

T.C.  
Niğde Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yakıt Pillerinin  
Enerji Sistemlerindeki Dinamik Davranışlarının İncelenmesi

AYETÜL GELEN

Temmuz 2012



T.C.  
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YAKIT PİLLERİNİN  
ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

AYETÜL GELEN

Doktora Tezi

Danışman

Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ

Temmuz 2012

Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ danışmanlığında hazırlanan “Yakıt Pillerinin Enerji Sistemlerindeki Dinamik Davranışlarının İncelenmesi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Saadetdin HERDEM, Selçuk Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ, Melikşah Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Mahmut D. MAT, Niğde Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Murat UZAM, Melikşah Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Saffet AYASUN, Niğde Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../2012 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun ....../...../2012 tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../2012

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA

MÜDÜR

## ÖZET

### YAKIT PİLLERİNİN ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ DİNAMİK DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

GELEN, Ayetül  
Niğde Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ

Temmuz 2012, 110 sayfa

Günümüzde elektrik enerjisinin büyük bir çoğunluğu yenilenemeyen kaynaklardan (kömür, petrol, uranyum, vb.) sağlanmaktadır. Ancak, bu kaynaklardan elde edilen yakıtların çevreye olan zararlarından dolayı yeni alternatif güç kaynakları arayışı hızlanmaktadır. Alternatif güç kaynaklarından biri olan yakıt pilleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal güç dönüştürücüleridir. Yakıt pili sistemleri kullandıkları elektrolit çeşidine göre; proton değişim membran yakıt pilleri, katı oksit yakıt pilleri, bazik yakıt pilleri, erimiş karbonat yakıt pilleri ve fosforik asit yakıt pilleri şeklinde sınıflandırılmaktadırlar.

Bu tez çalışmasında, yakıt pillerinin enerji sistemleri için en uygun çeşitlerinden biri olan Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP) için tüm gerilim kayıpları ve yakıt dönüştürücü birimi içeren termal temelli yeni bir dinamik model geliştirilmiştir. Ayrıca enerji sistemleri uygulaması olarak farklı yük koşulları altında çalışma, çoklu-baralı sistem uygulaması, klasik ve modern tekniklerle reaktif güç kompanzasyonu konuları incelenmiştir. Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. KOYP sistemindeki yakıt dönüştürücü birimi ve güç düzenleme biriminin denetimi için I ve PI denetleyicileri kullanılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları literatürü desteklemektedir.

Anahtar sözcükler: Yakıt Pilleri, Katı Oksit Yakıt Pili (KOYP), Enerji Sistemleri, Matlab.

## **SUMMARY**

### **INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOURS OF FUEL CELLS IN POWER SYSTEMS**

**GELLEN, Ayetül**

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ

July 2012, 110 pages

Nowadays, the vast majority of electrical energy have provided from of non-renewable sources (coal, oil, uranium, etc.). However, research for new alternative power sources has accelerated because of the damage to the environment of fuels derived from these sources. The fuel cells, which is one of alternative power sources and also the electrochemical power converters, convert chemical energy into electrical energy. According to the type of electrolyte used in fuel cell systems, they are classified as proton exchange membrane fuel cells, solid oxide fuel cells, alkaline fuel cells, molten carbonate fuel cells and phosphoric acid fuel cells.

In this thesis, a new thermal-based dynamic model is developed containing all voltage losses and fuel reformer unit for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) which is one of the most suitable varieties of fuel cell energy systems. Besides, operating under different load conditions, application of multi-bus system, reactive power compensation by classical and modern techniques are examined as application of energy systems. Simulation studies are carried out in Matlab/Simulink environment. I and PI controllers for the fuel reformer unit and power-conditioning unit in SOFC system are used as controller. The obtained simulation results have supported the literature.

Keywords: Fuel Cells, Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), Energy Systems, Matlab.

## ÖNSÖZ

Dağıtılmış Güç Sistemleri; küçük ölçekli güç üretim teknolojilerinin kullanımı ile genellikle yüklere yakın yerlere yerleştirilerek hizmet veren ve yeni elektrik üretim modellerini kapsayan enerji üretim teknolojileridir. Yeni enerji kaynaklarından olan yakıt pilleri; Dağıtılmış Güç Sistemleri bünyesinde incelenmektedir. Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal enerji dönüştürücüleridir. Yakıt pilleri, temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileridir. Enerji sistemleri için en uygun yakıt pili çeşitlerinden biri Katı Oksit Yakıt Pili'dir.

Bu Doktora tezi, değerli danışman hocam Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ'ün yürütücülüğünü yaptığı 109R024 kodlu "Katı Oksit Yakıt Pillerinin Enerji Sistemlerindeki Dinamik Davranışının İncelenmesi" isimli TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir. Benzetim çalışmaları ise Matlab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu Doktora tezinin, ülkemizde Katı Oksit Yakıt Pillerinin enerji sistemlerindeki uygulamaları konusunda çalışma yapacak olanlara katkıda bulunmasını dilerim.

## TEŞEKKÜR

Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakóltesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde hazırlanan bu Doktora tezi çalışmasını yöneten, tezin hazırlanması ve yazımı sırasında yardımları, bilgisi ve tecrübesi ile her zaman yanımda olan, ayrıca göstermiş olduğu hoşĐörü ve sabırdan dolayı saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Tankut YALÇINÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez çalıőmalarım sırasında maddi, manevi yardımlarını ve bilgisini hiçbir zaman esirgemeyen ve her zaman yanımda olan değerli eőim Yrd. Doç. Dr. Gökhan GELEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Beni sürekli cesaretlendiren ve yalnız bırakmayan aileme ve dostlarıma teşekkür ederim.

