklaşık 1,4 saniye sonunda inverterin devreden çıkmasıyla fan yavaşlayarak durmuştur.

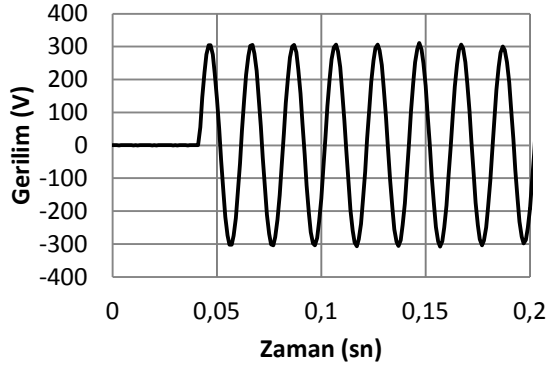


Şekil 5.9. Fan gerilimi

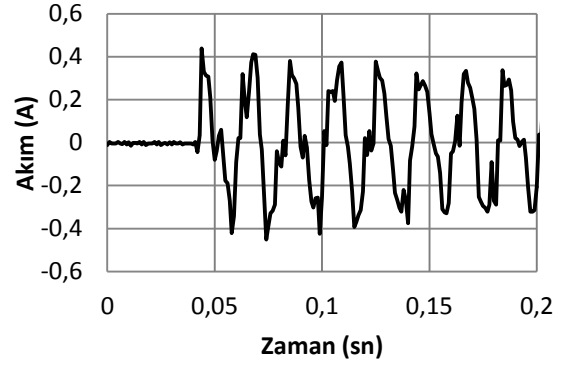


Şekil 5.10. Fan akımı

Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de ise fan gerilimi ve akımının 0-0,2 saniye aralığındaki değişimi verilmiştir. Gerilim eğrisi akım eğrisine göre oldukça düzgün bir sinüzoidal eğridir.



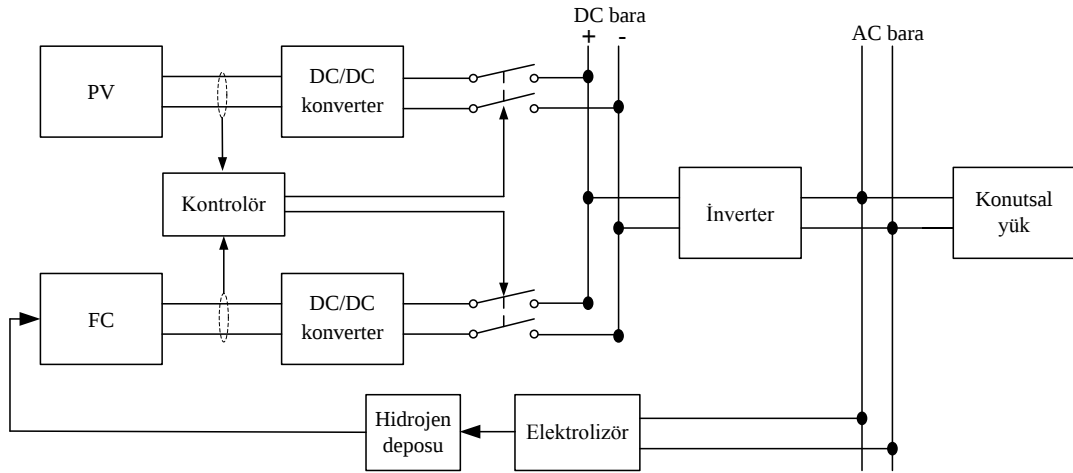
Şekil 5.11. Fan gerilimi (0-0,2 sn)



Şekil 5.12. Fan akımı (0-0,2 sn)

5.2. Yakıt Pili-Güneş Pili Sistemi

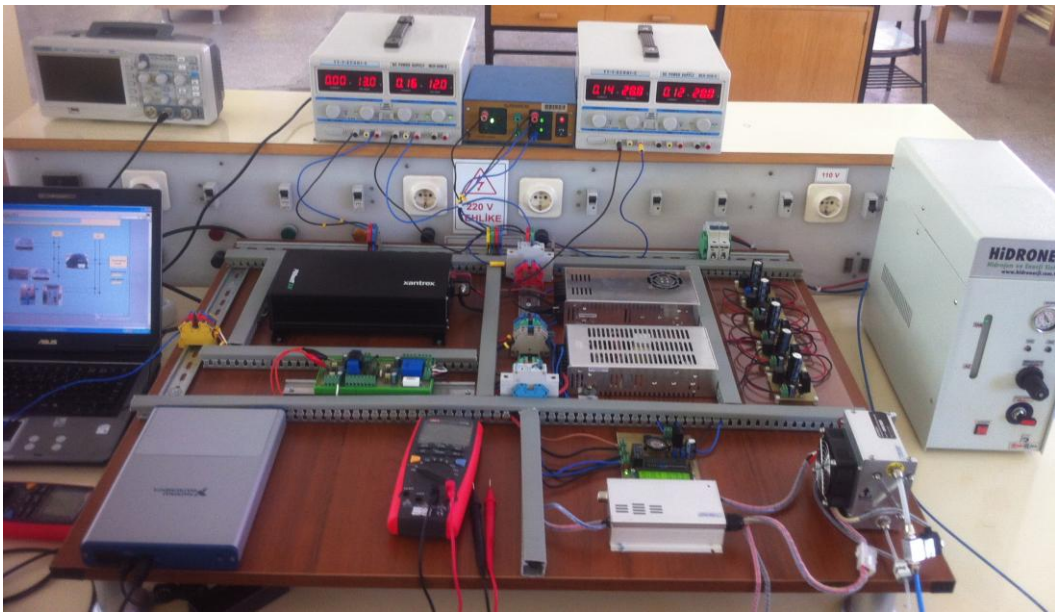
Bu bölümde iki enerji üretim kaynağının kullanıldığı bir hibrit sistemin hem deneysel hem de benzetim çalışması incelenmiştir. Bu enerji kaynakları güneş ve hidrojendir. Tasarlanan hibrit sistemin açık devre hali Şekil 5.13’de verilmiştir. Bu sistemde yakıt işleme birimi ise; elektrolizör ve hidrojen deposundan oluşmaktadır. Elektrolizör ünitesi deneysel düzeneğe olduğu gibi AC kaynaktan beslenmektedir. DC/DC konverterler ve DC/AC inverter ise güç düzenleme biriminin elemanlarıdır. Ayrıca deneysel düzeneğe enerji akışını belirleyen bir de kontrol devresi mevcuttur. Böylelikle güneşin olduğu zamanlarda PV sistem devrede olacak, güneş ışığının yetersiz olduğu saatlerde ve gece boyunca yakıt pili devreye girerek çıkış yükünü besleyecektir.



Şekil 5.13. Gerçekleştirilen hibrit sistemin devre şeması

5.2.1. Deneysel Çalışma

Laboratuvar ortamında kurulan yakıt pili-güneş pili sisteminin deney düzeneği Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Deneyde kullanılan yakıt pili 100 W gücünde olup, Şekil 5.15'te görüldüğü gibi PEM tipi bir yakıt pilidir. İkinci enerji kaynağı olarak ise Şekil 5.16'da gösterilen üç tane güneş paneli kullanılmıştır. Kurulan panellerin her birinin gücü 160 W değerindedir. Deneyler esnasında ise sadece bir tanesi kullanılmıştır.



Şekil 5.14. Deney düzeneği



Şekil 5.15. PEM Yakıt Pili



Şekil 5.16. Güneş Pilleri

Deney düzeneğindeki yakıt piline hidrojen temin etmek için Şekil 5.17'deki elektrolizör ünitesi kullanılmıştır. Elektrolizör sonucu elde edilen hidrojen gazı Şekil 5.18'de gösterilen yüksek basınçlı bir tüpte depo edilmektedir. Hidrojen; 0,55 bar sabit basınçla yakıt pilinin anot kanalını beslemektedir.



Şekil 5.17. Elektrolizör



Şekil 5.18. Hidrojen tüpü

Yakıt pili çıkış gerilimi yüke bağlı olarak 5-20 V arasında değişmektedir. İnverter girişi ise yaklaşık 12 V DC gerilim ile beslenmektedir. Bu bağlamda yakıt pili geriliminin sabitlenebilmesi gerekmektedir. Ticari olarak satılan konverterler bu şartları sağlamadığından değişken gerilimi sabitlemek için Şekil 5. 19'da verilen özel bir konverter devresi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu DC-DC dönüştürücü; giriş gerilim aralığı 5-20 V, çıkış gerilimi ise 36 V olan MC34063 entegresiyle yapılmış bir konverterdir. Piyasadaki konverterlerin çıkış akımları küçüktür. Burada ise çıkış akımını

arttırmak için aynı tasarımdan 5 tane paralel olarak bağlanmıştır. Çıkış gerilimine ait geri besleme bilgisi her bir konvertere ayrı ayrı uygulanarak senkronizasyon sağlanmıştır. Bu konverterde master-slave yapısı kullanılmıştır. Master konverterin geri beslemesine uygulanan sinyal diğer slave konverterlere de uygulanarak konverterin paralel çalışma durumu sağlanmıştır. Çıkıştaki diyot koruması nedeniyle konverterlere ters akım söz konusu değildir. Bu konverter devresinin çıkışına ise Şekil 5.20’de görülen 200 W gücünde, giriş gerilim aralığı 19-36 V, çıkış gerilimi ise 12 V olan alçaltıcı bir konverter eklenmiştir.

PV panel için de 500 W gücünde, giriş gerilim aralığı 19-72 V, çıkış gerilimi ise 12 V olan, Şekil 21’de gösterilen bir alçaltıcı konverter kullanılmıştır. Şekil 5.22’de görülen 700 W’lık inverter giriş gerilimi de 12 V DC olduğundan her iki güç kaynağı için de uyumludur.



Şekil 5.19. Tasarlanan konverter



Şekil 5.20. 200 W alçaltıcı konverter



Şekil 5.21. Güneş pili için kullanılan alçaltıcı konverter

İnverter çıkışına ise farklı güçte akkor flamanlı lambalar bağlanarak yakıt pilinin akım-gerilim karakteristikleri incelenmiştir. Bu karakteristiklerin elde edilmesi için bir elektronik ölçme kartı kullanılmıştır. Şekil 5.23'te gösterilen elektronik ölçüm kartında akım ve gerilim bilgilerinin alınabilmesi için, akım ve gerilim sensörleri kullanılmıştır. Gerilim dönüştürücüsü olarak, ölçme aralığı 0-500 V olan LV25-P model gerilim dönüştürücüsü, akım için ise LA 55-P model akım sensörü kullanılmıştır.

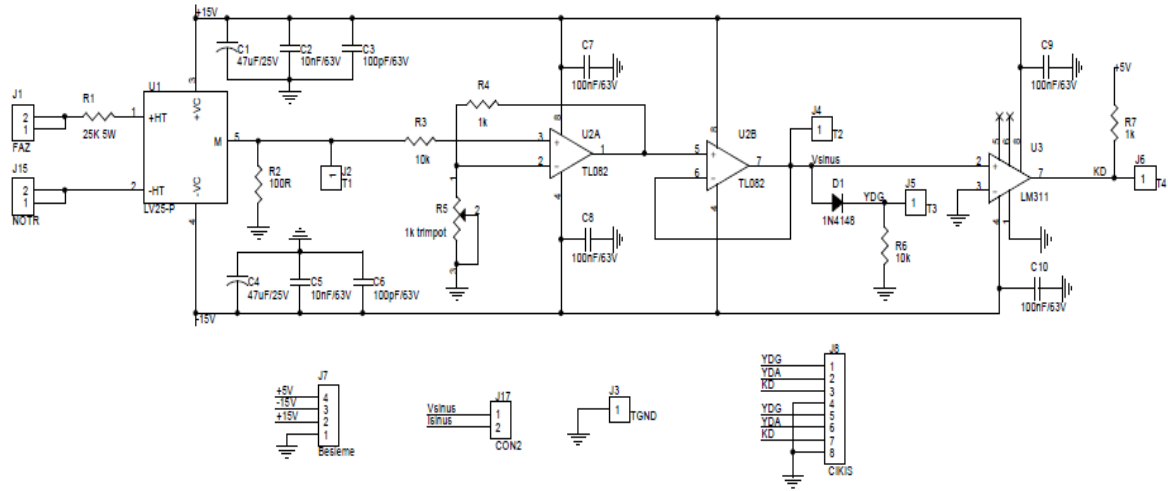


Şekil 5.22. İnverter



Şekil 5.23. Elektronik ölçüm kartı

Elektronik ölçüm kartındaki gerilim ve akım bilgisinin elde edilmesine ilişkin devre prensip şeması, Şekil 5.24'te gösterilmiştir. Devrenin girişine faz ve nötr uçları ile tek fazlı AC gerilim uygulanmaktadır. Gerilim sensörü ile uygun gerilim seviyesine düşürülen giriş geriliminin genliği, kuvvetlendirme devresine bağlı bulunan ayarlı direnç ile istenilen çıkış gerilim seviyesine ayarlanabilmektedir. Kuvvetlendirici çıkışında elde edilen sinüs işareti, yarım dalga doğrultucu devresi ile doğrultulmaktadır. Yarım dalga doğrultucu çıkışında ise LM311 entegresi ile sinyal kare dalgaya dönüştürülmektedir. Elde edilen kare dalga sinyali, LabVIEW ünitesi girişine uygulanarak, işaretin frekansı hesaplanmaktadır.



Şekil 5.24. Gerilim ve akım bilgisinin elde edilmesine ilişkin devre prensip şeması

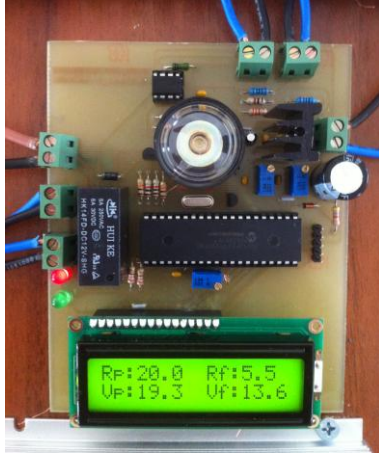
Şekil 5.25’de hibrit sistemin kontrol devresinin iç yapısı görülmektedir. Devre, 12 V DC gerilim kaynağından beslenmektedir. Yakıt pili ve güneş pilinin çıkış gerilimleri PIC mikrokontrolörünün analog girişlerine doğrudan uygulanamayacağı için bir gerilim bölücü ile PIC mikrokontrolörün algılayabileceği maksimum 5 V değerine düşürülür. Bu değer sayısal olarak algılandıktan sonra ilgili dönüşümler yapılarak gerçek gerilim değerleri hesaplanır. Bu hesaplanan gerilim değerlerine göre güneş pilinin gerilimi 20 V’un altında ise röle sürücü kartı, yakıt pili konverter çıkışını enerjilendirerek yük, inverter üzerinden beslenecektir. Yakıt pili ve güneş pili çıkış gerilimleri ve her iki kaynak için belirlenen referans gerilimleri LCD ekrandan gözlenebilmektedir. Referans değerler hem program ile hem de kart üzerinden arttırılıp azaltılabilmektedir.



(a)



(b)



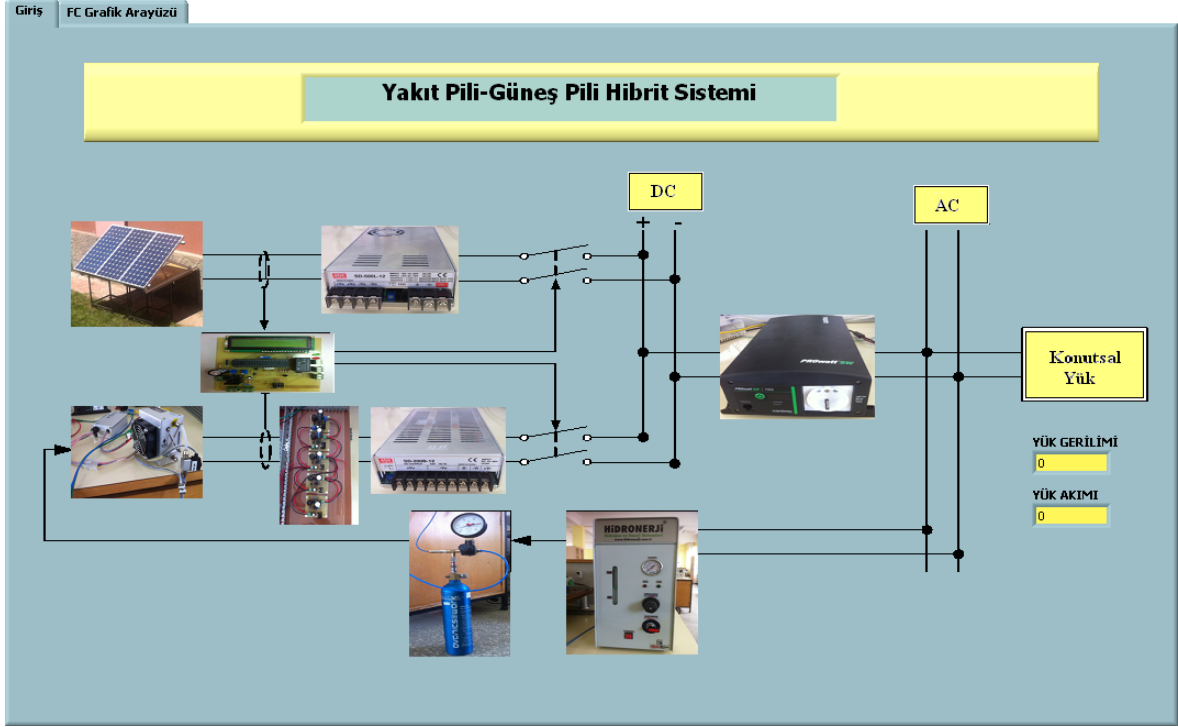
(c)



(d)

Şekil 5.26. Kontrol devresinin çalışması

Gerilim ve akım bilgilerini gözlemlemek ve kaydetmek için ise bir veri toplama cihazı yardımıyla LabVIEW programından faydalanılmıştır. Ayrıca, tasarlanan ve gerçekleştirilen sistemin LabVIEW ortamında arayüzü de oluşturulmuştur. Sistemde bulunan tüm elemanların yer aldığı LabVIEW arayüzü Şekil 5.27’de verilmiştir.

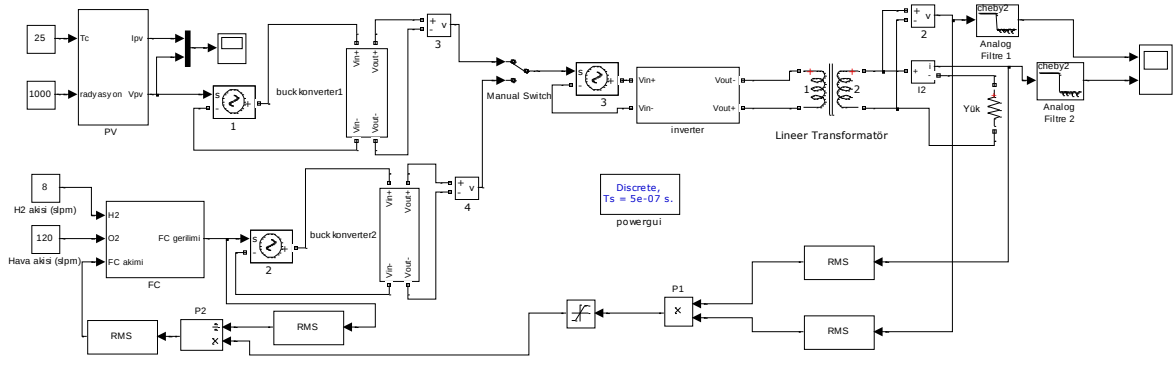


Şekil 5.27. Sistemin LabVIEW arayüzü

Gerçekleştirilen sistem çalıştırıldığı zaman veri toplama cihazı ile alınan bilgiler doğrultusunda arayüzde yük akımı ve çıkış gerilimi de ekrandan görülebilecektir.

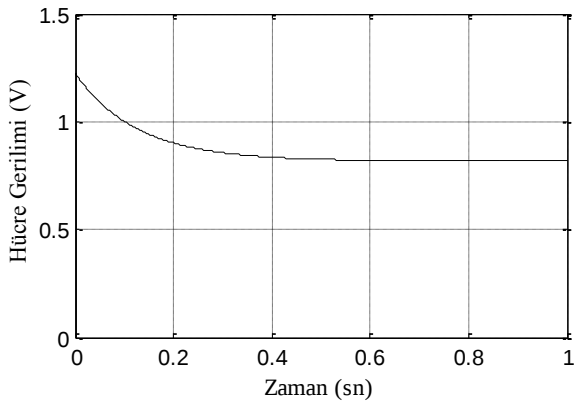
5.2.2. Benzetim Çalışması

Evsel yakıt pili sistemleri için tasarlanan bir yakıt pili-güneş pili sisteminin benzetim modeli Şekil 5.28’de verilmiştir. Sistemde, 100 W’lık bir PEM yakıt pili yığını modellenmiştir. İkinci enerji kaynağı olarak ise 160 W’lık bir güneş paneli kullanılmıştır. Hem yakıt pilinin hem de güneş pilinin Matlab-Simulink’teki modelleri dördüncü bölümde verilmiştir.