Bu Doktora tezi, 109R024 kodlu "Katı Oksit Yakıt Pillerinin Enerji Sistemlerindeki Dinamik Davranışının İncelenmesi" isimli TÜBİTAK projesi kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK kurumu ve çalıőanlarına da teşekkürlerimi sunarım. Doktora tezi çalışmasının devamı için gerekli olan çalışma ortamını sağlayan Melikşah Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakóltesi Dekanlığı'na teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
KISALTMA VE SİMGELER .....	xiv
BÖLÜM I. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II. YAKIT PİLLERİ VE YAKIT PİLİ GÜÇ SİSTEMİ.....	4
2.1 Giriş .....	4
2.2 Yakıt Pilinin Tanımı .....	4
2.3 Yakıt Pili Çalışma Prensibi ve Çeşitleri .....	5
2.3.1 Yakıt pili çeşitleri.....	6
2.3.1.1 Katı oksit yakıt pilleri (KOYP) .....	7
2.4 Yakıt Pilinin Matematiksel Analizi .....	11
2.5 Yakıt Pili Güç Sistemi .....	15
BÖLÜM III. KOYP MODEL ÖRNEKLERİ .....	18
3.1 Literatürde Yer Alan Model Örnekleri ve Modelleme Teknikleri .....	18
3.1.1 Katı oksit yakıt pilleri için model örnekleri .....	18
BÖLÜM IV. KOYP'NİN ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ UYGULAMALARI .....	25
4.1 KOYP İçeren Enerji Sistemleri .....	25
BÖLÜM V. KATI OKSİT YAKIT PİLİ MODELİ ve GÜÇ DÜZENLEME BİRİMİNİN ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ UYGULAMALARI.....	47
5.1 Giriş.....	47
5.2 KOYP Modelinin Elde Edilmesi .....	48
5.2.1 Yakıt dönüştürücü modeli .....	49
5.2.2 Enerji denge denklemi.....	50
5.3 KOYP'nin DC Yük Takip Testi.....	51
5.4 Güç Düzenleme Birimine Ait Matlab/Simulink Modeli .....	53
5.4.1 KOYP'nin AC sistem testi.....	54
5.4.1.1 Sonsuz bara bağlı KOYP'li enerji sistemi .....	54
5.4.1.2 AC omik yüklü KOYP'li enerji sistemi.....	58
5.5 U <sub>f</sub> Sınırlamalı KOYP'nin DC Yük Takip Testi .....	60
5.5.1 KOYP modelinin adım yük analizi .....	61

5.5.2 KOYP modelinin rampa yük analizi .....	62
5.5.3 KOYP modelinin karma yük analizi .....	64
5.5.4 KOYP modelinin anahtarlama yük analizi.....	66
5.6. Güç Düzenleme Birimine Ait Matlab/Simulink Modeli .....	67
5.6.1 DC–DC yükseltici konvertörün farklı yük tiplerindeki analizi .....	68
5.6.1.1 Konvertörün adım yük analizi .....	68
5.6.1.2 Konvertörün karma yük tipi analizi.....	69
5.6.2 Yakıt kullanımı sınırlamalı KOYP sisteminin enerji sistemi uygulamaları .....	70
5.6.2.1 Sonsuz baralı KOYP enerji sistemi .....	72
5.6.2.2 AC omik yüklü KOYP'li enerji sistemi .....	75
5.6.2.3 Anahtarlama omik–endüktif yüklü KOYP'li enerji sistemi .....	77
5.6.2.4 Asenkron motor bağlı KOYP'li enerji sistemi.....	80
5.6.2.5 AC üç baralı KOYP'li enerji sistemi .....	85
5.6.2.6 KOYP'li enerji sisteminde geleneksel yöntemle reaktif güç kompanzasyonu .....	88
5.6.2.7 KOYP'li enerji sisteminde TAK ile reaktif güç kompanzasyonu.....	91
5.6.2.8 KOYP'li enerji sisteminde arıza durumunun incelenmesi.....	95
BÖLÜM VI. SONUÇLAR.....	99
KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	110

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri .....	6
Çizelge 5.1 KOYP parametreleri.....	48
Çizelge 5.2 AC bara güç değerleri .....	89
Çizelge 5.3 AC bara güç değerleri .....	93

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Bir yakıt pilinin çalışması .....	6
Şekil 2.2 Yakıt pilinin teorik V-I polarizasyon eğrisi .....	13
Şekil 2.3 Şebekeden bağımsız yakıt pili sistemi [35] .....	15
Şekil 2.4 Şebeke bağlantılı yakıt pili sistemi [35] .....	16
Şekil 3.1 KOYP dinamik modeli [56] .....	18
Şekil 3.2 KOYP sistemi dinamik modeli [53] .....	19
Şekil 3.3 KOYP dinamik modeli [25] .....	20
Şekil 3.4 KOYP dinamik modeli [57] .....	20
Şekil 3.5 KOYP modelinde kullanılan sinir ağı yapısı [61] .....	22
Şekil 3.6 KOYP dinamik modeli [62] .....	23
Şekil 4.1 Seri bağlantının blok diyagramı [67] .....	25
Şekil 4.2 Üç fazlı invertör [67] .....	26
Şekil 4.3 DC-DC gerilim regülatörü ve üç fazlı invertör .....	26
Şekil 4.4 DC dağıtım bağlantı şeklinin blok diyagramı .....	28
Şekil 4.5 Yüksek frekanslı alternatif akım dağıtım bağlantı şeklinin blok diyagramı [67].....	29
Şekil 4.6 Kaskat bağlı çoklu seviyeli bağlantı şeklinin blok diyagramı.....	30
Şekil 4.7 Çoklu seviyeli bağlantı şeklinin blok diyagramı.....	30
Şekil 4.8 Hat komütasyonlu akım kaynaklı invertör (AKİ) .....	33
Şekil 4.9 Kendinden komütasyonlu PWM gerilim kaynaklı invertör (VKİ) .....	33
Şekil 4.10 Yüksek frekanslı trafo yalıtımlı çevrimsel-konvertör .....	33
Şekil 4.11 DC bara topolojisi [10] .....	37
Şekil 4.12 FGD blok diyagramı [10] .....	37
Şekil 4.13 DGS'ye ait blok diyagram [12] .....	39
Şekil 4.14 STATKOM içeren bir yakıt pili sistemi [78] .....	41
Şekil 4.15 Yakıt pili ve yardımcı kaynak [16] .....	42
Şekil 5.1 Yakıt Dönüştürücü ve denetleyici modeli [81] .....	49
Şekil 5.2 Yeni KOYP dinamik sistemi.....	51
Şekil 5.3 Yeni KOYP dinamik sistemine eklenilecek yakıt sınırlama bloğu.....	51
Şekil 5.4 KOYP yığın niceliklerindeki adım değişimler a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık.....	52
Şekil 5.5 KOYP yığın niceliklerindeki adım değişimler a–H <sub>2</sub> –O <sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H <sub>2</sub> –O <sub>2</sub> kısmi basınçları d–H <sub>2</sub> O kısmi basıncı .....	53

Şekil 5.6 Temel DC–DC yükseltici konvertör devresi .....	53
Şekil 5.7 DC–DC yükseltici konvertör için denetleyici yapısı.....	54
Şekil 5.8 Sonsuz bara bağlı KOYP'li enerji sistemi .....	55
Şekil 5.9 Sonsuz baralı sistem için KOYP yığın gerilimi .....	55
Şekil 5.10 Sonsuz baralı sistem için KOYP yığımı H <sub>2</sub> akış hızı .....	56
Şekil 5.11 DC–DC yükseltici konvertör çıkış gerilimi .....	56
Şekil 5.12 DC–DC yükseltici konvertörün darbe genişlik oranı .....	57
Şekil 5.13 DC–AC invertörün modülasyon indeksi .....	57
Şekil 5.14 İletim hattının faz–faz rms gerilimi.....	58
Şekil 5.15 İnvertör ve filtre çıkış gerilimleri .....	58
Şekil 5.16 AC yüklü sistem için KOYP yığın gerilimi .....	59
Şekil 5.17 AC yüklü sistem için H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı .....	59
Şekil 5.18 AC yüklü sistem için yığın sıcaklığı .....	60
Şekil 5.19 AC yüklü sistem için yük barası gerilimi.....	60
Şekil 5.20 Adım yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık.....	61
Şekil 5.21 Adım yük için KOYP yığın nicelikleri a–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> kısmi basınçları d–H <sub>2</sub> O kısmi basıncı.....	62
Şekil 5.22 Rampa yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık ...	63
Şekil 5.23 Rampa yük için KOYP yığın nicelikleri a–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> kısmi basınçları d–H <sub>2</sub> O kısmi basıncı.....	64
Şekil 5.24 Karma yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık....	65
Şekil 5.25 Karma yük için KOYP yığın nicelikleri a–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> kısmi basınçları d–H <sub>2</sub> O kısmi basıncı.....	65
Şekil 5.26 Anahtarlama yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık .....	66
Şekil 5.27 Anahtarlama yük için KOYP yığın nicelikleri a–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> kısmi basınçları d–H <sub>2</sub> O kısmi basıncı.....	67
Şekil 5.28 Konvertörlü sistemde adım tipi yük için KOYP yığın çıkış gerilimi.....	68
Şekil 5.29 Adım yük için DC–DC konvertör nicelikleri a–Çıkış akımı b–Çıkış gerilimi c–Güç d–Darbe genişlik oranı .....	69
Şekil 5.30 Konvertörlü sistemde karma tipi yük için KOYP yığın çıkış gerilimi.....	69
Şekil 5.31 Karma tipi yük için DC–DC konvertör nicelikleri a–Çıkış akımı b–Çıkış gerilimi c–Güç d–Darbe genişlik oranı .....	70
Şekil 5.32 KOYP bağlı AC enerjisi sistemine ait blok diyagram .....	72

Şekil 5.33 Sonsuz bara bağlı enerji sisteminde KOYP nicelikleri a–Gerilim b–Güç c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı d–U <sub>f</sub> e–P <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , P <sub>H<sub>2</sub></sub> ve P <sub>O<sub>2</sub></sub> f–Sıcaklık.....	73
Şekil 5.34 Sonsuz bara bağlı enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç.....	73
Şekil 5.35 Sonsuz bara bağlı enerji sisteminde AC bara nicelikleri a–İnvertör çıkış gerilimi b–Sinüs ve rms olarak filtre çıkış gerilimi c–Sinüs ve rms olarak sonsuz bara gerilimi d–Fitre ve sonsuz bara frekansı e–Sistem aktif gücü f–Sistem reaktif gücü .....	74
Şekil 5.36 AC omik yüklü sisteme ait blok diyagram.....	75
Şekil 5.37 Omik yük bağlı enerji sisteminde KOYP nicelikleri a–Gerilim b–Güç c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı d–U <sub>f</sub> e–P <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , P <sub>H<sub>2</sub></sub> ve P <sub>O<sub>2</sub></sub> f–Sıcaklık.....	76
Şekil 5.38 Omik yük bağlı enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç.....	76
Şekil 5.39 Omik yük bağlı enerji sisteminde yük barası nicelikleri a–Sinüs ve rms olarak gerilim b.1–GDB frekansı b.2–Yük frekansı c–Aktif güç d–Reaktif güç .....	77
Şekil 5.40 AC anahtarlama omik–endüktif yüklü sisteme ait blok diyagram.....	78
Şekil 5.41 Anahtarlama omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde KOYP nicelikleri a–Gerilim b–Güç c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub> akış hızı d–U <sub>f</sub> e–P <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , P <sub>H<sub>2</sub></sub> ve P <sub>O<sub>2</sub></sub> f–Sıcaklık .....	78
Şekil 5.42 Anahtarlama omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç.....	79
Şekil 5.43 Anahtarlama omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde yük barası nicelikleri a–rms olarak gerilim b–Frekans c–Aktif güç d–Reaktif güç.....	80
Şekil 5.44 Asenkron motor yüklü sisteme ait blok diyagram .....	80
Şekil 5.45 Asenkron motor referans hız değerleri a–Boşta çalışma b–Yükte çalışma.....	81
Şekil 5.46 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Gerilim b–Akım c–Frekans.....	82
Şekil 5.47 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Aktif güç b–Reaktif güç c–Tork .....	83
Şekil 5.48 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Gerilim b–Akım c–Frekans.....	84
Şekil 5.49 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Aktif güç b–Reaktif güç c–Tork .....	85
Şekil 5.50 Üç baralı omik–endüktif yüklü sisteme ait blok diyagram .....	86
Şekil 5.51 Üç baralı AC enerji sisteminde KOYP nicelikleri a–Gerilim b–Güç c–H <sub>2</sub> ve O <sub>2</sub>	

akış hızı d- $U_f$ e- $P_{H_2O}$ , $P_{H_2}$ ve $P_{O_2}$ f-Sıcaklık.....	86
Şekil 5.52 Üç baralı AC enerji sisteminde DC-DC konvertör nicelikleri a-Gerilim ve darbe genişlik oranı b-Güç.....	87
Şekil 5.53 Üç baralı AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a-Bara 1, 2 ve 3'ün gerilimi b-Bara 1, 2 ve 3'ün frekansı .....	87
Şekil 5.54 Üç baralı AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a-Bara 1, 2 ve 3'ün aktif gücü b-Bara 1, 2 ve 3'ün reaktif gücü .....	88
Şekil 5.55 Röleli kompanzasyon yapılmış sisteme ait blok diyagram .....	89
Şekil 5.56 Röleli kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde DC-DC konvertör nicelikleri a-Gerilim ve darbe genişlik oranı b-Güç.....	90
Şekil 5.57 Röleli kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a-Aktif güç b-Reaktif güç c-Güç faktörü d-Gerilim .....	91
Şekil 5.58 TAK'li kompanzasyon yapılmış sisteme ait blok diyagram.....	93
Şekil 5.59 TAK'li kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a-Aktif güç b-Reaktif güç c-Güç faktörü d-Gerilim e-Frekans .....	94
Şekil 5.60 TAK'li kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde TAK nicelikleri a-TAK 1'deki tristör akımı b-TAK 2'deki tristör akımı .....	95
Şekil 5.61 Arıza durumunun incelendiği sisteme ait blok diyagram.....	96
Şekil 5.62 AC enerji sisteminde tek faz-toprak arıza durumundaki yük barası nicelikleri a-Gerilim b-Akım c-Frekans d-Kaçak akım e-Aktif güç f-Reaktif güç .....	97