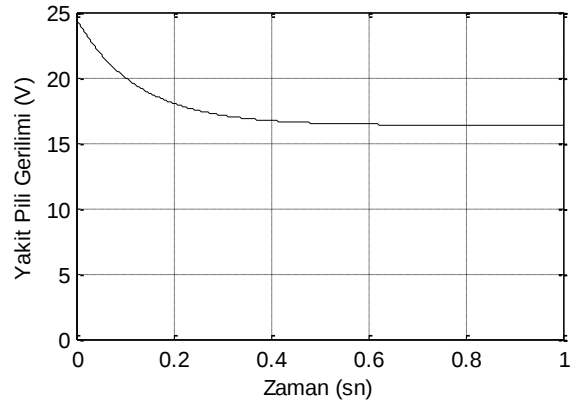


Şekil 5.28. FC-PV Sisteminin blok diyagramı

Yakıt pili yığını, her biri 0,8 V gerilim üreten 20 hücreden oluşmuştur. Yakıt pili anot kanalından beslenen hidrojenin basıncı 0,45-0,55 bar arasındadır. Bu sistem, 12 V'ta %40 verimle çalışmaktadır. Bölüm 4'teki yakıt pili benzetiminden elde edilen hücre gerilimi Şekil 5.29'da, yığın gerilimi ise Şekil 5.30'da gösterilmiştir.

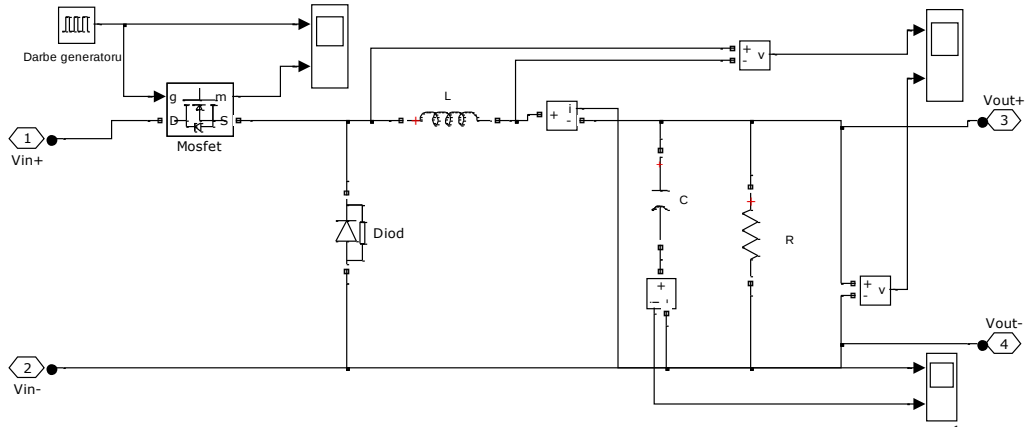


Şekil 5.29. Yakıt pili hücre gerilimi



Şekil 5.30. Yakıt pili yığın gerilimi

Yakıt pili çıkışında elde edilen 15-20 V'luk değişken gerilim ise konverter yardımıyla 12 V'a düşürülerek inverter giriş gerilimi seviyesine düşürülmüştür. Hem yakıt pili çıkış gerilimini hem de panel çıkışındaki 35-40 V arasında değişken gerilimi inverter giriş gerilimine düşürmek için Şekil 5.31'de görülen alçaltıcı konverter kullanılmıştır. Böylece her iki güç kaynağının çıkışı inverter giriş gerilimi olan 12 V'a dönüştürülmüştür.



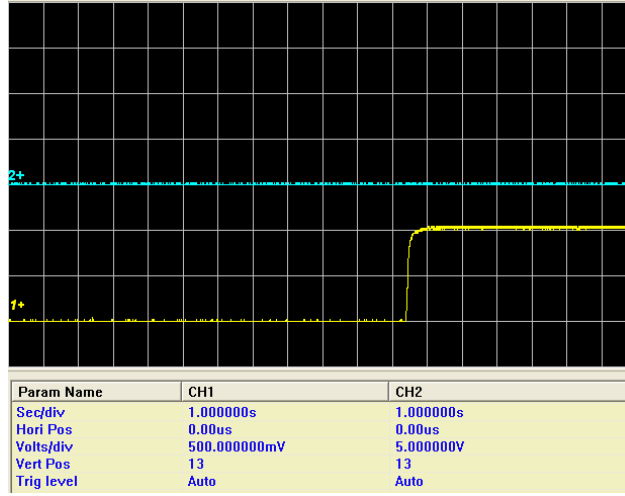
Şekil 5.31. Alçaltıcı konverter

Kurulan deneysel sistemde kullanılan inverter ise hem gerilimi yükselten hem de DC'yi AC'ye dönüştüren bir ticari inverterdir. Bu sebeple bu bölümde inverter modellenirken dördüncü bölümdeki inverter çıkışına bir trafo bağlanmıştır. Böylelikle 12 V'luk DC gerilim 220 V AC gerilime dönüştürülmüştür. İnverter çıkışı PWM olduğu için trafo çıkışına alçak geçiren bir filtre bağlanarak tam sinüs dalga elde edilmiştir. Benzetim süresi 1 sn seçilmiştir. Sistem yaklaşık 0,75 sn sonunda kararlı duruma geçmiştir.

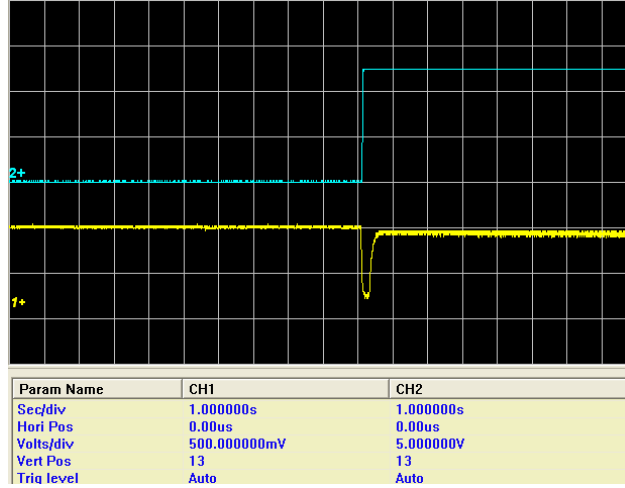
6. DENEYSEL VE BENZETİM SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

6.1. Yakıt Pili Devreye Alınması

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi yüksüz durumda yakıt pili çalıştırıldığı zaman yakıt pili çıkış gerilimi kanal 1 (sarı), DC-DC konverter çıkış gerilimi ise kanal 2 (mavi) ile gösterilmiştir. Öncelikle yakıt pili devreye alınmıştır. Yakıt pili çıkışı yaklaşık $2 \times 20 \times 500 \text{ mV} = 20 \text{ V}$ ’tur. Ölçülen değer ise $19,35 \text{ V}$ ’tur. Yakıt pili çıkış gerilimi ile konverter çıkışını aynı osiloskopta gözlemleyebilmek için kanal 1’de diferansiyel prob kullanılmıştır. Şekil 6.2’de ise konverterin devreye girmesiyle yakıt pili çıkışında anlık bir düşüş gözlenmiştir. DC-DC konverter çıkışı yaklaşık $2,5 \times 5 \text{ V} = 12,5 \text{ V}$ ’tur. Osiloskopta okunan maksimum değer ise $12,4 \text{ V}$ olarak gözlenmiştir. Yakıt pili çıkış akımı ise yaklaşık $0,37 \text{ A}$ ’dır. Yani yüksüz durumda yaklaşık $7,16 \text{ W}$ güç harcanmaktadır.

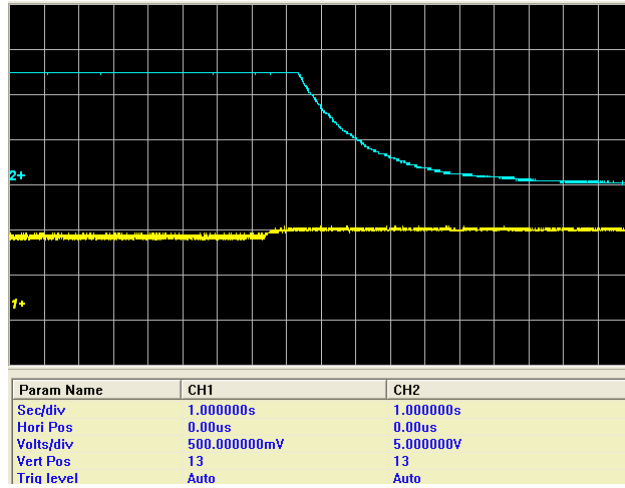


Şekil 6.1. FC’nin devreye alınma anındaki gerilimi

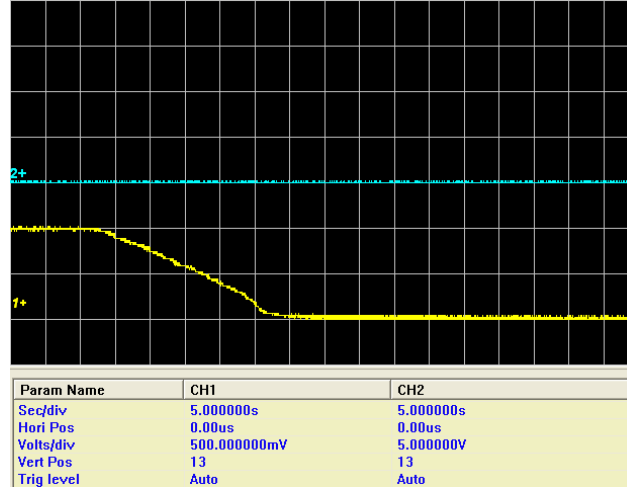


Şekil 6.2. Konverterin devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi

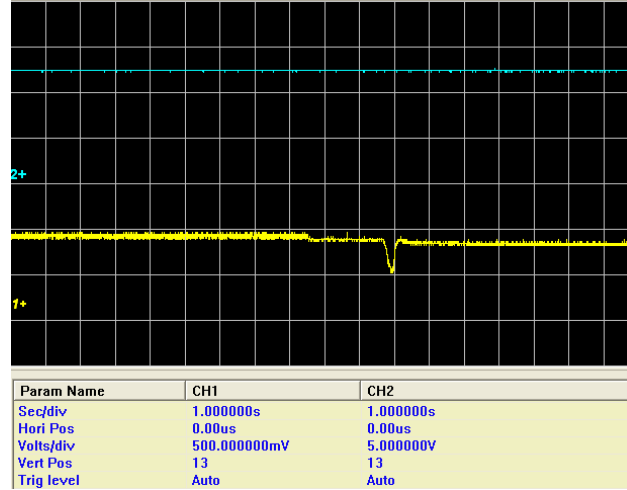
Sistem kapanırken ise öncelikle DC-DC konverter devre dışı bırakılmıştır. Yakıt pili geriliminde Şekil 6.3'te görüldüğü gibi küçük de olsa bir artış meydana gelmiştir. Konverter gerilimi yaklaşık 7 saniye içerisinde sıfırlanmıştır. Yakıt pili kapandığı zaman ise Şekil 6.4'teki gibi; DC-DC konvertere göre yaklaşık 3,5 kat daha uzun bir sürede çıkış gerilimini sıfırlamaktadır.



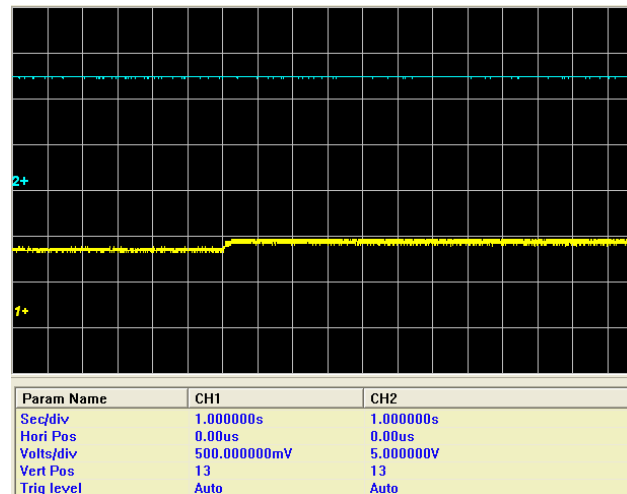
Şekil 6.3. Konverterin devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi



Şekil 6.4. FC'nin devreden çıkma anındaki gerilimi



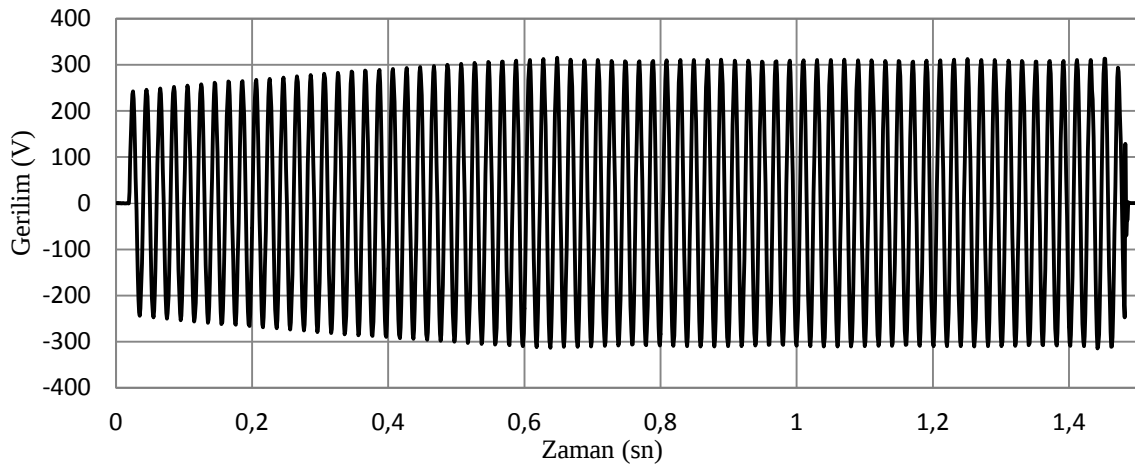
Şekil 6.5. İnverterin devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi



Şekil 6.6. İnverterin devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi

Yüksüz durumda inverterin devreye girdiği anda ise yakıt pili ve konverter çıkışı Şekil 6.5'te görüldüğü gibidir. İlk anda küçük bir düşüş yaşanmakla birlikte kısa bir süre sonunda sistem kararlı hale gelmiştir. İnverterin devreden çıkmasıyla yakıt pili geriliminde oluşan küçük artış Şekil 6.6'dan görülmektedir.

İnverter çıkışındaki gerilim ve akım eğrileri ise bir veri toplama cihazı ile alınıp LabVIEW arayüzüyle bilgisayar ortamına aktarılmıştır. İnverter çıkışı Şekil 6.7'den de görüldüğü gibi tam sinüs dalgadır. İlk anlarda düşük bir gerilim seviyesi ile başlayarak 311 V tepe değerinde sabit hale gelmektedir. Yük olmadığı için akım sıfırdır.



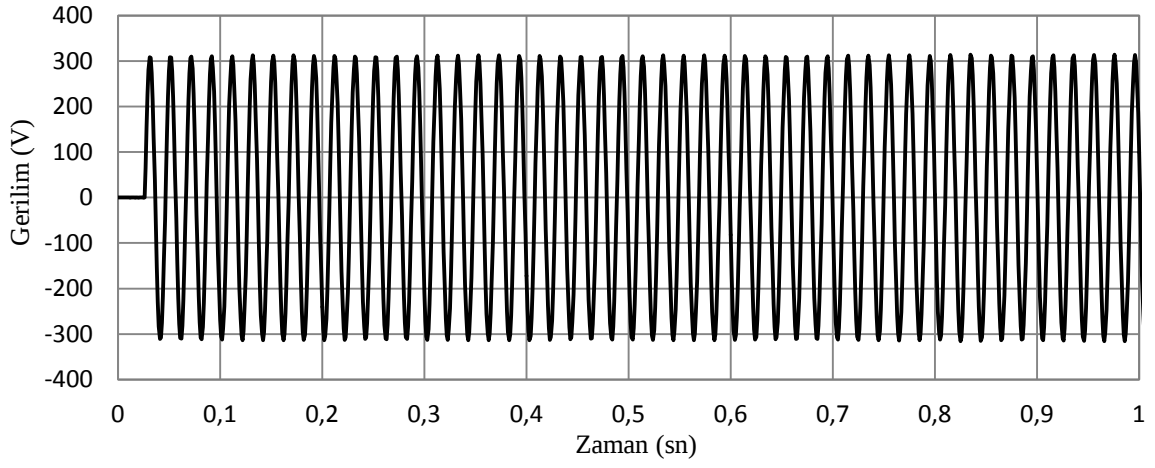
Şekil 6.7. İnverter çıkış gerilimi

Sürekli çalışma halinde gerilimin tepe değeri yaklaşık 311 V'da sabit olarak kalmaktadır. Bu durumda dalga şekli tam sinüstür. İnverter devreden çıktığı zaman ise çıkış gerilimi kısa bir sürede sıfırlanmıştır.

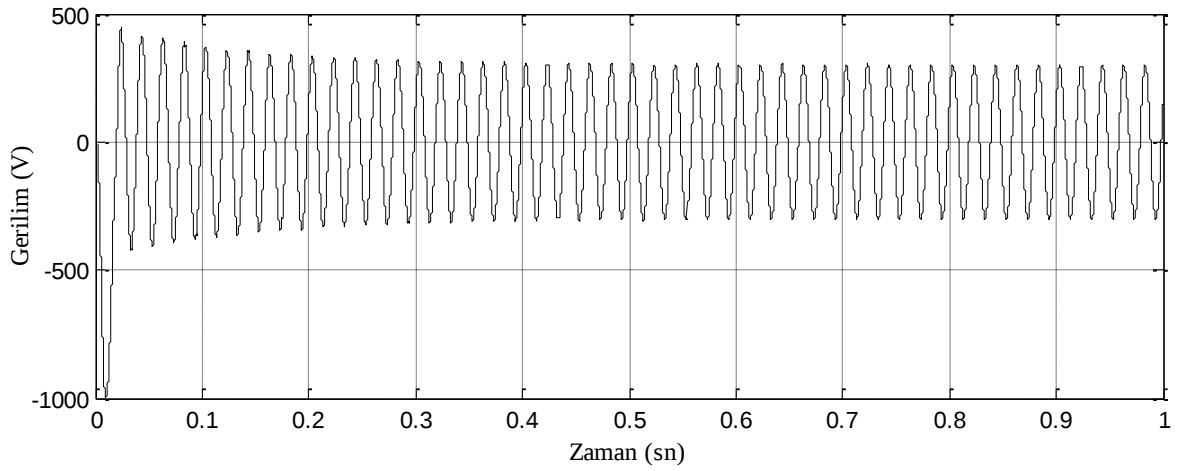
İnverter çıkışına 15 W gücünde akkor flamanlı bir lamba yük olarak bağlandığı durum için yakıt pili çıkışındaki gerilimin değişimi Şekil 6.8'den görülmektedir. Yakıt pilinin yüklendikçe geriliminde düşme gözlenmesine rağmen konverter çıkışı beklenildiği gibi değişmemiştir. Yakıt pili çıkış gerilimi 17,4 V akım ise 2,8 A olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.8. 15 W'lık yükün devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi

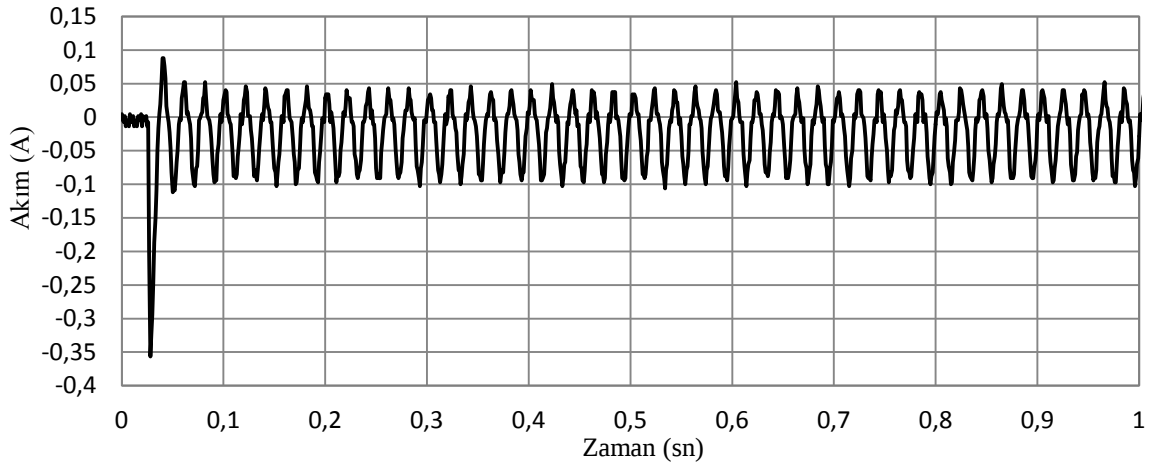


Şekil 6.9. 15 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)

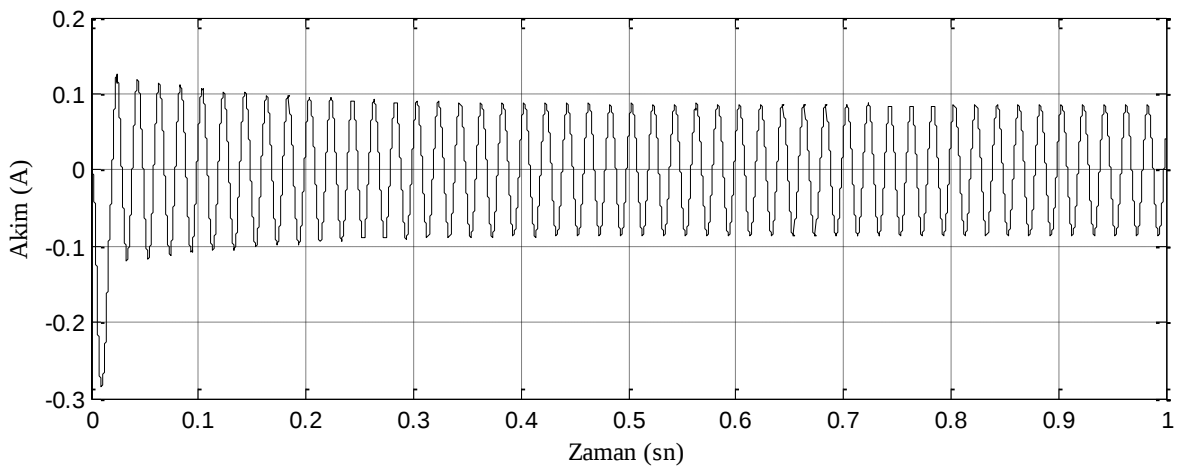


Şekil 6.10. 15 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu)

Şekil 6.9'daki inverter çıkış gerilimi oldukça düzgün bir sinüs eğrisidir. Şekil 6.10'da ise benzetim sonucu elde edilen inverter çıkış gerilimi verilmiştir. İlk anda gerilimde atlama meydana gelmiş, 0,25 saniye sonunda çıkış gerilimi 311 V tepe değerine ulaşmıştır. Deneysel sistemden elde edilen yük akımı Şekil 6.11'de verilmiştir. Başlangıç anında yük akımı 0,35 A değerine ulaştıktan sonra 0,05 ile -0,01 değerleri arasında salınım yapmıştır. Şekil 6.12'de gösterilen benzetim sonucunda ise yük akımı yaklaşık 0,3 A tepe değerine ulaşıp sonrasında ise yaklaşık 0,9 A tepe değerinde salınmıştır. Sürekli çalışma halinde ise yakıt pilindeki gerilim düşüşlerinin daha alt seviyelerde olduğu gözlenmektedir.



Şekil 6.11. 15 W için yük akımı (deneysel sonuç)



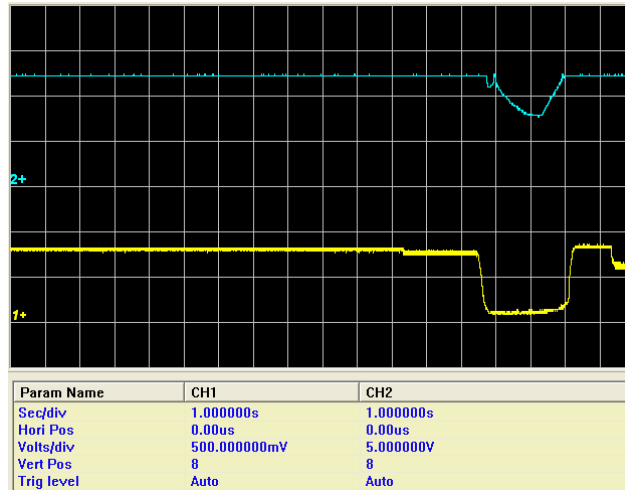
Şekil 6.12. 15 W için yük akımı (benzetim sonucu)

İnverter kapandığı zaman oluşan yakıt pilindeki gerilim artışı Şekil 6.13’de net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6.13. 15 W’lık yükün devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi

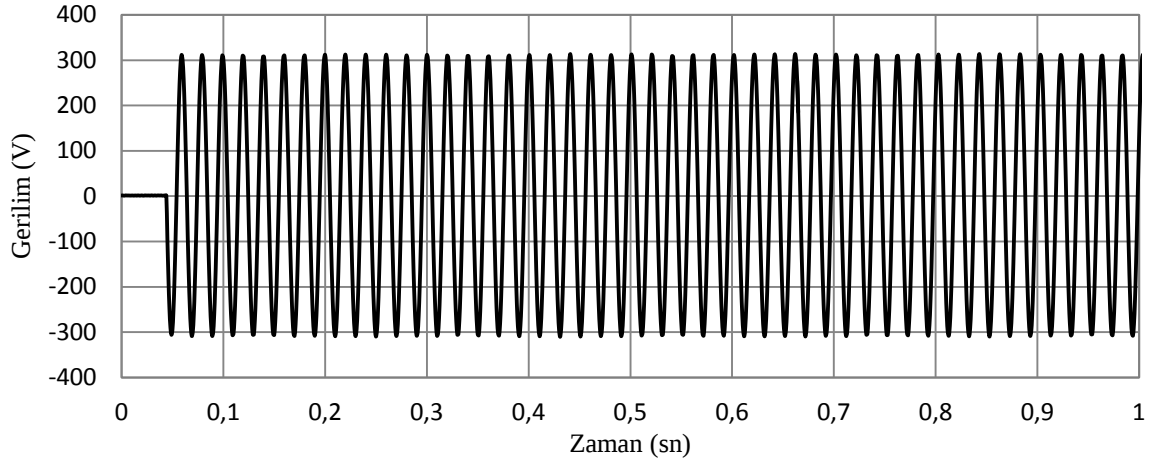
25 W akkor flamanlı lamba için inverterin açıldığı anda yakıt pili çıkışı ve konverter çıkışının gerilim eğrileri Şekil 6.14’de görülmektedir. Bu durumda, yakıt pili çıkış gerilimi 15,7 V, çekilen akım ise 4,2 A olarak ölçülmüştür. Lamba inverter açıldıktan sonra sürekli olarak ışık vermiştir.



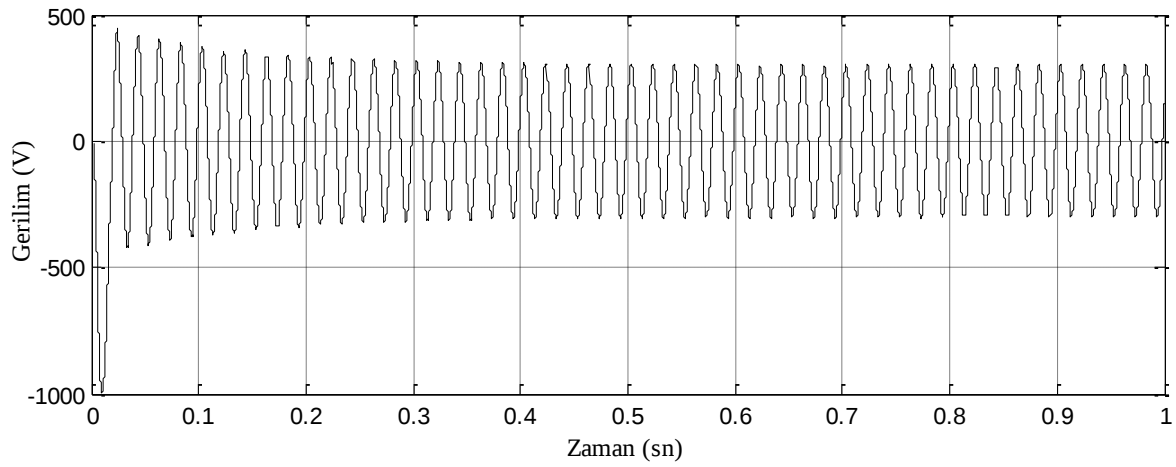
Şekil 6.14. 25 W’lık yükün devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi

25 W akkor flamanlı lamba devrede iken çıkış gerilimi Şekil 6.15’den görüldüğü gibi deneysel sistemde şebeke gerilimine uygun, oldukça düzgün bir sinüzoidal eğri elde

edilmiştir. Benzetim çalışmasında ise ilk anda yine gerilimde atlama olduğu Şekil 6.16'dan görülmektedir.

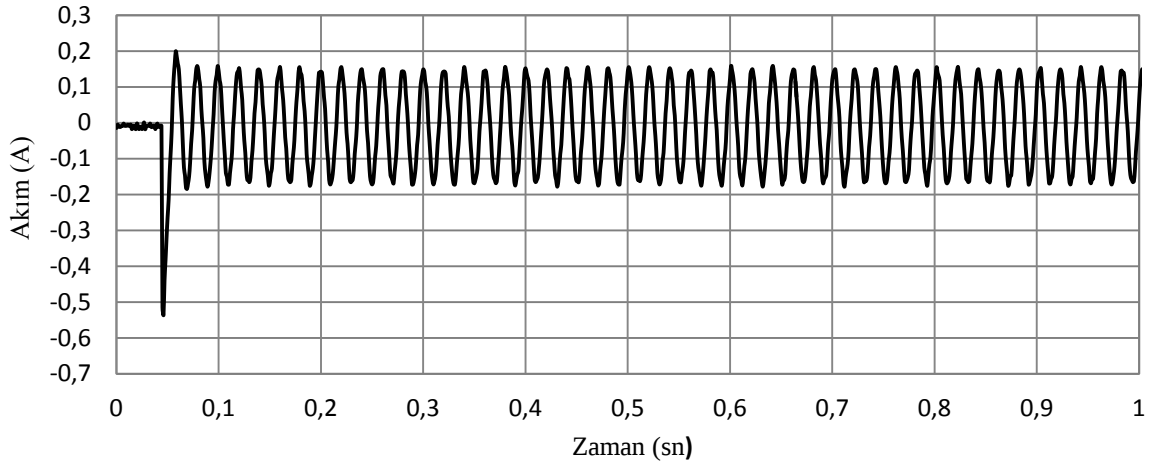


Şekil 6.15. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)

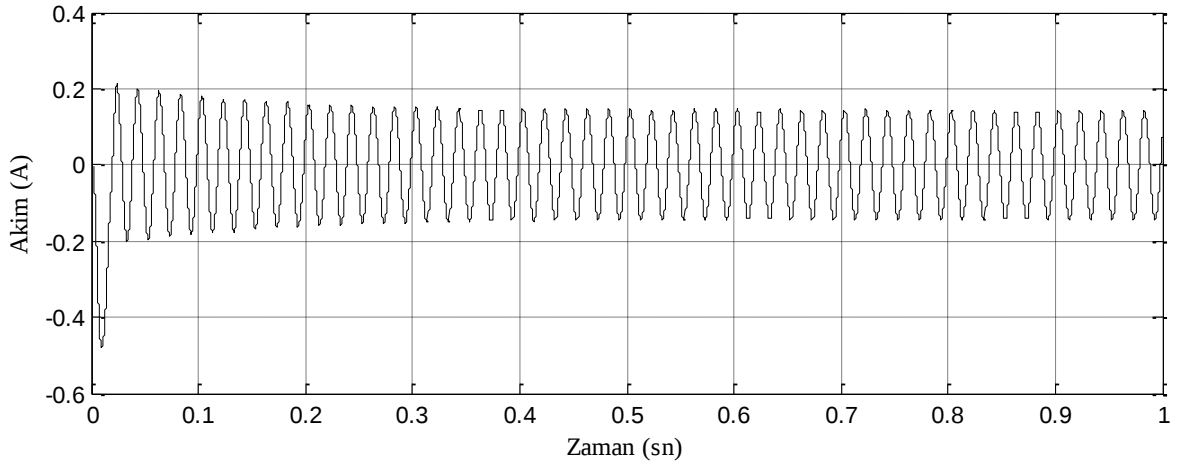


Şekil 6.16. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu)

Şekil 6.17'den görüldüğü gibi yük akımı ilk anda yaklaşık 0,55 A değerine bir pik yapmış sonrasında ise -0,16 A ila 0,16 A değerlerinde salınım yapmaktadır. Şekil 6.18'de ise benzetim sonucu elde edilen yük akımı verilmiştir. İlk anda çekilen akımın pik değeri ve sürekli durumdaki akım değeri hemen hemen aynıdır.



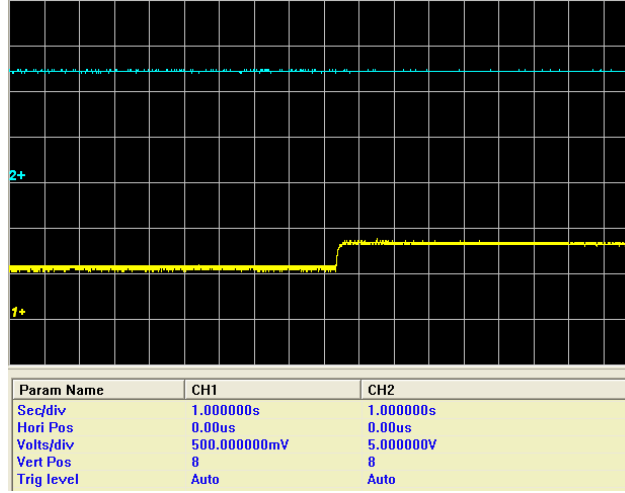
Şekil 6.17. 25 W için yük akımı (deneysel sonuç)



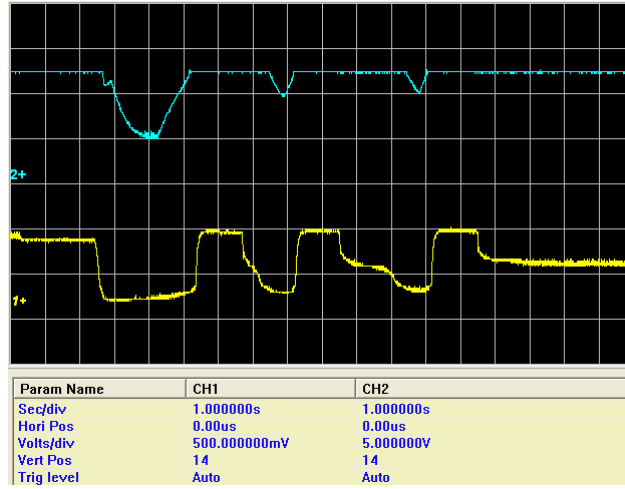
Şekil 6.18. 25 W için yük akımı (benzetim sonucu)

25 W akkor flamanlı lamba ile yapılan deneyler sonucunda inverter kapanırken yakıt pilinin geriliminde Şekil 6.19'dan da görüldüğü gibi artış olduğu gözlenmiştir. Konverter çıkış gerilimi ise değişmemiştir.

40 W akkor flamanlı lamba için inverter açıldığında yakıt pili çıkış gerilimindeki değişim Şekil 6.20'de verilmiştir. Sistemde uzun bir süre dalgalanma sonucu gerilim düşüşleri yaşadıktan sonra kararlı duruma geçilmiştir. Konverter çıkışında da küçük de olsa gerilim düşüşleri yaşanmıştır. Yük gerilimi 12,2 V olarak ölçülmüştür.

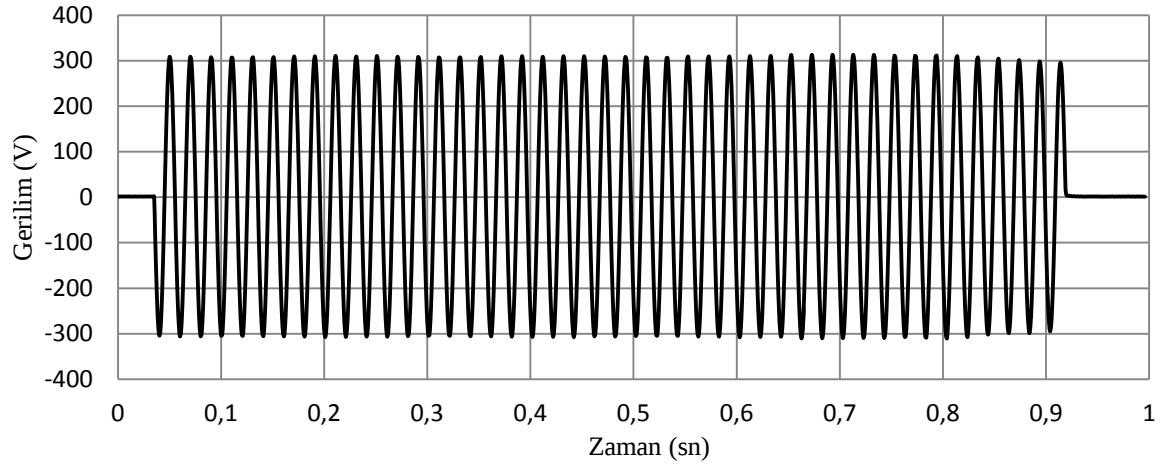


Şekil 6.19. 25 W'lık yükün devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi

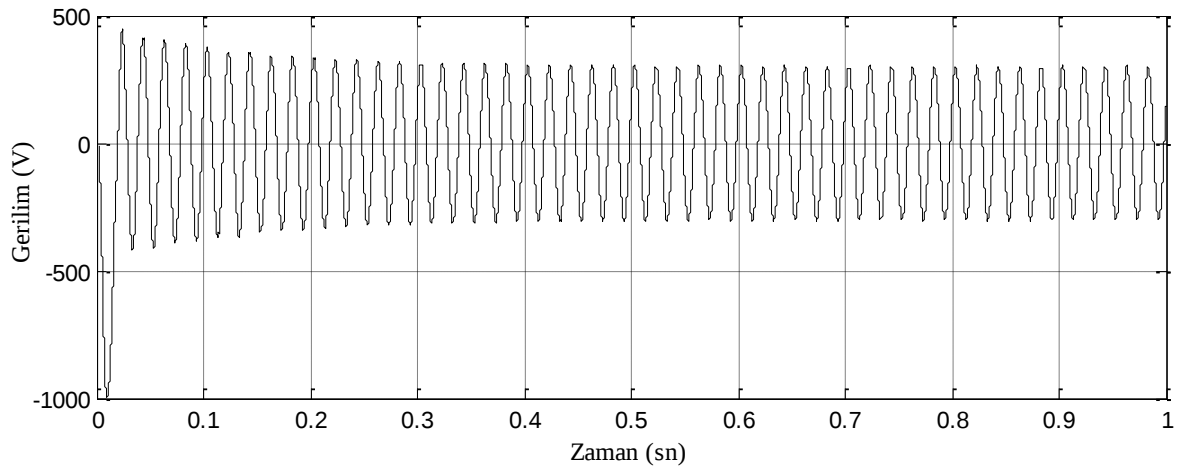


Şekil 6.20. 40 W'lık yükün devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi

İnverterin devreye alınmasıyla birlikte deneysel sistemdeki çıkış gerilim değişimi Şekil 6.21'de verilmiştir. Deneysel sonuçlardaki gerilim eğrisi Şekil 6.22'de gösterilen görüldüğü gibi benzetim sonuçlarına kıyasla daha düzgün bir sinüzoidal eğridir.