## KISALTMA VE SİMGELER

### KISALTMA/SİMGE

$V_{açık}$	Yakıt pilinin açık devre (ideal) gerilimi
$\Delta G$	Gibbs serbest enerjisi
$n$	Elektron sayısı
$F$	Faraday sabiti
$\Delta H$	Entalpi değişimi
$\Delta S$	Entropi değişimi
$T$	Kelvin cinsinden sıcaklık
$R$	Gaz sabiti
$P$	Basınç
$E_o$	standart yüksüz pil gerilimi
$N_o$	Pil sayısı
$\alpha$	Elektrotların şarj transfer katsayısı
$I_{YP}$	Yakıt pili yığınının akımı
$I_{lim}$	Yakıt pili yığınının sınırlama akımı
$I_o$	Yakıt pili yığınının değişim akımı
$c$	Konsantrasyon geriliminin deneysel katsayısı
$T_o$	Kelvin cinsinden çıkış sıcaklığı
$T_{giriş}$	Kelvin cinsinden başlangıç sıcaklığı
$\Delta T$	$T_{giriş}$ ten yükselen sıcaklık seviyesi
$t$	Dinlenme süresi
$dt$	Simulink zaman adımı
$M_p$	Pilin kütlesi (kg)
$C_p$	Pilin ısı kapasitesi (J/kg °K)
$q_e$	Elektrokimyasal reaksiyondan üretilen ısı
$V_e$	Pilin hacmi (m <sup>3</sup> )
$Q_i$	Pil ve ayırıcıları arasındaki iletim, taşınım, radyasyon ve ısı kayıplarının toplamı
$P_{yığın}$	Yığın gücü
$K_r$	Modelleme sabit $K_r=N/4F$
$q_{H_2}$	Hidrojen akış hızı (kmol/s)
$q_{O_2}$	Oksijen akış hızı (kmol/s)



$q_{H_2O}$	Su akış hızı (kmol/s)
$V_{anot}$	Anot hacmi
$V_{katot}$	Katot hacmi
$K_{H_2}$	Hidrojen için valf molar sabiti
$K_{H_2O}$	Su için valf molar sabiti
$K_{O_2}$	Oksijen için valf molar sabiti
$\tau_{H_2}$	Hidrojen için valf zaman sabiti
$\tau_{H_2O}$	Su için valf zaman sabiti
$\tau_{O_2}$	Oksijen için valf zaman sabiti
$P_{H_2}$	Hidrojen kısmi basıncı (atm)
$P_{H_2O}$	Su kısmi basıncı (atm)
$P_{O_2}$	Oksijen kısmi basıncı (atm)
$r_{YP}$	Omik kayıp direnci
$r_{H_2O}$	Hidrojen-oksijen oranı
B	Aktivasyon gerilimi sabiti
C	Aktivasyon gerilimi sabiti
$U_f$	Yakıt kullanım faktörü
$\tau_1 = \tau_2$	Yakıt dönüştürücü zaman sabiti
$\tau_3$	Yakıt dönüştürücüdeki PI denetleyicini zaman sabiti
CV	Dönüştürme faktörü
$k_3$	PI kazanç sabiti
$h_{eff}$	Kalınlık
$\lambda_s$	Termal iletkenlik
$\eta$	Verimlilik
$\sigma$	Yoğunluk
AGF	Aktif Güç Filtresi
AKİ	Akım kaynaklı invertör
ANFIS	Adaptif neuro-fuzzy inference system
ARX	Autoregressive with exogenous input
BOPS	balance of plant subsystem
CH <sub>4</sub>	Metan
CHP	Combined Heat and Power

CO	Karbonmonoksit
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
DGS	Dağıtılmış Güç Sistemleri
DSP	Digital signal processing
EACİS	Esnek AC İletim Sistemleri
EMTDC	Electromagnetic time domain transient simulation environment
FKD	Faz Kilitlemeli Döngü
GDB	Güç Düzenleme Birimi
GTO	Gate turn-off thyristor
HDS	Hibrit dağıtım sistemleri
HFAC	High Frequency AC
I	Integral
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated gate bipolar transistor
KOYP	Katı Oksit Yakıt Pilleri
LPG	Liquefied petroleum gas
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Derivative
PSS	Power System Simulation
PWM	Pulse Width Modulation
rms	root means square
SECA	Solid-State Energy Conversion Alliance
SPWM	Sinüzoidal PWM
STATKOM	Statik Kompanzator
SVC	Static VAr Compensator
SVM	Space-vector modulation, uzay-vektör modülasyon
T-S	Takagi-Sugeno
TAK	Tristör Anahtarlama Kapasitör
TDK	Tek-döngülü kontrol
THD	Total Harmonic Distortion
VKİ	Gerilim kaynaklı invertör
YPS	Yakıt pili sistemi
YSA	Yapay Sinir Ağları

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Elektrik enerjisi uygarlığın temel taşlarından biridir. Elektrik enerjisi üretiminde küçük aksamalar bile, temel endüstri ile ticari gelişmeler ve bağlantılarda karmaşaya yol açmakta, hatta günlük hayatı olumsuz şekilde etkilemektedir. Bugün, Dünya; ticari elektrik enerji üretiminin %80'i yenilenemeyen kaynaklardan (kömür, doğalgaz, petrol, uranyum, vb.) sağlanmaktadır [1]. Ancak, bu kaynaklardan elde edilen yakıtların çevreye olan zararları her geçen gün artmakta ve yeni alternatif güç kaynakları arayışı hızlanmaktadır.