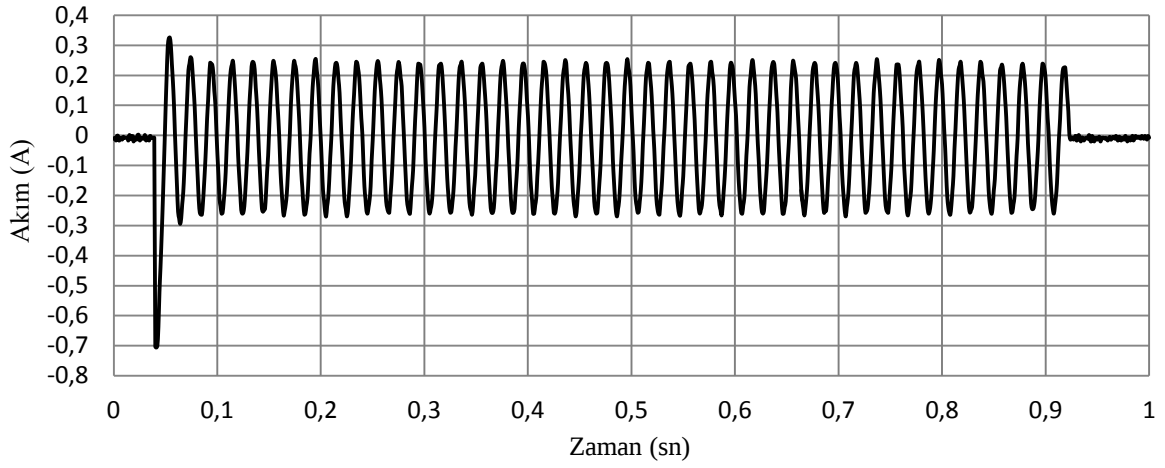


Şekil 6.21. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)

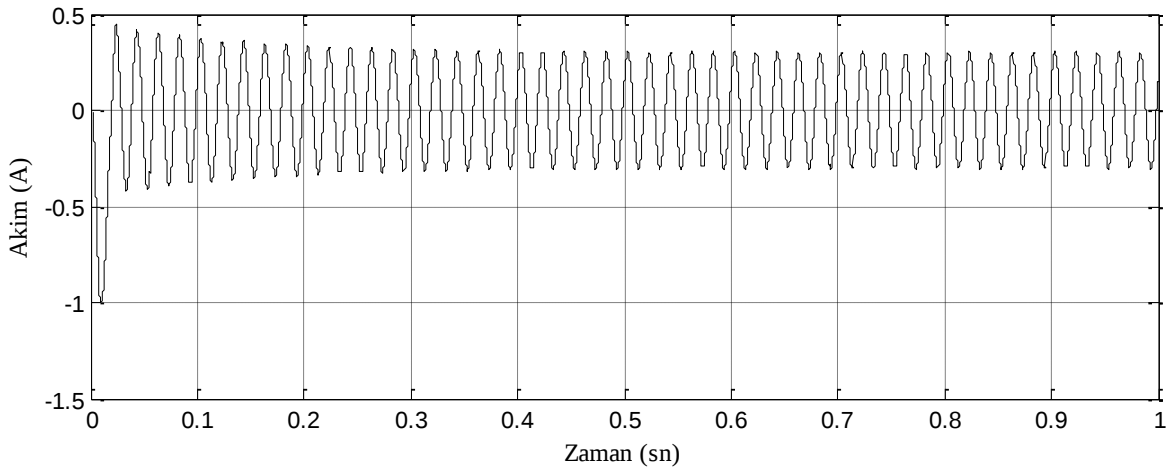


Şekil 6.22. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu)

Şekil 6.23'te görüldüğü gibi inverterin devreye girdiği ilk anda yük akımı yüksek bir değerden başlamış daha sonra nominal akımda sistem çalışmıştır. Çalışma esnasında lamba sürekli ışık vermiştir. Şekil 6.24'teki görülen benzetim sonucundaki yük akım değerleri de deneysel sonuçlarına oldukça yakındır.

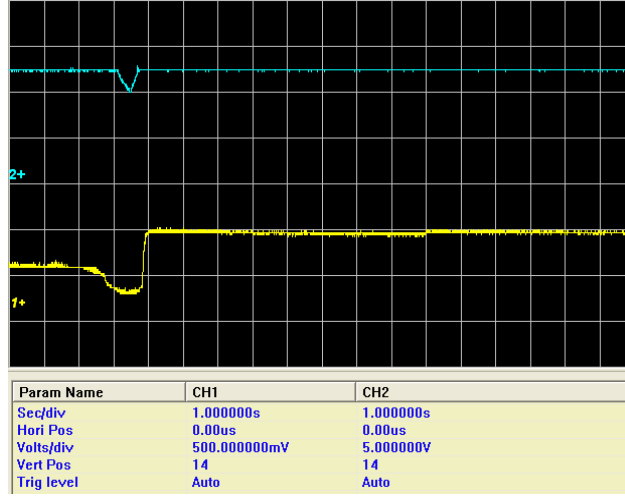


Şekil 6.23. 40 W için yük akımı (deneysel sonuç)



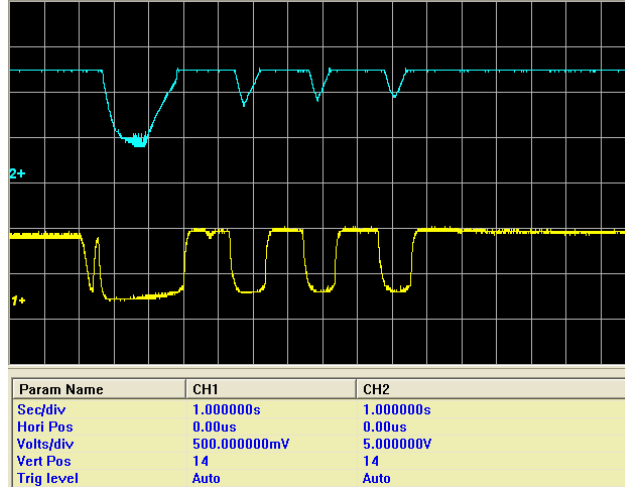
Şekil 6.24. 40 W için yük akımı (benzetim sonucu)

İnverterin devreden çıktığında ise yakıt pili ve konverter çıkışı Şekil 6.25'te gösterilmiştir. 40 W gücündeki bir lambanın sürekli çalışmasıyla sistemin % 40 verimde çalıştığı görülmektedir.



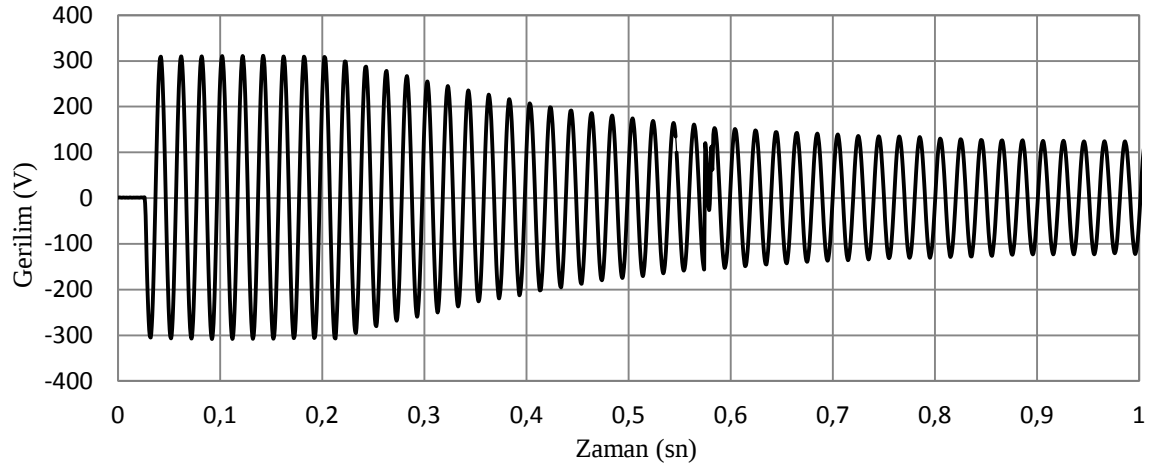
Şekil 6.25. 40 W'lık yükün devreden çıkma anındaki FC ve konverter gerilimi

İnverter çıkışına yaklaşık 50 W gücünde bir fan bağlandığı durumda ise yakıt pili ve konverter çıkış gerilimleri Şekil 6.26'da görüldüğü gibi uzun bir sürede dalgalanma sonucunda inverter otomatik olarak devreden çıkmıştır. Fanın çalışma süresi yaklaşık olarak 1,5 saniyedir.

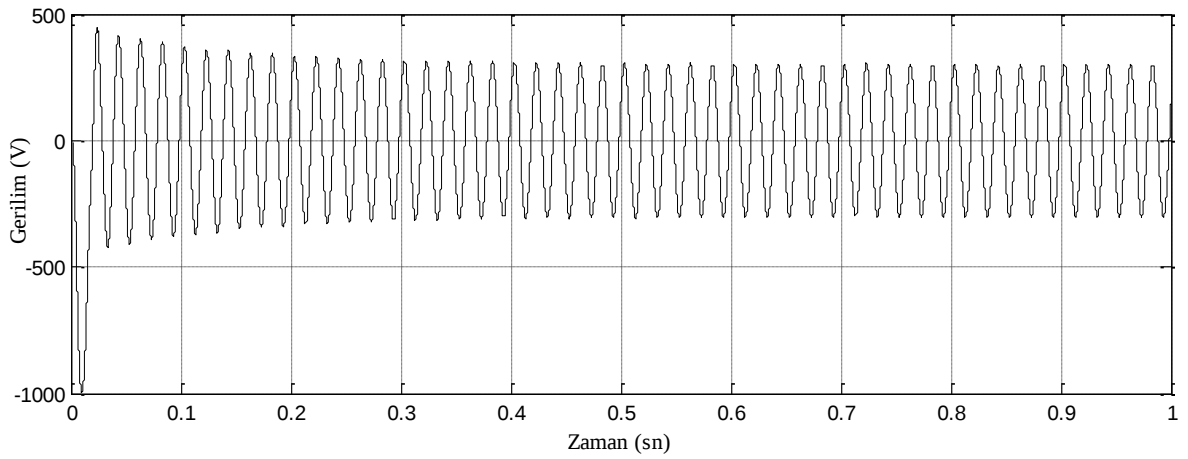


Şekil 6.26. Fanın devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi

Şekil 6.27'deki inverter çıkış gerilimi kısa bir süre tam sinüs halde görülmüş sonrasında ise azalarak sıfırlanmıştır. Benzetim sonucu elde edilen fan gerilim eğrisi ise Şekil 6.28'de verilmiştir.

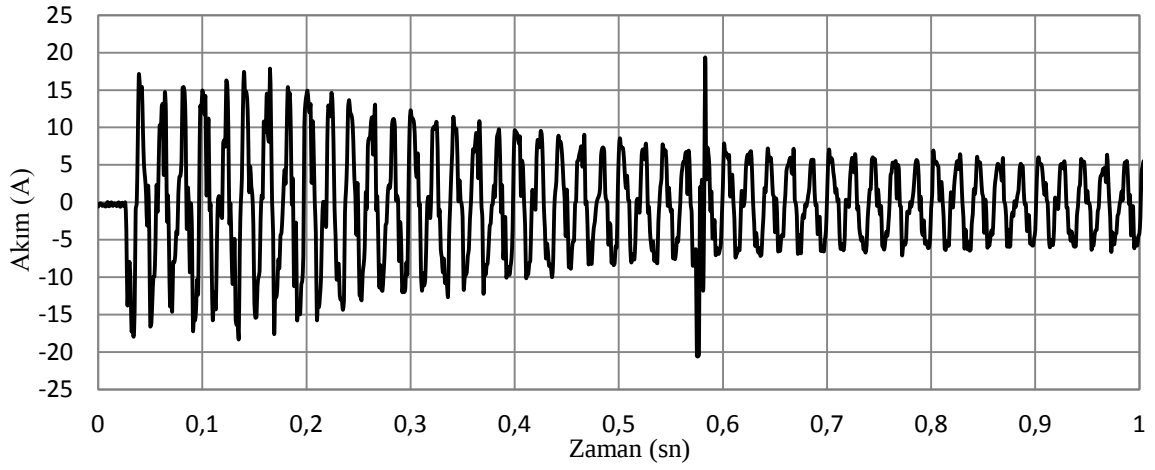


Şekil 6.27. Fan gerilimi (deneysel sonuç)

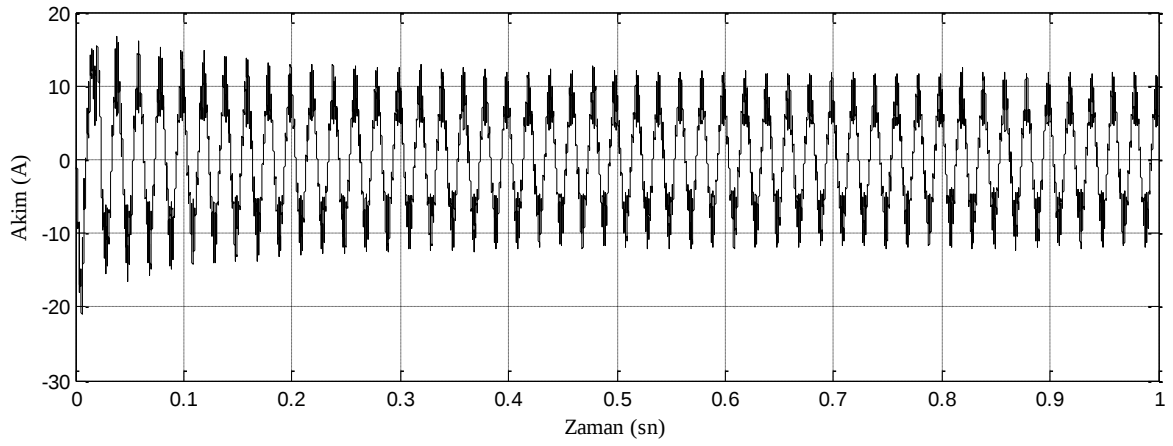


Şekil 6.28. Fan gerilimi (benzetim sonucu)

Şekil 6.29'daki akım eğrisi ise oldukça bozuk bir sinüzoidal eğridir. Yük olarak fanın kullanılması durumunda, yaklaşık 1,4 saniye sonunda inverter devre dışı kalmıştır. Fanın yavaşlamasıyla osilasyonlar görülmektedir. Yakıt pili çıkış gerilimi fanın hızlanmasına bağlı olarak 19,04 V'dan başlayarak yaklaşık 11 V'a kadar düşmüştür. Akım da bu duruma bağlı olarak 0,6 A'den başlayıp 18 A seviyelerine yükselmiştir. Şekil 6.30'da verilen benzetim sonucundaki fan akımı ise başlangıç anında deneysel sonuçlara yakın değerlere ulaşmış sonrasında ise yaklaşık 12 A maksimum değerinde salınım yapmıştır.

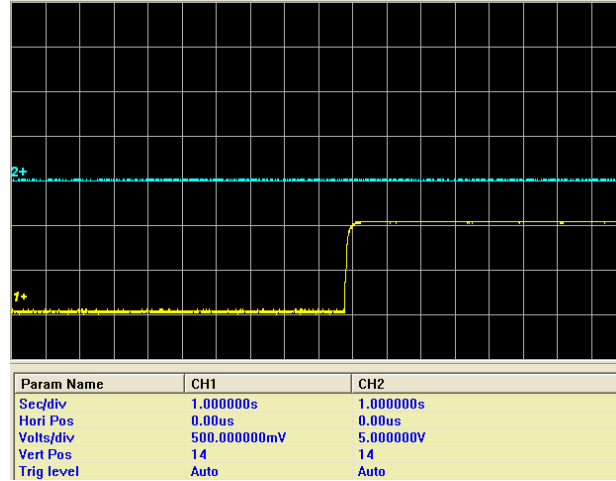


Şekil 6.29. Fan akımı (deneysel sonuç)



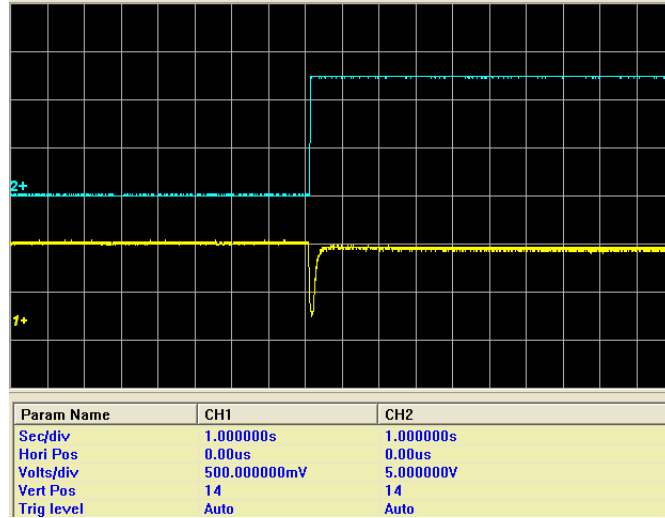
Şekil 6.30. Fan akımı (benzetim sonucu)

Şekil 6.31’de ise hidrojen basıncı 0,85 bara çıkarılmıştır. Bu durumda yakıt pili çıkışında 20,09 V gerilim ölçülmüştür. Gerilimin tepe değeri önceki deneylere göre daha yüksek değerdedir.



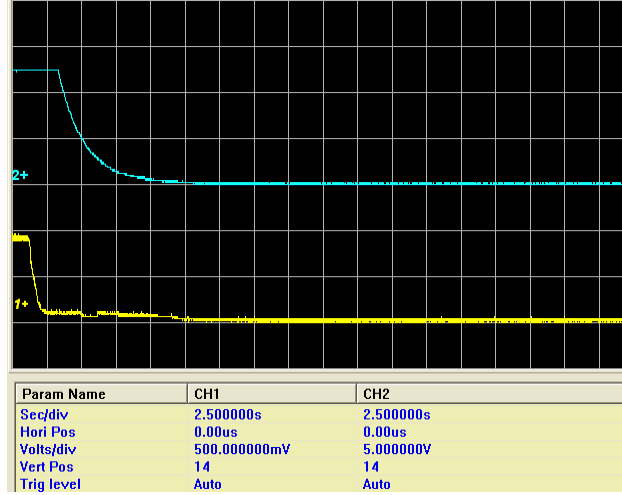
Şekil 6.31. 0,85 bar basınçta FC'nin devreye alınma anındaki gerilimi

Şekil 6.32'de ise konverterin devreye girmesiyle yakıt pili çıkışındaki ani gerilim düşümü gözlenmiştir.



Şekil 6.32. 0,85 bar basınçta konverterin devreye alınma anındaki FC ve konverter gerilimi

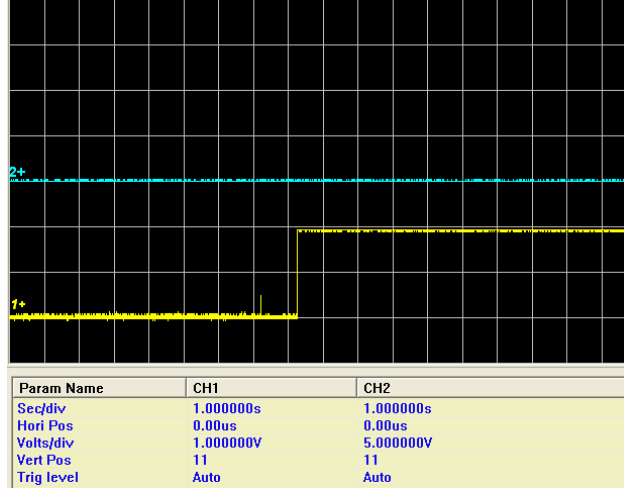
İnverter devreye alındıktan sonra yakıt pili basıncının ani olarak 0,8 bardan sıfır bara düşürülmesiyle oluşan değişimler Şekil 6.33'de görülmektedir. Yakıt pili çıkış gerilimi yaklaşık 12 saniye sonunda tamamen sıfırlanmıştır.



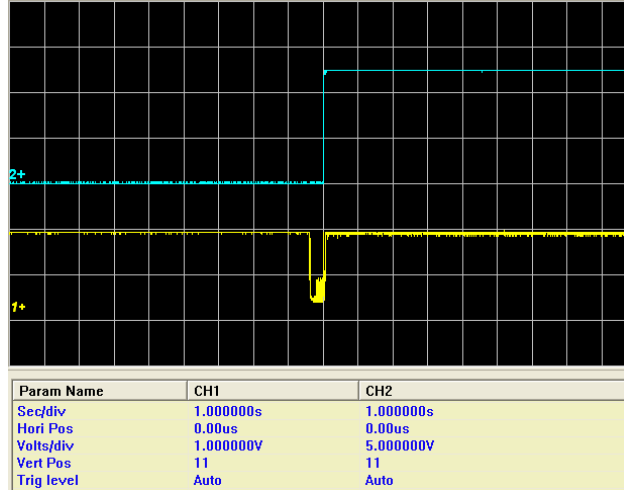
Şekil 6.33. Basıncın sıfırlandığı andaki FC ve konverter gerilimi

6.2. Güneş Pili Devreye Alınması

160 W'lık bir adet güneş panelinin devreye alınmasıyla elde edilen yük akım ve gerilim eğrileri bu bölümde verilmiştir. Güneş panelinin çıkışına 19-72 V girişli, 12 V çıkışlı bir DC-DC konverter bağlanmıştır. Konverter çıkışı ise 12 V DC'yi 220 V AC'ye çeviren bir inverter üzerinden yükleri beslemektedir. Güneşli ve açık bir günde güneş paneli ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen grafikler aşağıda verilmiştir. Öncelikle yüksüz durumda sadece güneş pili devreye alınmıştır. Şekil 6.34'ten görüldüğü gibi yakıt pili ile kıyaslandığında oldukça kısa bir sürede güneş pili gerilimi 38,54 V nominal gerilime ulaşmıştır. Konverterin devreye alınması ile birlikte güneş pilinde de anlık gerilim düşümü olduğu Şekil 6.35'ten görülmektedir. Güneş pilinin çektiği akım 0,388 A, gerilimi ise 38 V olarak ölçülmüştür. Bu durumda güneş pili yaklaşık 15 W güç harcamaktadır.

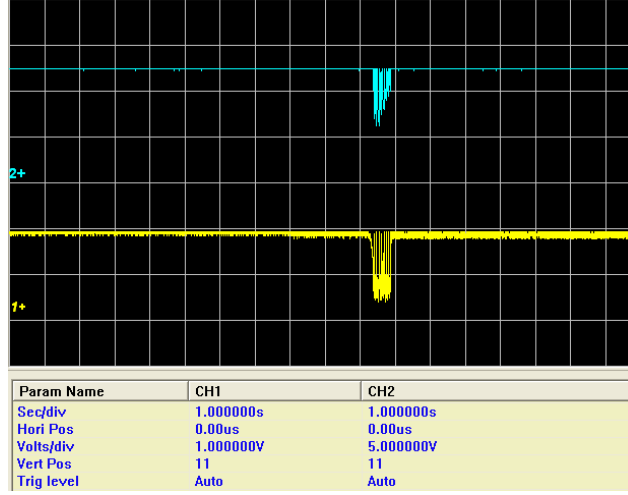


Şekil 6.34. PV'nin devreye alınma anındaki gerilimi

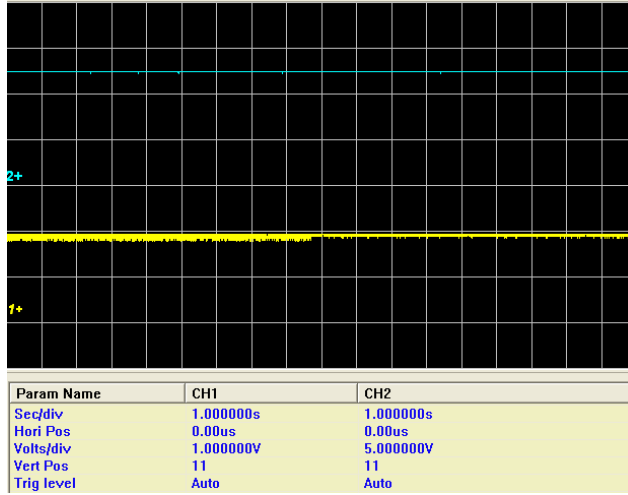


Şekil 6.35. Konverterin devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi

İnverterin devreye alınmasıyla birlikte Şekil 6.36'dan da görüldüğü gibi hem konverterde hem de güneş pilinde anlık değişimler yaşanmıştır. Güneş pilinden çekilen akım ise 0,921 A'e ulaşmış, gerilim ise 37,2 V'a düşmüştür. Yani güneş pili yüksüz durumda yaklaşık 34 W güç harcamaktadır. İnverterin kapandığı andaki küçük gerilim artışı da Şekil 6.37'de görülmektedir.

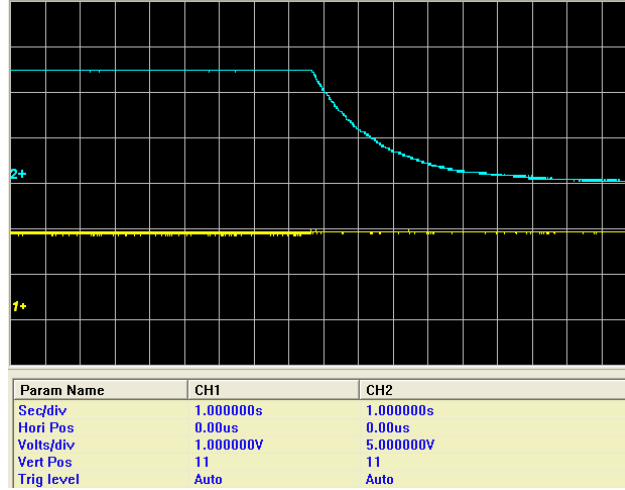


Şekil 6.36. İnverterin devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi

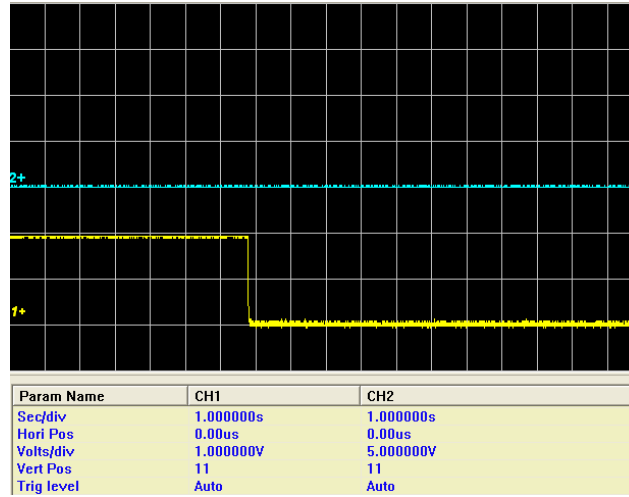


Şekil 6.37. İnverterin devreden çıkmaanındaki PV ve konverter gerilimi

Şekil 6.38 ve Şekil 6.39 incelendiğinde konverterin devreden çıkmasıyla yaklaşık 8 saniye sonunda gerilim sıfırlanırken, güneş pili oldukça kısa sürede sıfır değerine ulaşmıştır.

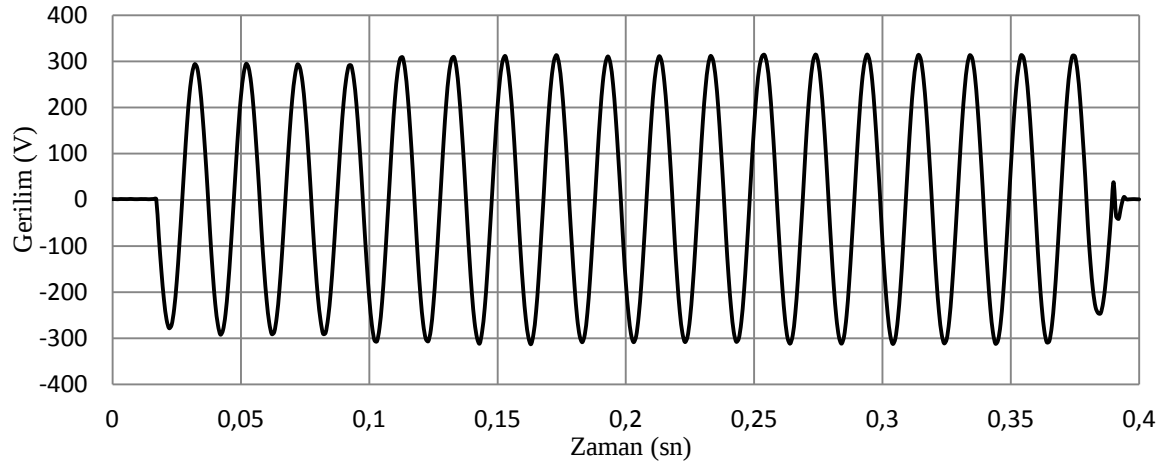


Şekil 6.38. Konverterin devreden çıkma anındaki PV ve konverter gerilimi



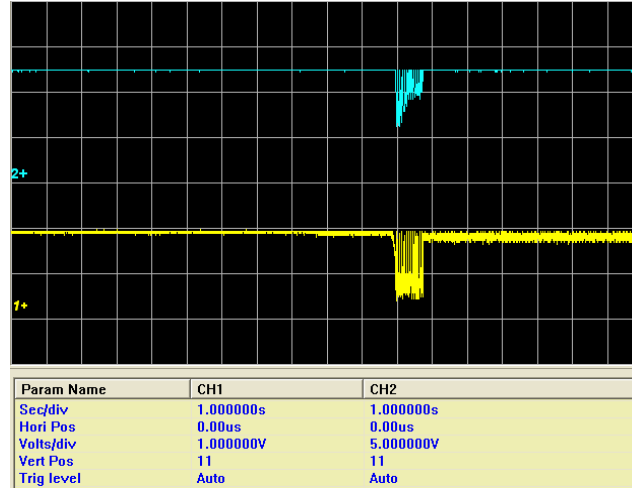
Şekil 6.39. PV'nin devreden çıkma anındaki gerilimi

Veri toplama cihazı ile alınan değerlere göre inverter çıkış geriliminin dalga şekli Şekil 6.40'da gösterilmiştir. İlk anlarda tepe değeri daha düşük iken nominal gerilim olan 311 V'a kısa sürede ulaşmıştır.



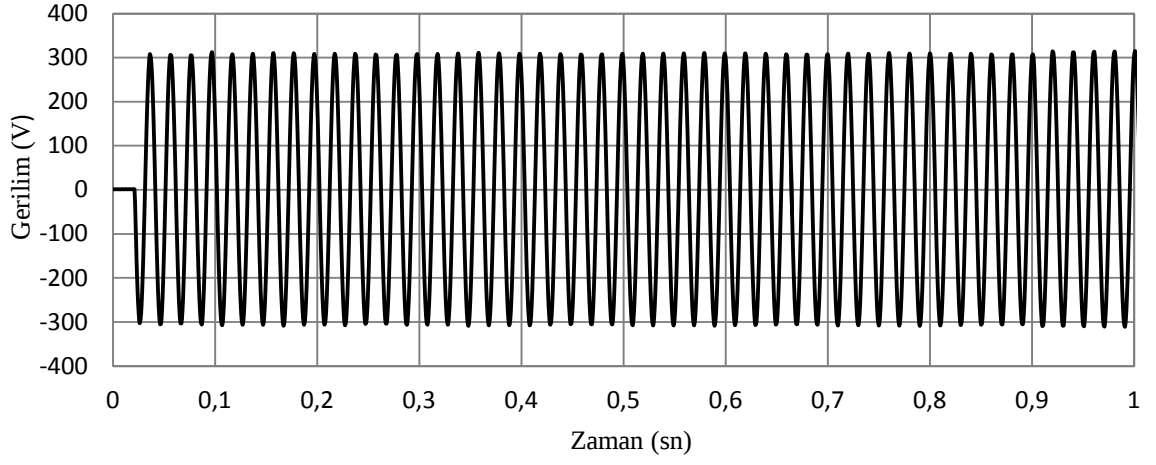
Şekil 6.40. Yüksüz durumda çıkış gerilimi

İnverter çıkışına 25 W akkor flamanlı lamba bağlanması durumunda inverterin açıldığı anda oluşan dalga şekilleri Şekil 6.41’de verilmiştir. Güneş pili ve konverter geriliminde kısmi bir düşüş görülmektedir. Güneş pilinden çekilen akım 1,83 A iken gerilim 36,3 V’a düşmüştür. Bu durumda güneş pilinden yaklaşık 66 W güç çekilmiştir.

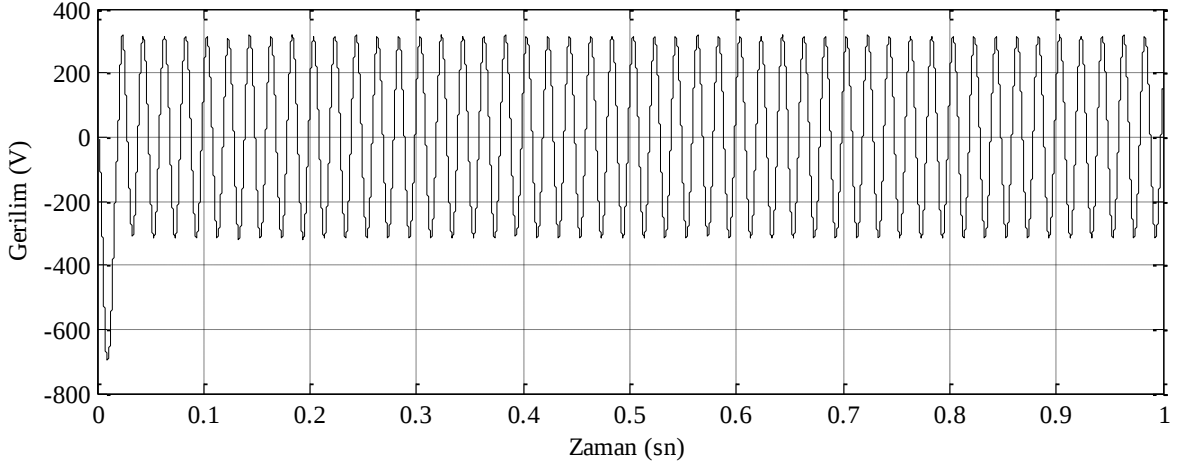


Şekil 6.41. 25 W’lık yükün devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi

İnverter çıkış gerilimi Şekil 6.42’den görüldüğü gibi hızlı bir şekilde nominal gerilime ulaşmıştır. Benzetim sonucunda elde edilen çıkış gerilimi ise Şekil 5.43’te verilmiştir.

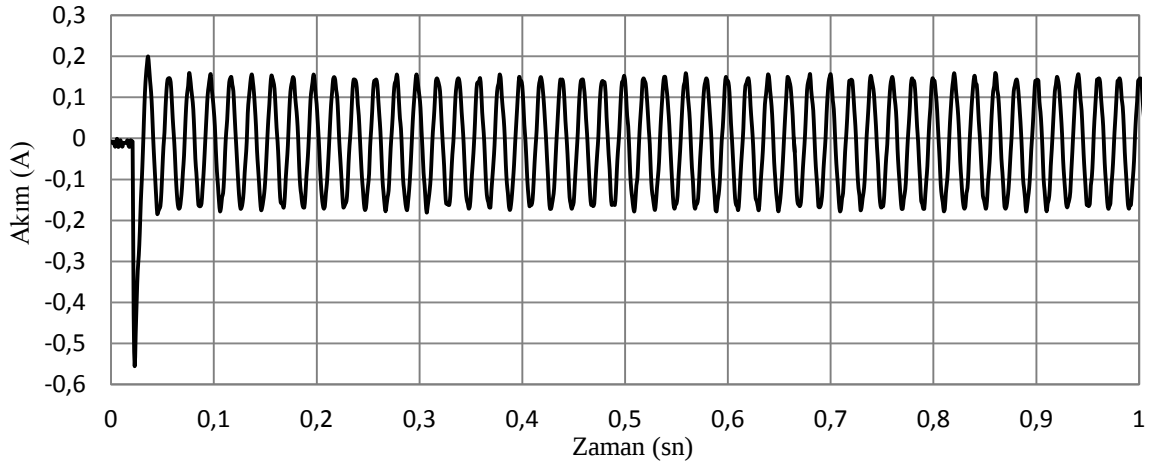


Şekil 6.42. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)

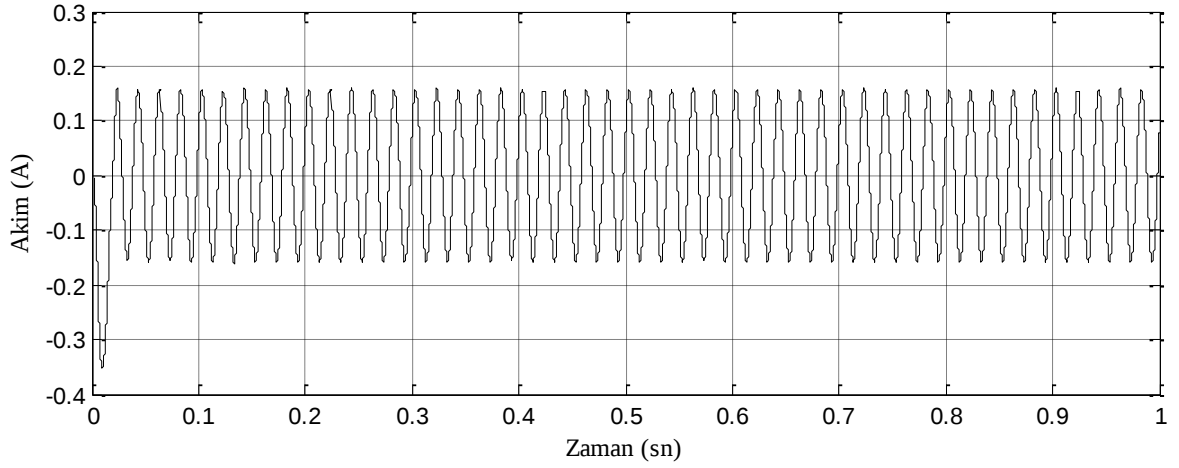


Şekil 6.43. 25 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu)

Yük akımı eğrileri ise Şekil 6.44-Şekil 6.45'te verilmiştir. Akım, hem deneysel çalışmada hem de benzetim sonuçlarında ani bir yükseliş sonrasında kararlı hale gelmiştir.

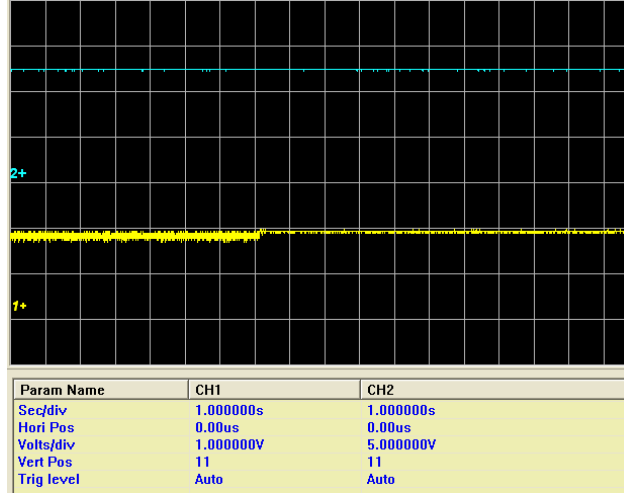


Şekil 6.44. 25 W için yük akımı (deneysel sonuç)



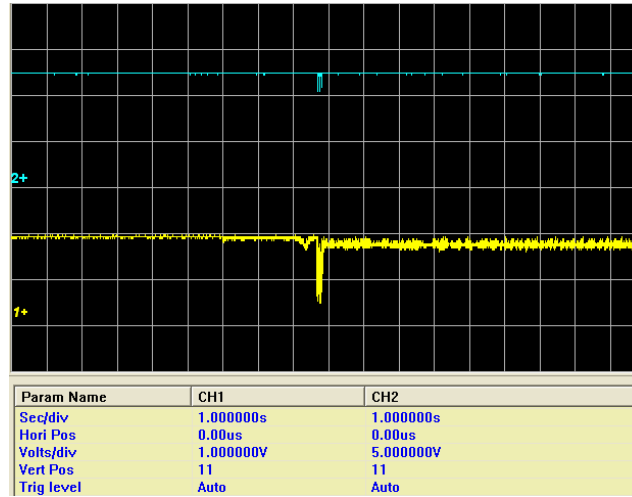
Şekil 6.45. 25 W için yük akımı (benzetim sonucu)

İnverterin devre dışı bırakılması ile birlikte çıkış geriliminde küçük de olsa bir yükselme meydana gelmiştir. Bu durum Şekil 6.46'da görülmektedir.

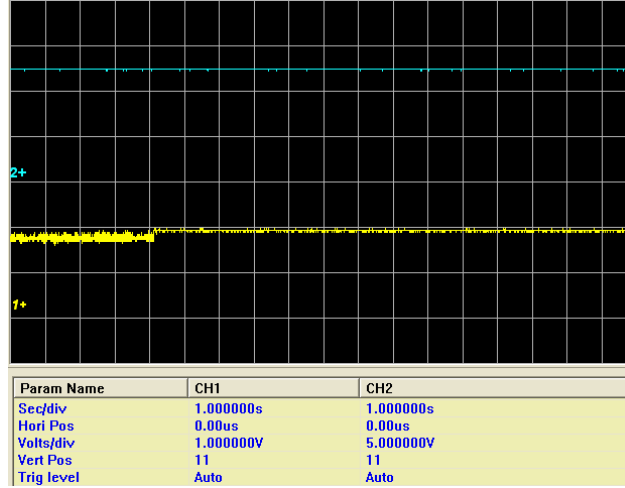


Şekil 6.46. 25 W'lık yükün devreden çıkma anındaki PV ve konverter gerilimi

Yük olarak 40 W akkor flamanlı lamba kullanılması durumunda güneş pili ve konverter gerilimindeki değişim Şekil 6.47'de verilmiştir. Görüldüğü gibi anlık gerilim düşümü gözlenmiştir. Güneş pili gerilimi 35 V'a düşerken akım ise 2,4 A değerine yükselmiştir. İnverter kapandığı anda oluşan dalga şekilleri de Şekil 6.48'de gösterilmiştir.