Dağıtılmış Güç Sistemleri (DGS); küçük ölçekli güç üretim teknolojilerinin kullanımı ile genellikle yüklere yakın yerlere yerleştirilerek hizmet veren ve yeni elektrik üretim modellerini kapsayan bir enerji üretim teknolojisidir [2, 3]. Yeni enerji kaynaklarından olan yakıt pilleri; DGS kapsamında incelenmektedir. Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrokimyasal enerji dönüştürücüleridir. Yakıt pilleri, temiz, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip enerji dönüşüm teknolojileridir. Yakıt pili sistemleri kullandıkları elektrolit çeşidine göre proton değişim membran yakıt pilleri, katı oksit yakıt pilleri, bazik yakıt pilleri, erimiş karbonat yakıt pilleri ve fosforik asit yakıt pilleri şeklinde sınıflandırılmaktadırlar.

Bugüne kadar araştırmacılar katı oksit yakıt pilleri (KOYP) için dokuz ayrı model incelemişlerdir. Bu incelemeler kapsamında başta Matlab olmak üzere PSS ve LabView gibi bilgisayar programları benzetim amaçlı olarak kullanılmıştır. İlk çalışmalar evsel uygulamalar için yapılmış olup daha sonraları şebeke bağlantılı durum incelenilmiştir. Bütün çalışmalardaki ilk amaç modellenen sistemin yük takibini araştırmak üzerine kurulmuştur. Daha sonra ise kararlılık analizleri, aktif-reaktif güç denetimi, frekans denetimi, arıza durumundaki davranışlar, trafo bağlantı gruplarının sistem üzerine etkisi, dalgalanma oranları vb. konular araştırılmıştır. Denetleyici olarak daha çok güç düzenleme birimi üzerine gidilmiş ve PI, PID, YSA, Bulanık Mantık, Genetik Bulanık Mantık, ANFIS, Genetik Algoritma, ARX ve Vektör denetimi teknikleri kullanılmıştır [4–23]. Denetleyici türü adaptif hale geldikçe daha iyi sonuçlar alındığı görülmüştür. Sadece bir çalışmada KOYP'nin analizi için Wavelet ağı kullanılarak yük takibi

incelenmiştir [24]. Birçok çalışmada KOYP, diğer güç kaynakları ile birlikte hibrit olarak incelenmiştir [9, 18, 20]. Güç düzenleme biriminde çoğunlukla MOSFET, IGBT ve GTO gibi elektronik anahtarlar kullanılmıştır. Genellikle iki baralı çalışmalar yapılmış olup, benzetim bazında 4–13–34–123 baralı sistemlerde de KOYP'nin davranışı incelenmiştir [14]. Sonsuz baralı bir sistemde ise üç ayrı çalışma yapılmıştır [6, 10, 25].

KOYP için literatürdeki eksik taraflar şu şekilde sıralanabilir. Dokuz farklı model üzerinde çalışılmasına rağmen, bu modellerin her birinde hesaba katılmayan birtakım nicelikler bulunmaktadır. Bazı parametreler sabit tutularak incelemeler yapılmıştır. Bu noktada öncelikle; parametrelerin çoğunluğunun hesaba katıldığı, daha fazla denetlenebilirliği olan bir model geliştirilmelidir. Güç düzenleyici birimi (GDB) üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen; hala modele bağımlılık devam etmektedir. Bir modelde çalışan konvertör-invertör yapısı başka bir model için önerilememektedir. Sadece en ideal konvertör yapısının iki yönlü çalışan konvertör temelli güç düzenleyici birimi olduğu vurgulanmıştır. Bu aşamada birçok denetleyici türü kullanılmıştır. Ancak farklı bir model elde edildiği takdirde uygulanan her denetleyicinin farklı bir çalışma olarak ortaya çıkacağı söylenebilir. Ayrıca bu GDB'de kullanılacak farklı elektronik anahtarlar da çalışma zenginliği kazandırabilir. Çünkü anahtar türü farklılaştıkça denetim algoritması da değişecektir. Şebeke bağlantılı, üç fazlı sistemlere ağırlık verilip daha gerçek sistemler modellenerek dinamik, anahtarlamalı vb. yük tipleri kullanılmalıdır. Yine elde edilebilecek farklı ve kapsamlı bir model ile başka dağıtılmış güç üreteçleri hibrit olarak araştırılabilir. Ayrıca modern kompanzasyon teknikleri hususunda tam olarak sadece bir çalışma mevcuttur [23]. Bu kapsamda da SVC incelenerek reaktif güç denetimi yapılmıştır. TAK, TSKS ve STATKOM gibi başka EACİS cihazları da kullanılarak aynı işlemler yapılabilir.

Doktora tezi olarak hazırlanan bu çalışmada amaçlanan; son yıllarda elektrik enerjisi üretimi pazarında yer almaya başlayan alternatif güç kaynaklarından olan yakıt pilleri konusunda çalışmalar yapmaktır. Tez kapsamında; enerji sistemleri için en uygun yakıt pili çeşitlerinden biri olan Katı Oksit Yakıt Pili için termal temelli yeni dinamik model ve denetleyici yapıları geliştirilmektedir. Ayrıca enerji sistemleri konusu olan, farklı yük koşulları altında çalışma, çoklu-baralı sistem uygulaması, reaktif güç kompanzasyonu ve arıza konuları da incelenmektedir. Bu çalışmalar için tasarlanılan

invertör sistemi elektriksel devre olarak modellenmiştir. Literatürdeki çalışmaların büyük bir çoğunluğunda bu birim matematiksel olarak modellenmiş ve oldukça sadeleştirilmiştir. Özellikle AC motor bağlı sistemler araştırmacılar tarafından fazla incelenmemiştir. Yapılan motorlu uygulamalarda ise motor yükü genellikle matematiksel olarak gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında ise kullanılan bütün AC bara birimleri elektriksel devre olarak modellenmiştir. Bu da elde edilen sonuçların daha gerçekçi olmasını sağlamaktadır. Kompanzasyon konusunda ise literatürde kaynak teşkil edebilecek dikkate değer çalışma bulunmamaktadır. Hem geleneksel hem de modern yöntemlerle grup kompanzasyonu bu tez kapsamında incelenilmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle bir EACİS çeşidi olan TAK ile yapılan çalışmanın sonuçlarına göre invertörlü sistemlerde bu kompanzatörün gerilim temelli değil de güç faktörü temelli çalışması gerektiği önerilmektedir.