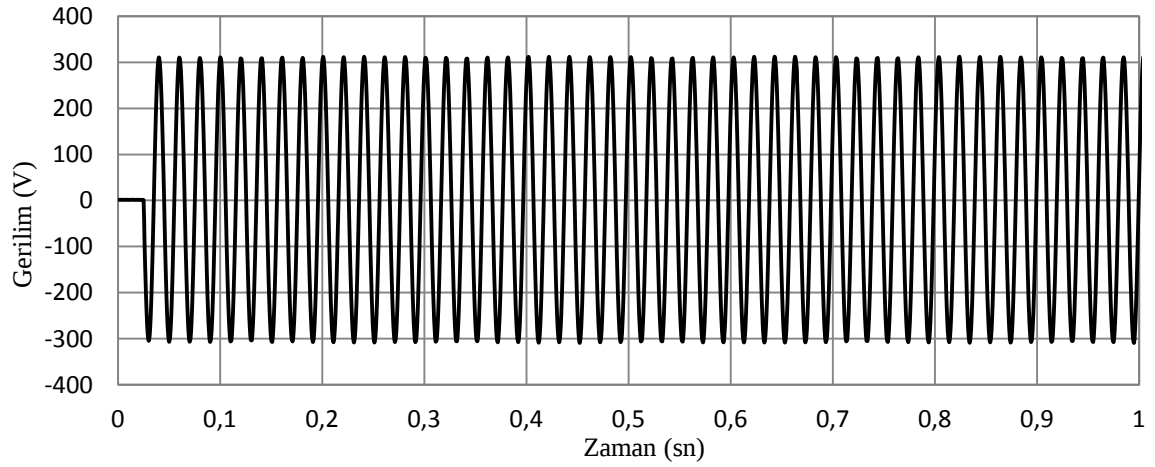


Şekil 6.47. 40 W'lık yükün devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi

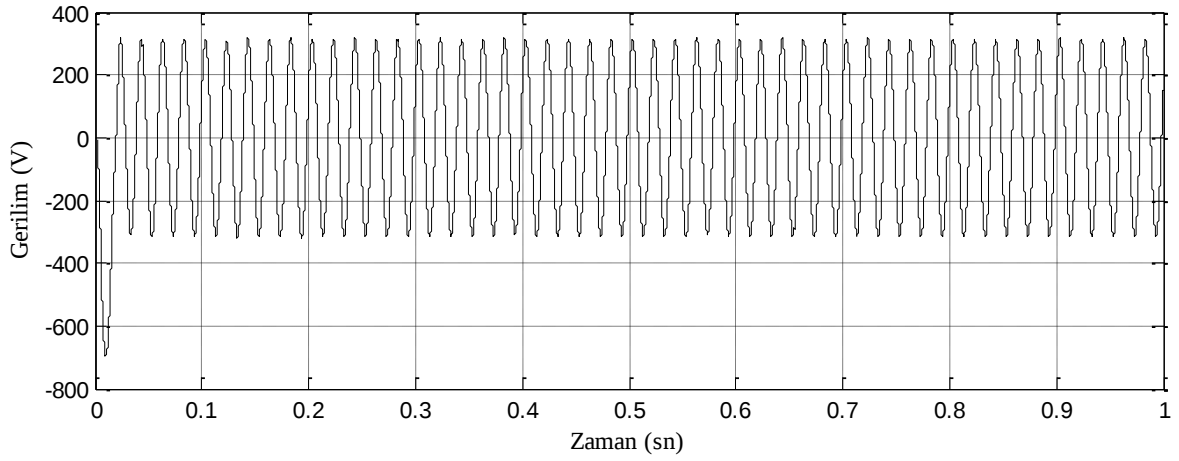


Şekil 6.48. 40 W'lık yükün devreden çıkma anındaki PV ve konverter gerilimi

Yük olarak inverter çıkışına 40 W gücünde akkor flamanlı lamba bağlandığı zaman sistem sürekli olarak çalışmıştır. Güneş pili çıkış gerilimi 232 V olarak ölçülmüştür. Çıkış geriliminin deneysel ve benzetim sonuçları Şekil 6.49 ve 6.50'de verilmiştir.

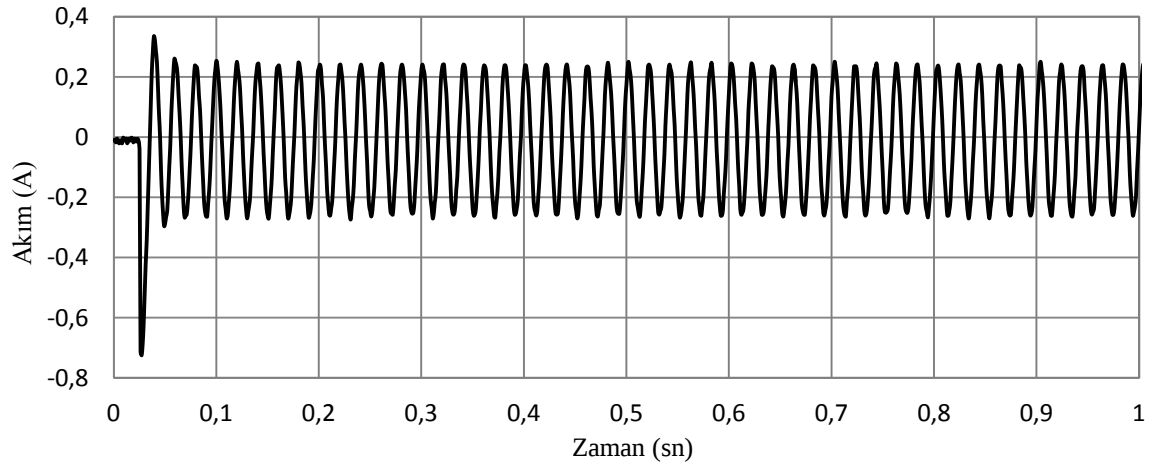


Şekil 6.49. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)

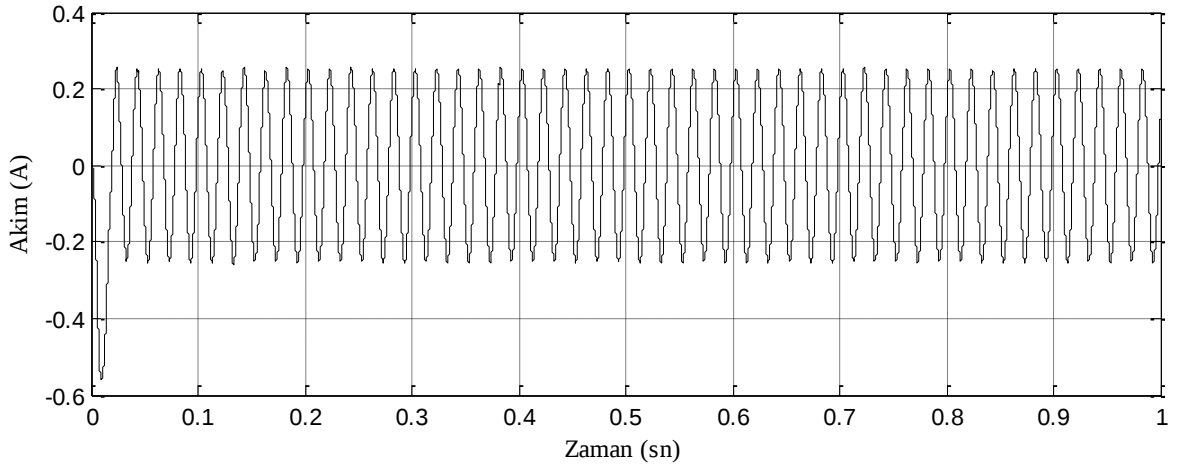


Şekil 6.50. 40 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu)

Yük akımı ise 0,182 A olarak ölçülmüştür. Şekil 6.51 ve 6.52'den de görüldüğü gibi ilk anda yüksek akım çekilmiş sonrasında yaklaşık 0,25 A seviyelerinde salınım yapmıştır.

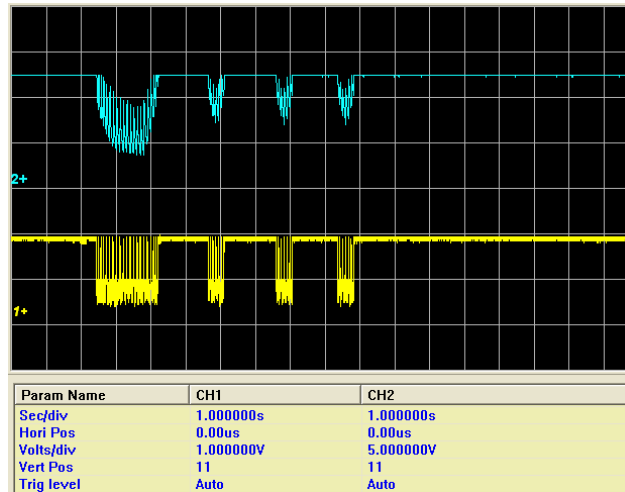


Şekil 6.51. 40 W için yük akımı (deneysel sonuç)



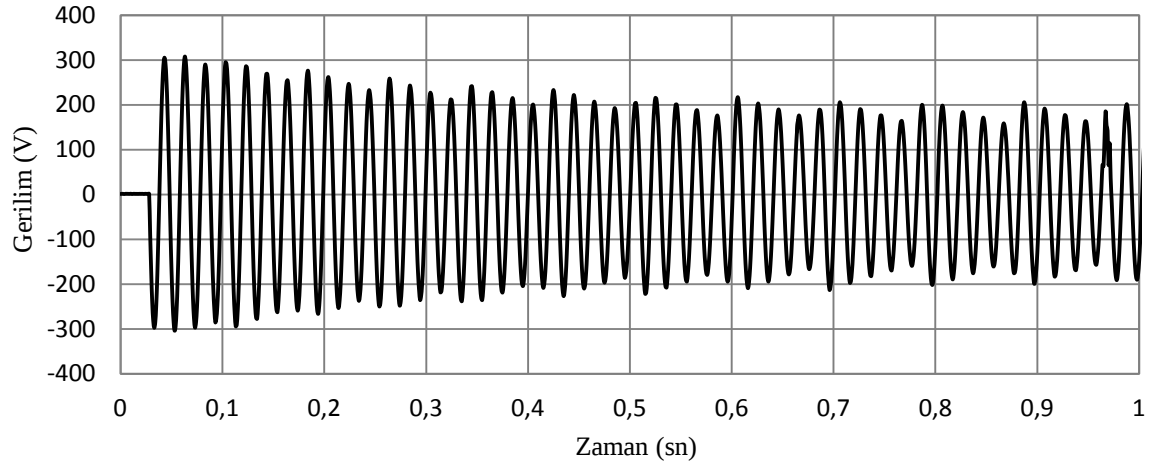
Şekil 6.52. 40 W için yük akımı (benzetim sonucu)

Yük olarak inverter çıkışına 75 W akkor flamanlı lamba bağlandığı zaman kısa süre sonunda inverter otomatik olarak devreden çıkmıştır. Bu süreçte gerçekleşen gerilim değişimleri Şekil 6.53'te verilmiştir. Güneş pili geriliminin 17 V'a kadar düştüğü ölçülmüştür. Konverter giriş gerilimi ise minimum 19 V olduğu için inverter otomatik olarak devreden çıkmıştır.

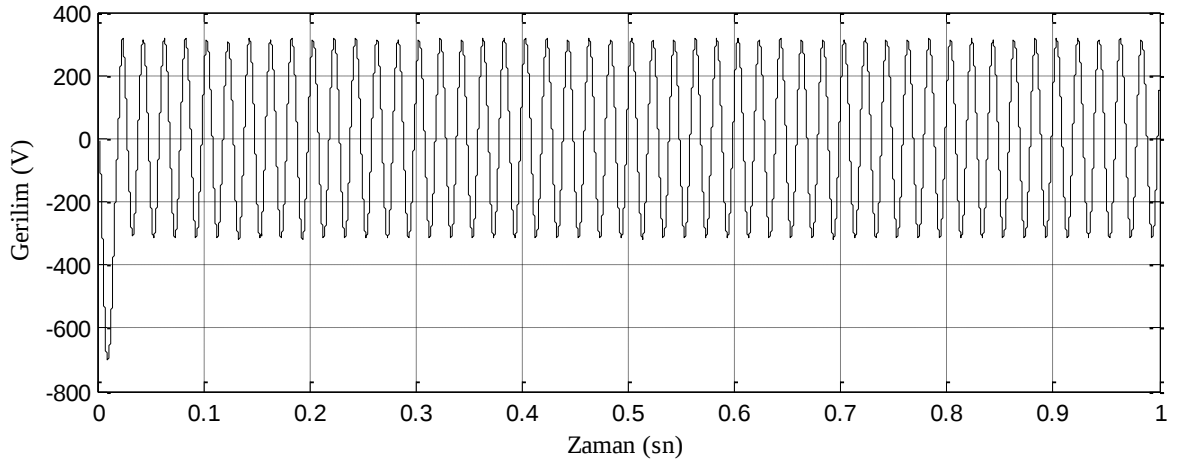


Şekil 6.53. 75 W'lık yükün devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi

75 W akkor flamanlı lambanın yük olarak kullanılması durumunda, çıkış geriliminin deneysel ve benzetim sonuçları Şekil 6.54 ve Şekil 6.55'te verilmiştir.

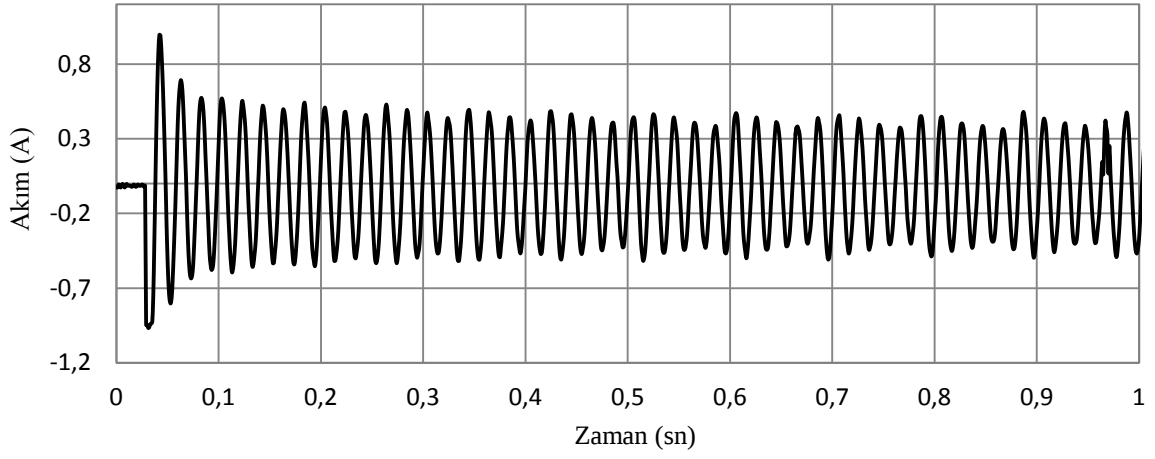


Şekil 6.54. 75 W'lık yük için çıkış gerilimi (deneysel sonuç)

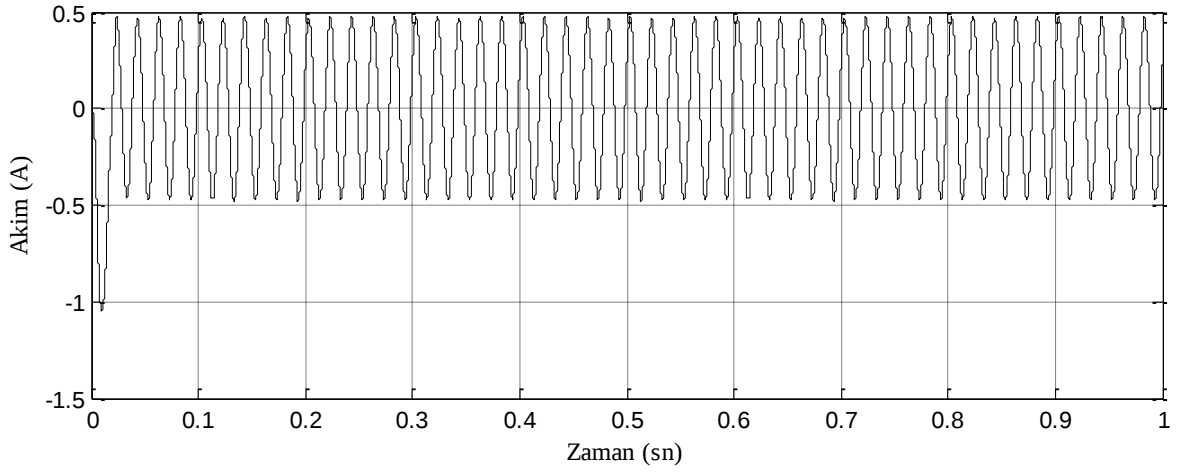


Şekil 6.55. 75 W'lık yük için çıkış gerilimi (benzetim sonucu)

İnverter çıkışına 75 W gücünde akkor flamanlı lamba bağlandığı durumda inverter kendini otomatik olarak kapattığı için yük akımı Şekil 6.56'dan görüldüğü gibi ilk anda yaklaşık 1 A akım çekmiş, sonrasında 0,45 A akım seviyelerinde salınım yaparak 1,4 saniye sonunda tamamen sıfırlanmıştır. Şekil 6.57'deki benzetim sonucunda ise sistem ilk anda yaklaşık 1 A akım çekmiş, sürekli durumda ise tepe değeri 0,5 A olan sinüzoidal bir eğri ile salınım yapmıştır.

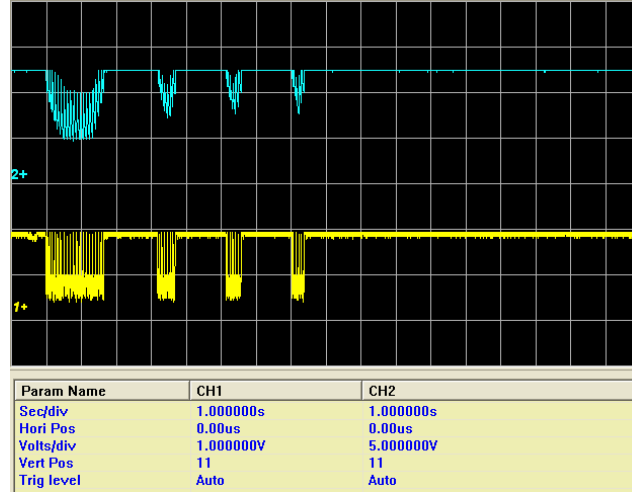


Şekil 6.56. 75 W için yük akımı (deneysel sonuç)



Şekil 6.57. 75 W için yük akımı (benzetim sonucu)

Son olarak da fanın devreye alınmasıyla inverterin kapanmasına kadar geçen sürede oluşan değişimler Şekil 6.58’de verilmiştir. Yaklaşık 1,6 saniye sonunda inverter otomatik olarak devreden çıkmıştır.

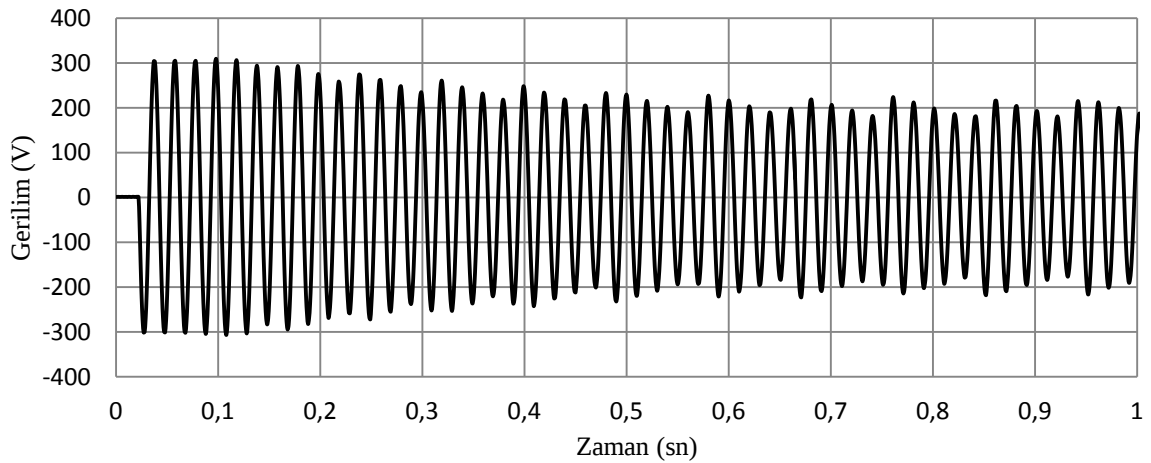


Şekil 6.58. Fanın devreye alınma anındaki PV ve konverter gerilimi

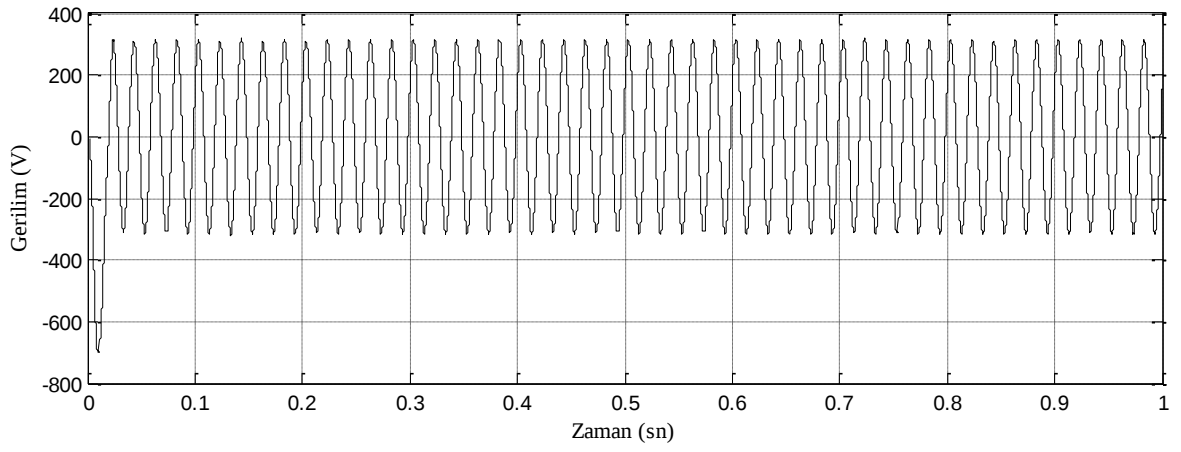
Şekil 6.59'dan da görüldüğü üzere inverter çıkış gerilimi yaklaşık 300 V gerilim değerinden başlayıp azalmıştır. Yaklaşık 1,4 saniye sonunda inverter otomatik olarak devreden çıkmıştır.

Fan değerleri benzetim çalışmasına eklenerek Şekil 6.60'daki gerilim eğrisi elde edilmiştir. Şekil 6.61'de ise fan akımının deneysel sonucu verilmiştir. Fan akımı benzetim sonucu elde edilen Şekil 6.62'deki akım eğrisiyle benzerdir.

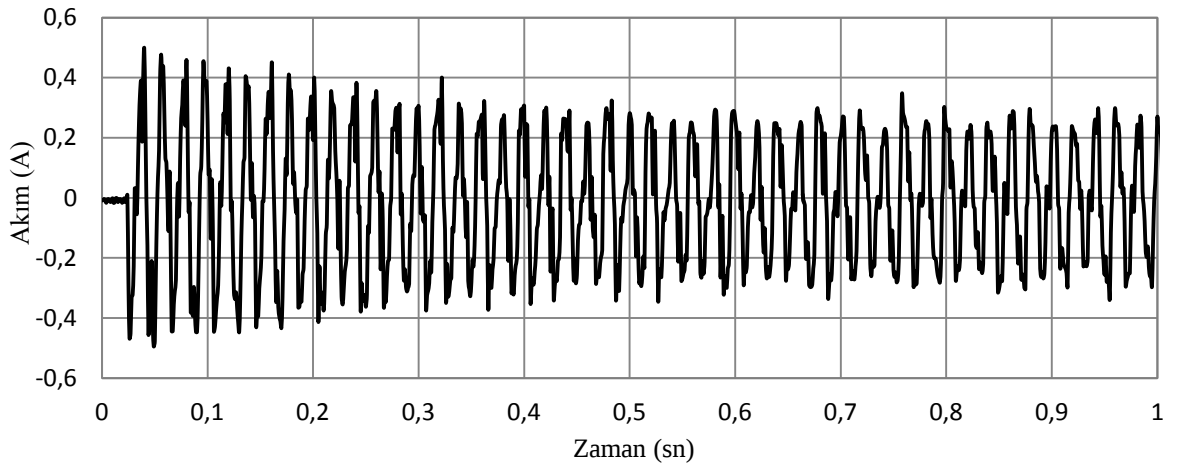
Hem deneysel hem de benzetim çalışmalarında gerilim eğrilerinin akıma göre daha düzgün bir değişim gösterdiği Şekil 6.59-Şekil 6.62'den görülmektedir.



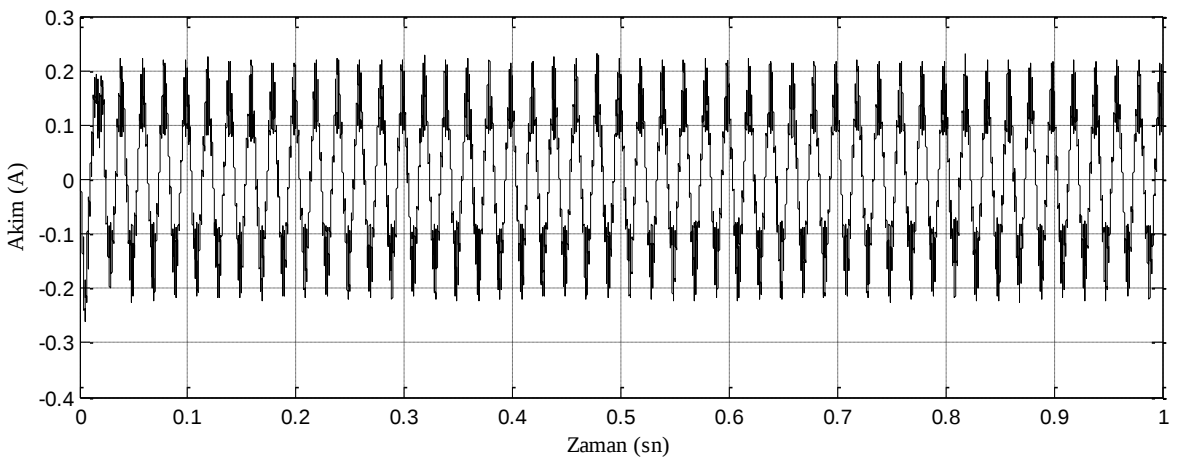
Şekil 6.59. Fan gerilimi (deneysel sonuç)



Şekil 6.60. Fan gerilimi (benzetim sonucu)



Şekil 6.61. Fan akımı (deneysel sonuç)



Şekil 6.62. Fan akımı (benzetim sonucu)

Deneyler sonucunda gerilim için oldukça düzgün sinüzoidal eğriler elde edilmiştir. Akım eğrileri ise kullanılan yüke göre değişiklik göstermiştir. Benzetim çalışmalarında elde edilen akım eğrileri ise deneysel sonuçlarda olduğu gibi başlangıç anında yüksek bir değere ulaşp sonra nominal değerleri yakalamıştır. Gerilim eğrileri de akım eğrisini takip ederek ilk anlarda yüksek değerlere gitmiştir. Ancak deneysel çalışmalarda kullanılan ticari inverter tam sinüs inverter olduğundan gerilim ilk anlarda yüksek değerlere ulaşmadan nominal değerlerde salınım yapmıştır.

Deneylerde kullanılan güneş pili 160 W gücünde olmasına rağmen maksimum 75 W'lık yük beslenebilmiştir. Bunun sebebi güneş panellerinin kurulduğu alanın günün belli saatlerinde güneş ışığını dik alması, mevsim şartları ve panellerin sabit olmasıdır. Hareketli panellerin kullanılmasıyla ve maksimum güç noktası izleyicisinin de eklenmesiyle daha yüksek güçlerde çalışmak mümkündür.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Yakıt pillerinin evsel uygulamalarda kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklı hibrit sistemler de konutlarda şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak kullanılabilir. Özellikle şebekeden bağımsız küçük güçteki uygulamalar için yakıt pilleri, enerji depolama elemanlarına alternatif olarak düşünülebilir. Aynı zamanda yakıt pilleri konutlarda sabit ya da taşınabilir cihazlar için güç sağlamak amacıyla da kullanılabilir. Yakıt pilleri ile diz üstü bilgisayarlar, cep telefonları gibi elektronik cihazlar için daha uzun çalışma süreleri sağlamak mümkündür. Taşınabilir cihazlar için ağırlık ve boyut, varolan tasarımlar ile kıyaslanabilir ölçüde olmalıdır.

Konutlarda birçok teknik avantaja sahip olan yakıt pillerinin kullanımındaki en önemli problem şüphesiz maliyettir. Bu problem ise teknolojinin gelişmesi, müşteri talebinin artması ve seri üretimin başlamasıyla çözülebilir. Yakıt pili uygulamalarının artması, hidrojen depolama ve taşıma yöntemlerinin gelişmesi ile gelecekte yakıt pili sistemlerine ilişkin maliyetlerin de önemli ölçüde azalacağı beklenmektedir.

Günümüzde PEM yakıt pilleri hem kolay erişimi hem de maliyetinin düşük olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak evsel yakıt pili sistemlerinde düşük çalışma sıcaklığı nedeniyle PEM yakıt pili ısı elde etmek amacıyla kullanılamamaktadır. Evsel yakıt pili sistemlerinde daha yüksek verimlere ulaşabilmek amacıyla ısı ve güç sistemleri de kullanılır. Kombine ısı ve güç sistemlerinde kullanılabilecek en uygun yakıt pili türü, yüksek çalışma sıcaklığı nedeniyle SOFC'dir.

Güneş pilleri ile yapılan deneysel çalışmalardan, güneş enerjisi sistemlerinde maksimum güç noktası izleyicisinin (MPPT) kullanılmadığı durumlarda toplam verimin büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde sabit panel sistemleri yerine hareketli sistemler kullanılarak da verim artırılabilir.

Yapılan deneysel çalışmalar ve benzetim sonuçlarından yakıt pili-güneş pili hibrit sistemlerinin konutlarda, konutun veya bazı taşınabilir cihazların elektriksel ihtiyaçlarının karşılanmasında güvenilir bir şekilde kullanılabileceği görülmektedir. Ancak elektrik motorları gibi dinamik sistemlerde yakıt pillerinin tepkisi daha yavaştır.

7.2. Öneriler

Yapılan tez çalışması sürecinde ortaya çıkan ve sonraki çalışmalarda ele alınabilecek çeşitli araştırma ve iyileştirme konuları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Eysel uygulamalarda yenilenebilir enerji kaynakları ile birlikte kombine ısı ve güç sistemlerinin de kullanılarak konutun ısı ihtiyacının karşılanmasıyla sistemin verimi artırılabilir.
- Doğalgaz kullanımının giderek yaygınlaştığı ülkemizde, doğalgazın yakıt olarak kullanıldığı şebekeye bağlı evsel yakıt pili sistemleri geliştirilerek kullanılabilir.
- Güneş panellerinin kullanıldığı sistemlerde MPPT de kullanılarak verim arttırılabilir.
- Gerçekleştirilen sistemin maliyet analizi yapılarak ekonomik açıdan kullanılabilirliği irdelenebilir.
- Ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli bakımından oldukça zengindir. Bu nedenle enerji üretiminde ana enerji kaynağını güneşin oluşturduğu hibrit sistemlere öncelik verilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Dicks, A., Larminie, J.**, 2000, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, İngiltere.
- [2] **Ural, Z.**, 2007, Yakıt Pilleri ve Bir PEM Yakıt Pili Sisteminin Dinamik Benzetimi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- [3] **Oğuz, A.E.**, Nisan 2006, Hidrojen Yakıt Pilleri ve PEM Yakıt Pili Analizi, *Yüksek lisans tezi*, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [4] **Ural, Z.**, 2009, Yakıt Pillerinin Konutlarda Kullanımı, *Doktora Semineri*, Fırat Üniversitesi.
- [5] **Kurtuluş, G., Tabakoğlu, F.Ö., Türe, İ.E.**, Mart 2007, Türkiye’de Hidrojen Enerjisi Çalışmaları ve UNIDO-ICHET, *3E Electrotech-Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi*.
- [6] **Onovwionaa, H.I., Ugursal, V.I.**, 2006, Residential cogeneration systems: review of the current technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 389–431.
- [7] **Spiegel, C.**, 2008, PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab, Elsevier Inc.
- [8] **Aki, H.**, 2007, The Penetration of Micro CHP in Residential Dwellings in Japan, *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, 1-4.
- [9] **Lisbona, P., Corradetti, A., Bove, R., Lunghi, P.**, 2007, Analysis of A Solid Oxide Fuel Cell System for Combined Heat and Power Applications Under Non-Nominal Conditions, *Electrochimica Acta*, **53**, 1920-1930.
- [10] **Bouneb, B., Grant, D.M., Cruden, A., Mcdonald, J.R.**, 2005, Grid Connected Inverter Suitable for Economic Residential Fuel Cell Operation, *Power Electronics and Applications*, 2005 European Conference on, Dresden.
- [11] **Shaneb, O.A., Taylor, P.C.**, 2010, Evaluation of Alternative Operating Strategies for Residential Micro Combined Heat and Power, *IEEE International Energy Conference*.
- [12] **Chu, H.-S., Tsau, F., Yan, Y.-Y., Hsueh, K.-L., Chen, F.-L.**, 2008, The Development of A Small PEMFC Combined Heat and Power System, *Journal of Power Sources*, **176**, 499–514.
- [13] **Tsourapas, V., Sun, J., Stefanopoulou, A.**, 2004, Modeling and Dynamics of A Fuel Cell Combined Heat Power System For Marine Applications, *IASME Transactions*, **2(1)**, 288-293.

- [14] **Shabani, B., Andrews, J., Watkins, S.,** 2010, Energy and Cost Analysis of A Solar-Hydrogen Combined Heat and Power System for Remote Power Supply Using A Computer Simulation, *Solar Energy*, **84**, 144-155.
- [15] **Cetin, E., Yilanci, A., Öztürk, H.K., Çolak, M., Kaşıkçı, İ., İplikçi, S.,** 2010, A Micro-DC Power Distribution System for A Residential Application Energized by Photovoltaic–Wind/Fuel Cell Hybrid Energy Systems, *Energy and Buildings*, **42**, 1344-1352.
- [16] **Cetin, E., Yilanci, A., Oner, Y., Colak, M., Kasikci, I., Ozturk, H.K.,** 2009, Electrical Analysis of A Hybrid Photovoltaic-Hydrogen/Fuel Cell Energy System in Denizli, Turkey, *Energy and Buildings*, **41**, 975–981.
- [17] **Yilanci, A., Dincer, I., Ozturk, H.K.,** 2009, A Review on Solar-Hydrogen/Fuel Cell Hybrid Energy Systems for Stationary Applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, **35**, 231-244.
- [18] **Colson, C. M., Nehrir, M. H.,** March 2011, Evaluating The Benefits of A Hybrid Solid Oxide Fuel Cell Combined Heat and Power Plant for Energy Sustainability and Emissions Avoidance, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **26(1)**.
- [19] **Bell, M., Swinton, M., Manning, M., Gusdorf, J., Szadkowski, F.,** 2006, Testing a Residential Fuel Cell for Combined Heat and Power, *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*.
- [20] **Roshandel, R., Seyedin, F.,** 2011, Modeling And Energy Analysis of Solar Hydrogen Fuel Cell System for Residential Applications, Proceedings of the ASME 2011 9th Fuel Cell Science, *Engineering and Technology Conference Fuel Cell 2011*, Washington, DC, USA.
- [21] **Scrivano, G., Piacentino, A., Cardona, F.,** 2009, Experimental Characterization of PEM Fuel Cells by Micro-Models for The Prediction of On-Site Performance, *Renewable Energy*, **34**, 634–639.
- [22] **Barbir, F.,** 2005, PEM Electrolysis for Production of Hydrogen from Renewable Energy Sources, *Solar Energy*, **78**, 661–669.
- [23] **Li, C.-H., Zhu, X.-J., Cao, G.-Y., Sui, S., Hu, M.-R.,** 2009, Dynamic Modeling and Sizing Optimization of Stand-Alone Photovoltaic Power Systems Using Hybrid Energy Storage Technology, *Renewable Energy*, **34**, 815–826.
- [24] **El-Sayed, A.G., Obara, S.,** 2010, Power Generation Efficiency of Photovoltaics and A SOFC-PEFC Combined Micro-Grid with Time Shift Utilization of The SOFC Exhaust Heat, *IEEE International Power Electronics Conference*.
- [25] **Hamada, Y., Takeda, K., Goto, R., Kubota, H.,** 2011, Hybrid Utilization of Renewable Energy and Fuel Cells for Residential Energy Systems, *Energy and Buildings*, **43**, 3680–3684.

- [26] **Little, M., Thomson, M., Infield, D.,** 2007, Electrical Integration of Renewable Energy into Stand-Alone Power Supplies Incorporating Hydrogen Storage, *International Journal of Hydrogen Energy*, **32**, 1582–1588.
- [27] **Deshmukh, S.S., Boehm, R.F.,** 2008, Review of Modeling Details Related to Renewably Powered Hydrogen Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2301–2330.
- [28] **Santarelli, M., Cali, M., Macagno, S.,** 2004, Design and Analysis of Stand-Alone Hydrogen Energy Systems with Different Renewable Sources, *International Journal of Hydrogen Energy*, **29**, 1571–1586.
- [29] **Shahnia, F., Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G., Zare, F.,** 2010, Operation and Control of A Hybrid Microgrid Containing Unbalanced and Nonlinear Loads, *Electric Power Systems Research*, **80**, 954–965.
- [30] **Salam, A.A., Mohamed, A., Hannan, M.A.,** October 2009, Improved Control Strategy for Fuel Cell And Photovoltaic Inverters in A Microgrid, *Wseas Transactions on Power Systems*, **4(10)**.
- [31] **Fargali, H.M., Fahmy, F.H., Hassan, M.A.,** 2010, A Simulation Model for Predicting The Performance of PV/Wind–Powered Geothermal Space Heating System in Egypt, *The Online Journal on Electronics and Electrical Engineering (OJEEE)*, **2(4)**.
- [32] **Jalilzadeh, S., Rohani, A., Kord, H., Nemati, M.,** 2009, Optimum Design of A Hybrid Photovoltaic/Fuel Cell Energy System for Stand-Alone Applications, *6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, ECTI-CON 2009, **1**, 152 – 155.
- [33] **Stewart, E.M., Lutz, A.E., Schoenung, S., Chiesa, M., Keller, J.O., Fletcher, J., Ault, G., McDonald, J., Cruden, A.,** 2009, Modeling, Analysis and Control System Development for The Italian Hydrogen House, *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 1638–1646.
- [34] **Zervas, P.L., Sarimveis, H., Palyvos, J.A., Markatos, N.C.G.,** 2008, Model-Based Optimal Control of A Hybrid Power Generation System Consisting of Photovoltaic Arrays and Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, **181**, 327–338.
- [35] **Zhang, X., Chan, S.H., Li, G., Ho, H.K., Li, J., Feng, Z.,** 2010, A Review of Integration Strategies for Solid Oxide Fuel Cells, *Journal of Power Sources*, **195**, 685–702.
- [36] **Erdinc, O., Uzunoglu, M.,** 2010, Recent Trends in PEM Fuel Cell-Powered Hybrid Systems: Investigation of Application Areas, Design Architectures and Energy Management Approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2874–2884.

- [37] **Shabani, B., Andrews, J.,** 2011, An Experimental Investigation of A PEM Fuel Cell to Supply Both Heat and Power in A Solar-Hydrogen RAPS System, *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 5442-5452.
- [38] **Ahmed, N.A., Al-Othman, A.K., AlRashidi, M.R.,** 2011, Development of An Efficient Utility Interactive Combined Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Power System with MPPT and DC Bus Voltage Regulation, *Electric Power Systems Research*, **81**, 1096–1106.
- [39] **Jain, S., Jiang, J., Huang, X., Stevandić, S.,** 2008, Modeling of Fuel Cell Based Power Supply System for Grid Interface, *Power System Technology and IEEE Power India Conference*, POWERCON 2008.
- [40] **Ganguly, A., Misra, D., Ghosh, S.,** 2010,, Modeling and Analysis of Solar Photovoltaic-Electrolyzer-Fuel Cell Hybrid Power System Integrated with A Floriculture Greenhouse, *Energy and Buildings*, **42**, 2036–2043.
- [41] **Mahlia, T.M.I., Chan, P.L.,** 2011, Life Cycle Cost Analysis of Fuel Cell Based Cogeneration System for Residential Application in Malaysia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 416-426.
- [42] **Maclay, J.D., Brouwer, J., Samuelsen, G.S.,** 2011, Experimental Results for Hybrid Energy Storage Systems Coupled to Photovoltaic Generation in Residential Applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 12130-12140.
- [43] **Ramirez, S.,** 2010, ‘Model based Fault Detection and Isolation for a PEM Fuel Cell System’, *Master of Science in Chemical Engineering*, Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- [44] **Pravadaloğlu, S.,** Mart, 2007, Yakıt Hücresi Beslemeli Kesintisiz Güç Kaynağı, *3E Electrotech-Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi*.
- [45] **Aydın, M.,** Ocak, 2007, PEM Yakıt Pilinin İki Boyutlu Modellemesi, *Yüksek lisans tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [46] **Holland, B.J., Zhu, J.G., Jamet, L.,** Fuel cell technology and application. Available at: http://services.eng.uts.edu.au/cempe/subjects/JGZ/eet/AUPEC01_111.pdf.
- [47] **Shahrokhi, F., Nasab, A., Guarnaccia, R.,** 13-15 July 2007, Innovative applications of hydrogen fuel cells, *2nd International Hydrogen Energy Congress and Exhibition*, IHEC 2007 Istanbul Turkey.
- [48] **Varigonda, S., Kamat, M.,** 2006, Control of stationary and transportation fuel cell systems: Progress and opportunities, *Computers and Chemical Engineering*, **30**, 1735–1748.