Bu Doktora tezinin ikinci bölümünde yakıt pilleri ve yakıt pili içeren enerji sistemleri hakkında genel bilgiler, üçüncü bölümünde kaynak araştırması sonucu elde edilen KOYP dinamik modellerinin örnekleri ve dördüncü bölümünde KOYP içeren enerji sistemlerinin yer aldığı makale özetleri verilmektedir. Beşinci bölümde ise bu Doktora tezi kapsamında amaçlanan ve elde edilen yeni termal temelli KOYP dinamik modeli, DC-DC yükseltici konvertör ve DC-AC invertörden meydana gelen güç düzenleme birimi ve MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim sonuçları verilmektedir. Tezin son bölümünü ise sonuçlar kısmı oluşturmaktadır.

## BÖLÜM II

### YAKIT PİLLERİ ve YAKIT PİLİ GÜÇ SİSTEMİ

#### 2.1 Giriş

Mevcut enerji kaynakları gün geçtikçe tükenmektedir ve bu kaynaklar yakıt olarak (kömür, petrol, odun v.b.) kullanıldıkları zaman çevre kirliliğini de beraberinde getirmektedirler. Bu nedenlerden dolayı kimyasal bir güç kaynağı türü olan yakıt pillerinin araştırılması ve geliştirilmesi üzerindeki çalışmalar önem kazanmıştır.

Yakıt pilleri verimli, ekonomik, sessiz ve çevre ile uyumlu, elektrik gücü üretiminde kullanılan ve yakıt türüne karşı esnek olan güç dönüştürücüleridir. Hidrojence zengin herhangi bir madde potansiyel bir yakıt kaynağı olabilir. Yakıt pili sistemleri çalışılan sıcaklık ve basınç aralığına göre yüksek, normal ve düşük sıcaklıklı/basınçlı olmak üzere çeşitlilik göstermektedirler. Aynı zamanda kullandıkları yakıt ve/veya oksidantlara göre de gaz yakıt kullananlar (hidrojen, amonyak, hava ve oksijen), sıvı yakıt kullananlar (alkoller, hidrazin, hidrokarbonlar) ve katı yakıt kullananlar (kömür, hidratlar) olmak üzere çeşitlilik göstermektedirler. Genel ve basit olarak yakıt pili sistemleri yukarıdaki farklılıklarından dolayı değil, kullandıkları elektrolit çeşidine göre sınıflandırılmaktadırlar [26–31].

#### 2.2 Yakıt Pili Tanımı

Yakıt pilleri, çevreye zarar vermeyen ve yüksek verime sahip güç dönüşüm teknolojileridir. Bir buhar kazanı veya türbin kullanılmadan, sadece kimyasal reaksiyon ile elektrik enerjisi üretilir. Hidrojen ( $H_2$ ) ve oksijen ( $O_2$ ) arasındaki elektrokimyasal reaksiyon ile elde edilen ve toplam verimlilikleri % 80'lere kadar ulaşabilen yakıt pilleri, sürekli çalışan piller veya elektrokimyasal makineler olarak da bilinir [2, 29, 30, 32-34].

Yakıt pilleri, boyutlarının küçük olması, yüksek verimle çalışmaları ve atık ısılarının kullanılabilir olmasının yanı sıra aşağıdaki özellikleri nedeniyle de diğer güç sistemlerine göre daha üstündürler [26–28, 31, 35–37].

- Birimsel olmaları,
- Kullanıcıya yakın tesis edilebilmeleri,
- Yakıt olarak saf hidrojenin yanı sıra doğalgaz, etanol veya kömür gazlarının kullanılabilmesi,
- Sessiz çalışmaları,
- Düşük seviyede kükürt oksit ve azot oksit emisyonları,
- Tesis edilecek alanda çok az çevre kısıtlamaları gerektirmeleri ve kısa sürede tesis edilebilmeleri,
- Katı atık problemlerinin olmaması gibi nedenlerden dolayı diğer sistemlerden üstündürler.

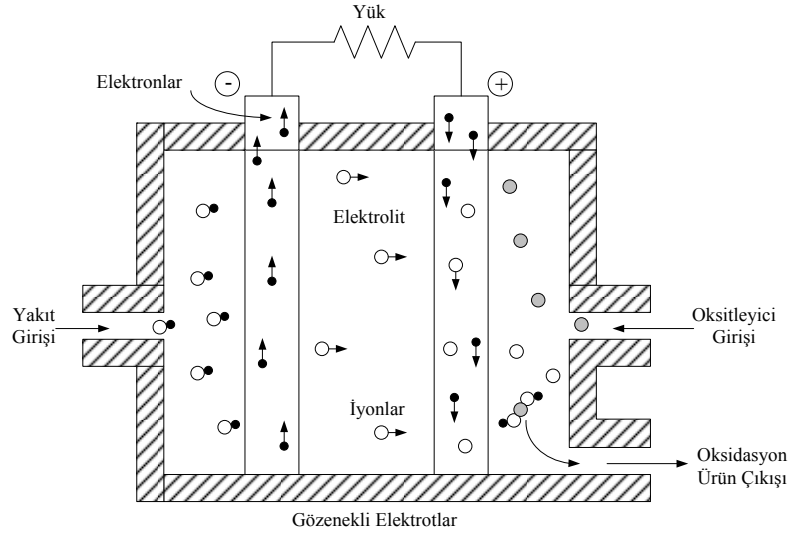
Geleneksel yakıtları kullanan diğer tüm teknolojilerden ve içten yanmalı motor teknolojilerinden daha verimli olan yakıt pilleri, enerji tüketen tüm sektörler için özel bir önem taşımaktadır. Her birimin 1 Volt'tan daha düşük gerilim ürettiği bu pillerin seri bağlanması sonucunda yüksek gerilim elde edilebilmektedir [32, 33].

Yakıt pillerinde yakıt olarak metanol, etanol, doğalgaz, LPG ya da hidrojen kullanılabilir. Ama tüm bu yakıtlar arasında enerji verimi en yüksek olanı hidrojen dir. Ayrıca hidrojen, yan ürün olarak yalnızca su baharı çıkartmaktadır. Diğer yakıtlar ise az da olsa zehirli ya da sera etkisine yol açan gazlar yaymaktadırlar.

### **2.3 Yakıt Pilinin Çalışma Prensibi ve Çeşitleri**

Yakıt gazlarındaki kimyasal enerji; minimum hareketli parçalar içeren ve hava kirliliğine sebep olmayan elektrokimyasal bir süreçte doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülür. Yakıt pilleri düşük gürültü seviyesinde, az kirlitici ürün açığa çıkararak yüksek verimle çalışabilmektedirler.