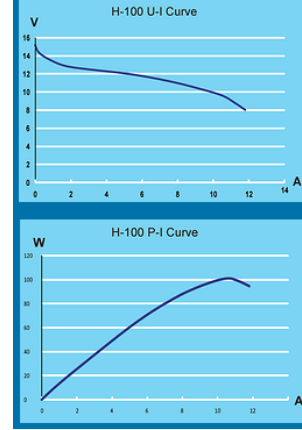
- [49] **Lokurlu, A., Grube, T., Höhle, B., Stolten, D.,** 2003, Fuel cells for mobile and stationary applications-cost analysis for combined heat and power stations on the basis of fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy*, **28**, 703–711.
- [50] **Wang, C., Mao, Z., Bao, F., Li, X., Xie, X.,** 2005, Development and performance of 5 kw proton exchange membrane fuel cell stationary power system, *International Journal of Hydrogen Energy*, **30**, 1031–1034.
- [51] **Moujaes, S., Deshmukh, S.S.,** 2005, An evaluation of a residential energy conserving HVA system and a residential energy demand/management system, *Energy Eng J Assoc Energy Eng.*, **102(6)**, 39–57.
- [52] **Deshmukh, S.S., Boehm, R.F.,** 2008, Review of modeling details related to renewably powered hydrogen systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **12**, 2301–2330.
- [53] **EG&G Services Parsons, Inc.,** October 2000, Science Applications International Corporation, Fuel Cell Handbook Fifth Edition, National Energy Technology Laboratory.
- [54] **Corbo, P., Migliardini, F., Veneri, O.,** 2007, Experimental analysis and management issues of a hydrogen fuel cell system for stationary and mobile application, *Energy Conversion and Management*, **48**, 2365–2374.
- [55] **Cook, B.,** December 2001, An introduction to fuel cells and hydrogen technology, Canada.
- [56] **Zink, F., Lu, Y., Schaefer, L.,** 2007, A solid oxide fuel cell system for buildings, *Energy Conversion and Management*, **48**, 809–818.
- [57] **Brown, J.E., Hendry, C.N., Harborne, P.,** 2007, An emerging market in fuel cells? Residential combined heat and power in four countries, *Energy Policy*, **35**, 2173–2186,
- [58] **Dufour, A.U.,** 1998, Fuel cells – a new contributor to stationary power, *Journal of Power Sources*, **71**, 19–25.
- [59] **Lemes, Z., Vath, A., Hartkopf, T., Mancher, H.,** 2006, Dynamic fuel cell models and their application in hardware in the loop simulation, *Journal of Power Sources*, **154**, 386–393.
- [60] **McNicol, B.D., Rand, D.A.J., Williams, K.R.,** 2001, Fuel cells for road transportation purposes – yes or no?, *Journal of Power Source*, **100**, 47–59.
- [61] **Carrette, L., Friedrich, K.A., Stimming, U.,** 2000, Fuel cells: principles, types, fuels, and applications. *ChemPhysChem*, **1(4)**, 162–93.

- [62] **Conte, M., Iacobazzi A., Ronchetti, M., Vellone, R.,** 2001, Hydrogen economy for a sustainable development: state of the art and technological perspectives. *Journal of Power Source*, **100**, 171–87.
- [63] **Corbo, P., Migliardini, F., Veneri, O.,** 2007, Experimental analysis and management issues of a hydrogen fuel cell system for stationary and mobile application, *Energy Conversion and Management*, **48**, 2365–2374.
- [64] **Rajashekara, K.,** 2005, Hybrid fuel-cell strategies for clean power generation. *IEEE Trans. on Industry App*, **41(3)**.
- [65] **Blomen, L.J.M.J., Mugerwa, M.N.,** 1993, *Fuel cell systems*, Plenum Press.
- [66] **Pecen, RR., Yıldız, F., Baltacı, K.,** 13-15 July 2007, Development of a DATA acquisition and interface module for a 500 W hydrogen fuel-cell power station using LabView™ PDS v8.20, *2nd International Hydrogen Energy Congress and Exhibition*, IHEC 2007 Istanbul Turkey.
- [67] **Eudy, L., Chandler, K.,** 2013, SunLine Transit Agency Advanced Technology Fuel Cell Bus Evaluation: Fourth Results Report.
- [68] **Gencoglu, M.T., Ural, Z.,** 2009, Design of a PEM fuel cell system for residential application, *International Journal of Hydrogen Energy*, **34**, 5242–5248.
- [69] **Cottrell, C.A., Grasman, S.E., Thomas, M., Martin, K.B., Sheffield, J.W.,** 2011, Strategies for stationary and portable fuel cell markets, *International Journal of Hydrogen Energy*, **36**, 7969-7975.
- [70] **Simon, W.E., Nored, D.L.,** 1987, *Proceedings of The IEEE*, **75 (3)**, 277.
- [71] **Warshay, M., Prokopius, P.R.,** 1990, *Journal of Power Sources*, **29**, 193.
- [72] **Simon, W.E.,** 1985, *Space Shuttle Technical Conference*, NASA CP-2342, 702.
- [73] **Kuwajima, S., Takehara, Z.,** 2000, Fuel cell Technology and It's Applications, Technosystem, Tokyo, III, 293.
- [74] **Sone, Y., Ueno, M., Kuwajima, S.,** 2004, Fuel cell development for space applications: fuel cell system in a closed environment, *Journal of Power Sources*, **137**, 269–276.
- [75] **Wang, C., Nehrir, M.H., Shaw, S.R.,** June, 2005, Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuit, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20(2)**.
- [76] **Lee, J.M., Cho, B.H.,** A Dynamic Model of a PEM Fuel Cell System, 978-1-422-2 812-0/09/\$25.00 ©2009 IEEE

- [77] **Yalcinoz, T., Alam, M.S.,** 2007, The Dynamic Performance of PEM Fuel Cells under Various Operating Conditions of a Laptop Computer, *The International Conference on "Computer as a Tool"*, EUROCON 2007 Warsaw, September 9-12.
- [78] **El-Sharkh, M.Y., Rahman, A., Alam, M.S., Byrne, P.C., Sakla, A.A., Thomas, T.,** 2004, A Dynamic Model for A Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant for Residential Applications, *Journal of Power Sources*, **138** , 199–204.
- [79] **Soltani, M., Bathaee, S.M.T.,** 2008, A New Dynamic Model Considering Effects of Temperature, Pressure and Internal Resistance for PEM Fuel Cell Power Modules, DRPT, Nanjing China, 6-9 April.
- [80] **Tsai, H.L., Tu, C.S., Su, Y.J.,** 2008, Development of Generalized Photovoltaic Model Using Matlab/Simulink, *Proceedings of The World Congress on Engineering and Computer Science*, WCECS San Francisco, USA.
- [81] **Pearce, J.M.,** 2009, Expanding Photovoltaic Penetration with Residential Distributed Generation from Hybrid Solar Photovoltaic and Combined Heat and Power Systems, *Energy*, **34**, 1947–1954.
- [82] **Gelen, A.,** 2012, Yakıt Pillerinin Enerji Sistemlerindeki Dinamik Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [83] **Khan, M.J., Iqbal, M.T.,** 2005, Dynamic Modelling and Simulation of a Fuel Cell Generator, *Fuel Cells*, **5(1)**.
- [84] **Uzunoglu, M., Onar, O.C., Alam, M.S.,** 2009, Modeling, Control and Simulation of A PV/FC/UC Based Hybrid Power Generation System for Stand-Alone Applications. *Renewable Energy*, **34**, 509-520.
- [85] **Won Suh, K.,** Modeling, Analysis and Control of Fuel Cell Hybrid Power Systems, *PhD Thesis*, Department of Mechanical Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
- [86] **Selamoğulları, U.S.,** 2005, A Systems Approach for Stand Alone Residential Fuel Cell Power System Design, *Phd Thesis*, Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.
- [87] **Deshmukh, S.S., Boehm, R.F.,** 2008, Review of Modeling Details Related to Renewably Powered Hydrogen Systems, *Renewable and Sustainable energy Reviews*, **12**, 2301-2330.

EKLER

Ek 1. H-100 PEM Yakıt Pili 100 W (FCS C100)



Yarı entegre 100W yakıt pili sistemi teknik özellikleri:

Hücre sayısı	: 20
Anma gücü	: 100 W
Anma performansı	: 12 V, 8.3 A
Hidrojen kaynağı vana gerilimi	: 12 V
Tasfiye vanası gerilimi	: 12 V
Fan gerilimi	: 12 V
Reaktantlar	: Hidrojen ve hava
Ortam sıcaklığı	: 5-30 °C (41-86 °F)
Maksimum yığın sıcaklığı	: 65 °C (149 F°)
Hidrojen basıncı	: 0.45-0.55 bar
Nemlendirme	: Oto nemlendirilmiş
Soğutma	: Hava(soğutma fanı entegre edilmiş)
Yığın Ağırlığı (fan ve gövde ile birlikte)	: 1290 gr (±30 gr)
Kontrolör ağırlığı	: 400 gr
Yığın boyutları	: 118x104x94 mm (4.6x4.1x3.7 in)
Maksimum çıkışda akış oranı	: 1.3 L/dk
Hidrojen saflığı	: ≥ % 99.995 kuru H ₂
Başlama zamanı	: ≤ 30 sn (ortam sıcaklığında)
Sistemin verimi	: 12 V'da % 40
Düşük gerilim koruması	: 10 V
Aşırı akım koruması	: 12 A
Aşırı sıcaklık koruması	: 65 °C
Harici güç kaynağı	: 13 V ((±1 V), 5 A

Ek 2. DSP-160 Güneş Pili

160 W güneş paneli elektriksel özellikleri:

Max. Güç	(P_{max})	160W
Max Güç Noktasındaki Gerilim Değeri	(V_{mpp})	35.2 V
Max Güç Noktasındaki Akım Değeri	(I_{mpp})	4.44 A
Açık Devre Gerilimi	(V_{oc})	43.3 V
Kısa Devre Akımı	(I_{sc})	4.98 A
Akımın Sıcaklık Ka.tsayısı	(α)	0.038
Gerilimin Sıcaklık Katsayısı	(β)	-0.35
Seri Bağlı Hücre Sayısı	(N_{sc})	9
Paralel Bağlı Kol Sayısı	(N_{pc})	4
Güneş Pili Yapısı	<i>Mono-Crystalline Silicon</i>	

Ek 3. SD-200B-12 DC-DC Konverter (Meanwell)

200 W gücünde 19-36 V DC giriş, 12V, 0-16.7 A çıkışa sahip olan DC-DC konverterin boyutları 215x115x50 mm'dir.



Özellikler

- 2:1 Geniş giriş aralığı
- Sıcaklık koruması aşırı voltaj aşırı yük kısa devre,,,
- 1500VDC I / O izolasyonu
- Serbest hava konveksiyon ile Soğutma
- % 100 tam yük burn-in testi
- Tasarım LVD ifade eder

Giriş Voltajı 19 ~ 36VDC

Hat Tüzüğü $\Delta \pm 0.5\%$

Yönetmelik $\Delta \pm 1.0\%$ yükleyin

Tam yükte Zaman 300ms, 50ms Rise, Set Up

Aşırı Yük Koruması 105% ~ 135% nominal çıkış gücü

Kurtarmak için o / p gerilim, yeniden güç kapatın

Kurtarmak için Aşırı Gerilim Koruması kapatın o / p gerilim, yeniden güç

Aşırı Sıcaklık Koruması 95A ° C $\Delta \pm 5A$ ° C (100A ° C $\Delta \pm 5A$ ° C SD-200B-12 için) TSW1 ana güç transistörü tespit

Soğuyuncaya sonra o / p gerilimi kapatın, otomatik kurtarır

Çalışma Sıcaklığı -20A ° C ~ +60 ° C (çıkış yük eğrisine bakın)

Nem 20 Çalışma ~% 90 RH yoğunlaşmamış

Depolama Sıcaklığı, Nem-40A ° C ~ +85 ° C, 10 ~ 95% RH

Sıcaklık Katsayısı $\Delta \pm 0.03\%$ / ° C (0 ~ 50A ° C)

Titreşim 10 ~ 500Hz, 2G 10 dk. / 1 döngü, 60 dk. X, Y, Z eksen boyuncası her bir

Dayanım Gerilimi I / PO / P: 1.5KVAC, I / P-FG: 1.5KVAC, O / P-FG: 0.5KVAC

İzolasyon Direnci I / PO / P, I / P-FG, O / P-FG: 100M Ohms/500VDC

Güvenlik Standartları Tasarım LVD anlamına gelir

EN55022 için EMI iletim ve radyasyon Uyum (CISPR22) Sınıf B

EN61000-4-2'ye EMS bağışıklık Uyum, 3,4,6,8; ENV50204 Ağır sanayi düzeyinde, Kriter A

MTBF 218.2K saat min. MIL-HDBK-217F (25A ° C)

Part Number	Voltage (max/rated)	Current (amps)	Power (watts)	R&N (mV)	Efficiency (%)
SD-200B-5	5V	34A	170W	100mV	79%
SD-200B-12	12V	17A	200.4W	120mV	82%

Ek 4. SD-500L-12 DC-DC Konverter (Meanwell)

500 W gücünde, 19-72 V giriş, 12 V_0-40 A çıkış, 215x115x50 mm boyutlarında bir DC-DC konvertör kullanılmıştır.



Özellikler

- Sınırlayıcı DC girişi aktif akımı
- Geniş 04:01 ~ 02:01 DC giriş aralığı 24V: 19 ~ 72VDC
- Sıcaklığı, giriş polaritesi fazla aşırı voltaj aşırı yük kısa devre,, (sigorta ile) koruyucuları
- 2000VAC I / O İzolasyon
- Dahili DC fan tarafından Cebri hava soğutmalı
- Çıktı OK Sinyali
- Uzaktan ON-OFF kontrol Dahili
- Dahili uzaktan anlamda işlevi

19 Kompakt 500W tek çıkış DC-DC Çevirici ~ 72VDC giriş ve 12V, 24V ve 48V çıkış düzeyi seçenekleri. Sıcaklık ve giriş polaritesi fazla aşırı voltaj aşırı yük kısa devre,, built-in bu seriden ayrıca çıkış OK sinyali gibi fonksiyonları içeren korumaları, uzaktan ON / kontrol ve uzaktan duyu fonksiyonu KAPALI.

Giriş Voltajı 19 ~ 72VDC

Giriş Akımı 12A/48VDC

Yüksüz 0.2A/48VDC Anda Girdi

Yığılma Akımı 60A/48VDC

Tam yükte Zaman 500ms, 50ms Rise, Set Up

Yük Koruması 105 ~ 125% nominal çıkış gücü fazla

Sabit akım yaklaşık 5 saniye sonra, kapatma o / p gerilim sınırlayıcı,, Yeniden güç kurtarmak için

Kurtarmak için Aşırı Gerilim Koruması kapatın o / p gerilim, yeniden güç

Aşırı Sıcaklık Koruması 85A ° C $\pm$ 10A ° C (TSW2) O / P diyet soğutucu üzerinde tespit;

80 ° C $\pm$ 5A ° C (TSW1) güç transistör soğutucu üzerinde tespit

Soğuyuncaya sonra o / p gerilimi kapatın, otomatik kurtarır

Lütfen Açık / Kapalı Kontrol Uzaktan pdf bakın

10mA: Çıkış PSU yanar OK Sinyal Açık kollektör sinyali düşük, Max akım batır

Çalışma Sıcaklığı -20A ° C ~ +60 ° C (çıkış yük eğrisine bakın)

Nem 20 Çalışma ~% 90 RH yoğunlaşmamış

Depolama Sıcaklığı, Nem-40A ° C ~ +85 ° C, 10 ~ 95% RH

Sıcaklık Katsayısı $\Delta \pm 0.02\%$ / ° C (0 ~ 50A ° C)

Titreşim 10 ~ 500Hz, 2G 10 dk. / 1 devir, 60dk. X, Y, Z eksen boyunca her bir

Dayanım Gerilimi I / PO / P: 2KVAC I / P-FG: 1.5KVAC O / P-FG: 0.5KVAC

İzolasyon Direnci I / PO / P, I / P-FG, O / P-FG: 100M Ohms/500VDC 25A ° C 70% RH

Güvenlik Standartları IEC60950-1 CB TUV tarafından onaylı

EN55022 (CISPR22) Sınıf B EMC Uyum;

EN61000-4-2, 3,4,6,8; ENV50204, hafif sanayi düzeyinde, kriter A

MTBF 196.3K saat min. MIL-HDBK-217 (25A ° C)

Part Number	Voltage (max/rated)	Current (amps)	Power (watts)	R&N (mV)	Efficiency (%)
SD-500L-12	12V	40A	480W	150mV	85%

Ek 5. Xantrex PROwatt-SW 700i



12 V 700 W Xantrex tam sinus inverter için teknik detaylar aşağıda verilmiştir.

GENEL ÖZELLİKLER

Model	SW700i
Güç	700 W
Demeraj Gücü	1400 W
Giriş Gerilimi	12V DC
Çıkış Gerilimi	230 Vac $\pm$ 10%
Verim	% 90
Frekans	50 / 60 Hz
Yüksüz akım çekimi	< 1000 mA
Çıkış Dalga Şekli	Tam Sinüs
Boyutlar (G x D x Y)	310 x 185 x 90 mm
Ağırlık	2,7 kg
Sertifikalar	CE onaylı

- ✓ Tam Sinüs dalga şekli motorlu yüklerde problemsiz çalışma sağlar.
- ✓ Araç, tekne v.b. profesyonel uygulamalar için uygun yapı.
- ✓ 1 adet Schuko marka priz.
- ✓ 700W gücünde Klima, buzdolabı, kompresör, mikro dalga fırın, saç kurutma makinesi, elektrik süpürgesi gibi ağır yükler için uygun.
- ✓ Başlangıç akımı yüksek yükler için yüksek demeraj kabiliyeti.
- ✓ Aşırı yük, aşırı ısı, düşük-yüksek akü gerilimi durumlarında otomatik kapanma.
- ✓ Kısa devre koruması.
- ✓ Otomatik kapanma özelliği akünün tamamen boşalmasını önler.
- ✓ Güç tasarruf özelliği akünün gereksiz kullanılmasını önler.
- ✓ Yük kontrollü soğutma fanı.

Ek 6. NI-USB 6341 Data Logger



1. 8 adet diferansiyel ya da 16 adet tek uçlu analog giriş
2. Analog-sayısal çevirici çözünürlüğü: 16-bit,
3. Tek kanal için en yüksek örnekleme hızı: 500 kS/s
4. Çok kanal için en yüksek toplam örnekleme hızı: 500 kS/s
5. Giriş kuplajı: DC
6. Giriş gerilimi: ± 10 V, ± 5 V, ± 1 V, ± 0.2 V
7. DC ile 60 Hz arasında ortak mod zayıflatma oranı: 100 dB
8. Küçük işaret bant genişliği (-3 dB): 1.2 MHz olmalıdır.
9. Giriş FIFO boyutu: 4095
10. 2 adet analog çıkış
11. Sayısal-analog çevirici çözünürlüğü: 16-bit
12. Tek kanal için en yüksek yenileme hızı: 900 kS/s
13. İki kanal için en yüksek yenileme hızı her kanal için 840 kS/s
14. En düşük çıkış gerilimi: -10 V
15. En yüksek çıkış gerilimi: +10 V
16. Çıkış kuplajı DC
17. En düşük çıkış akımı: -5 mA
18. En yüksek çıkış akımı: +5 mA
19. Çıkış gerilimi değişim hızı: 15 V/ μ s
20. 24 adet sayısal giriş/çıkış
21. Sayısal giriş/çıkışların her biri giriş ya da çıkış olarak programlanabilir.
22. Aşağı çekme direnci: 20 k Ω
23. 4 adet sayıcı/zamanlayıcı
24. Sayıcı/zamanlayıcı çözünürlüğü: 32-bit
25. Sayıcı/zamanlayıcı dahili referans saat işareti 100 MHz, 20 MHz ve 100 kHz frekanslarını içerir.
26. Sayıcı/zamanlayıcı en yüksek harici referans saat işareti: 25 MHz
27. Sayıcı/zamanlayıcı referans saat işareti doğruluğu: 50 ppm
28. 1 adet frekans üretici
29. Frekans üretici dahili referans saat işareti 20 MHz, 10 MHz ve 100 kHz frekanslarını içerir.
30. Frekans üretici referans saat işareti doğruluğu: 50 ppm

ÖZGEÇMİŞ

Zehra URAL BAYRAK

Fırat Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Elazığ

0 424 237 0000/5216

E-posta: zural@firat.edu.tr

- 1982 : Elazığ'da doğdu.
- 1996-2000 : Elazığ Balakgazi Lisesi'ni bitirdi.
- 2000-2004 : Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimini tamamladı.
- 2004 : Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.
- 2005 : Dicle Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı.
- 2007 : Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı.
- 2008 : Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektrik Tesisleri Bilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Bu tarihten itibaren Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.