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi yakıt girişi anot tarafından olmaktadır. Burada yakıt elektronlarına ve protonlarına ayrılır. Elektronlar dış devre yardımı ile katoda ulaşırken protonlar elektrolitten geçerek katoda ulaşırlar. Elektronlar dış devrede yük için akım oluşturur iken katotta elektronlar, protonlar ve oksidant birleşerek çıkış ürününü oluştururlar. Bunun yanı sıra yakıt pilinde metanol; su ve CO<sub>2</sub>'e veya CO; CO<sub>2</sub>'e dönüşebilmektedir [28, 30, 37–39].



Şekil 2.1 Bir yakıt pilinin çalışması

### 2.3.1 Yakıt pili çeşitleri

Yakıt pili sistemleri kullandıkları elektrolit çeşidine göre proton değişim membran yakıt pilleri, katı oksit yakıt pilleri, bazik yakıt pilleri, erimiş karbonat yakıt pilleri ve fosforik asit yakıt pilleri şeklinde sınıflandırılmaktadırlar [36, 40–42]. Çizelge 2.1’de yakıt pili çeşitleri ve özellikleri verilmiştir [41–43].

Çizelge 2.1 Yakıt pili çeşitleri ve özellikleri

	Proton Değişim Membran Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili	Bazik Yakıt Pili	Erimiş Karbonat Yakıt Pili	Fosforik Asit Yakıt Pili
<b>Elektrolit</b>	Polimer İyon Değişimi Filmi	Çinko Üzerine Tutturulmuş Yitria	Potasyum Hidroksit	Karbonat	Fosforik Asit
<b>Elektrolitteki Taşıyıcı</b>	$H^+$	$O_2^{-2}$	$OH^-$	$CO_2^{-3}$	$H^+$
<b>Pil Malzemesi</b>	Karbon	Seramik vb.	Karbon	Ni, Paslanmaz çelik	Karbon
<b>Güç Yoğunluğu (W/kg)</b>	350-1500	15-20	35-105	30-40	120-180
<b>Yakıt Türü</b>	$H_2$ Hidrokarbonlar	Hidrokarbonlar	$H_2$	Hidrokarbonlar	$H_2$ Hidrokarbonlar Fosil Yakıt
<b>Sıcaklık</b>	80-90°C	1000 °C	60-90 °C	600-700 °C	200°C
<b>Güç Üretim Verimi</b>	%60	%60-70	%42-73	%45-60	%37-42
<b>Uygulama Alanları</b>	Ulaşım, Ticari, Elektrik Santralleri	Ticari, Elektrik Santralleri	Uzay, Ulaşım, Ticari	Elektrik Santralleri	Ticari, Elektrik Santralleri



### 2.3.1.1 Katı oksit yakıt pilleri (KOYP)

KOYP'ler potansiyel olarak yüksek dönüştürme verimine sahip olan, ancak gerçekleştirme aşamasında önemli teknik problemler sunan bir yakıt pili türüdür. KOYP'ler diğer ana yakıt pili türlerine göre en az gelişme gösteren yakıt pili türüdür. Çünkü bu yakıt pili türleri 750 °C ile 1000 °C aralığındaki sıcaklıkta çalışan ince tabakalı seramik kullandıklarından dolayı malzeme seçimi ve tasarımında zorluklar yaşatmaktadır. Ancak bunların dışında yüksek sıcaklıkta çalışma durumu iki önemli fayda sağlamaktadır. İlki; metanın hidrojen ve karbon monoksit doğrudan buhar dönüşümü sağlanır. İkincisi ise yüksek derecedeki ısı; Birleşik Isı ve Güç sistemleri (CHP) gibi kojenerasyon sistemleri için kullanılabilir. Böylece sistem verimi % 80'in üzerine çıkarılabilmektedir [4]. Ayrıca; yüksek sıcaklıkta elektrokimyasal olaylar daha hızlıdır ve elektrolit yüksek iyon iletkenliğine sahip olmaktadır. Böylece elektrolit omik aşırı gerilimleri de azaltılabilir [44].

Pillerin akım kapasitesi; 0.5 A/cm<sup>2</sup> ile 1.5 A/cm<sup>2</sup> arasındaki akım yoğunluğu ve elektrolit seramiğinin aktif alanı ile ilişkilidir. Seramiğin her bir seviyesi yüksüz durumda yaklaşık 1.1 V gerilim üretecektir. Bir pil için gerilim ve akım arasındaki ilişki yapısal bütünlüğü sağlanarak kontrol edilir. Bu yüzden yığın şekli olarak küp tercih edilir. Bunun sonucu olarak; güç oranları için KOYP'nin çıkışı; geleneksel güç elektroniğindeki düşük gerilim ve yüksek akımla ilgilidir. İyon iletiminin sıcaklığa duyarlılığı pilin performansını etkilemekte ve üretilen ısı akımla orantılı olduğu için pilden çekilen güç te doğrudan KOYP'nin performansını etkilemektedir [4].

Pilin zarar görmesini azaltmak için; yığın içerisine akım akışı olmamalıdır ve yakıt kullanımını % 90'nın üzerine çıkmamalıdır. Yakıt akışındaki bir artış; gaz reaksiyon oranı ile ilgili olarak çıkışta hızlı bir düşüşe yol açmaktadır. Bu durum rezistif bir yük için elektrik çıkış gücünde bir artışa yol açacaktır. Çıkış akımındaki bir artış yığın sıcaklığında daha düşük bir artışa neden olacaktır. Ancak bu artış daha önemli bir etkiye sahiptir. Bundan dolayı çıkış akımı; yığın sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta olan giriş gaz akışının soğutma etkisi ile daha uygun bir seviyeye gelecektir. Yük akımındaki bir kademe artışın yığın sıcaklığının artışına benzer bir etkisi olacaktır [4].

Eğer hidrojen kaynağı sınırlanmaz, termal kısıtlamalar yapılmaz ve buhar kaynağı güvenilir ise KOYP sistemleri çok hızlı yük takip kapasitesine sahip olabilirler. Yakıt pilinden çekilen akım arttıkça hidrojen tüketimi de artmaktadır. Bundan dolayı akımı kontrol edebilmek ve sabit yakıt kullanımını önlemek için akım-tabanlı yakıt kontrol stratejisi yapılmıştır. Eğer bu tip bir kontrol ile hidrojen, yakıt piline aniden verilirse ve termal kısıtlamalar uygulanmaz ise KOYP sistemleri sadece elektrokimya zamanınca sınırlanan geçici yük takip etme kapasitesini sunabilir. Pratik sistemlerde yakıt dağıtımı, hazırlanması ve işlenmesindeki gecikmelerden dolayı yakıt piline verilen hidrojen akışı aniden arttırılamaz. Yakıt pilinin anot bileşenindeki aktif elemanların (hidrojen) azalmayacağından emin olunmalıdır. Eğer aktif elemanlarda azalma olursa yakıt pili kimyasal gerilimi sıfır olur. Buna karşılık yakıt pili gerilimi de sıfır olur. Sistem bu durumda akım çeken bir yüke bağlı ise anot malzemeleri oksitlenebilir. Bu durum ilk önce yakıt azalması ile devam eder, fakat bu tip tekrarlanan tepkimeler yakıt pili anoduna ciddi bir şekilde zarar verebilir. Dolayısıyla anot oksidasyonlarını önlemek için etkin bir gerilim kontrolü yapılmalıdır [45].

Eğer sadece yakıt pili termal cevabı dikkate alınırsa bir KOYP sistemi; yük talebindeki önemli dinamik değişimlere hızlı bir şekilde tepki verebilir. Sistem yük takip kapasitesini etkilemeksizin yakıt pili giriş sıcaklığı ve elektrolit sıcaklığı kontrol edilebilir. Sistem gücü doğrudan yakıt pili akımı ile kontrol edilemez. Bunun yanı sıra yakıt akış oranının değiştirilmesi ile de sistem gücü kontrol edilebilir. Ancak bu yöntem akımın değiştirilmesi ile yapılan kontrolden daha ağır ilerlemektedir ve yakıt pili gücündeki bozulmaları ve geçici durumları tam olarak takip edememektedir [45].

Genelde güç sistemleri için kabul gören KOYP sistemleri doğrudan elektrik şebekelerine veya DC kullanıcılara bağlandığı zaman bir takım problemler oluşmaktadır. Şebekeden bağımsız yakıt pilinin gerilimi; genellikle akım yoğunluğunun artmasıyla hızlı bir şekilde düşmektedir. Aslında birçok elektriksel ve elektronik ekipman sabit gerilime ihtiyaç duyduklarından yakıt pilleri kötü bir şekilde regüle edilirler. Ayrıca yavaş tepkilerinden dolayı yakıt pilleri genelde doğrudan elektrik şebekesine bağlanmazlar. Evsel bir KOYP sisteminde değişen harici yüklerin yukarıda bahsedilen olumsuz etkilerini yok etmek için paralel bir kapasitör sisteme entegre edilir. Burada kullanılacak kapasitörle ilgili olarak aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir [46]:

- Kapasitör; yakıt pilinin yakıt-oksijen giriş değişimlerine olan cevap zamanını arttıracaktır. Yüksek değerli kapasitörler güç sisteminin dinamik cevabını yavaşlatmaktadır.
- Kapasitör; yığın akımının yükü takip etmesini garanti eder. Sürekli halde yığın gerilimi sabit olur ve kapasitör içine akım akışı olmamaktadır.

Y. Qi ve arkadaşlarına göre [47]; KOYP sistemlerinde yükteki artış; akımı, yakıt basıncını, pil ve yakıt sıcaklığını arttırırken çıkış gerilimini düşürmektedir. Yakıt akış hızında ise çok az düşüş yaptığını ileri sürmektedirler. Rezistif yük koşullarında KOYP'nin sıcaklık dinamikleri arttırılarak sistemin yüke cevap hızı yükseltilebilir. Yakıt giriş basıncı arttığı zaman yakıt dönüştürücü birimi içerisindeki metan ve su konsantrasyonları da ani olarak artmaktadır. Bundan sonra yakıt dönüşüm reaksiyonu daha hızlı işleyecek ve pilden daha fazla ısı çekecektir. Bu da dolayısıyla pil sıcaklığının düşmesine yol açacaktır. Yakıt dönüşüm işleminin hızlanması demek üretilen hidrojenin artması demektir ki bu durum çıkış geriliminin ve akımının birlikte artmasına neden olmaktadır. Başka bir ifadeyle; harici yük değişimi olmadığı sürece akım, çıkış geriliminin değişimiyle değişecektir. Yakıt dönüştürme işleminde giriş yakıt sıcaklığının artması, basınçtaki artışla aynı etkiyi göstermektedir. Ancak bu etkinin yansırı bu değişiklik yönlendirme (shifting) reaksiyonunun (CO'nun CO<sub>2</sub>'ye dönüşmesi) denge noktasını da değiştirmektedir. Bunun sonucunda hidrojen konsantrasyonu düşerken su konsantrasyonu artacaktır. Böylece çıkış gerilimi, yakıt pili akımı ve yakıt basıncı düşmektedir. Yakıt akış hızındaki artış da KOYP'nin performansını etkilemektedir. Bu artış ısı transfer katsayısını arttırarak pilden yakıt akışına daha fazla ısı transfer edilmesine sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak pil ısısı, çıkış gerilimi ve yakıt pili akımında da küçük bir düşüş görüldüğünü belirtmişlerdir [47].

Bunların dışında katot tarafından giren havanın basıncındaki artış katottaki oksijen konsantrasyonunu arttırmakta ve bu durum çıkış gerilimi ve yakıt pili akımında da çok küçük miktarda bir artışa neden olmaktadır. Bundan dolayı pilden salınan ısı miktarı da oldukça küçüktür. Kısacası pilin anot tarafından giriş yapan gazların basıncındaki değişimin pilin performansı üzerine daha fazla etkisi olduğu söylenebilir. Hava akışı sıcaklığının dinamik performans üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. Çünkü bu durum doğrudan pil sıcaklığını etkilemekte, dolayısıyla yakıt akış hızından başka tüm

parametreleri yükseltecek şekilde etkilediği Y. Qi ve arkadaşları tarafından ileri sürülmüştür. Son olarak hava akış hızındaki bir artış genellikle ısı transfer katsayısını etkilediğinden, havadan pile akan ısıyı arttırmaktadır. Bu da pil ısını çok küçük miktarda arttırmaktadır. Ancak diğer parametreler üzerinde önemli bir etkisi bulunmamaktadır [47].

KOYP yığını hızlı elektrokimyasından dolayı yükteki değişimlere genellikle hızlı bir şekilde cevap vermektedirler. Yakıt kullanımının farklı seviyeleri yığını etkilemektedir. Bu nedenle tasarımcı; bu farklı seviyelerde daha uzun ya da daha kısa zaman periyotları için yığının ömrünün veya sistem veriminin nasıl etkileneceğini ve KOYP sisteminin nasıl çalışacağını belirlemelidir. Yakıt kullanımının düşük seviyelerde olması sistem veriminde de bir düşüğe neden olmaktadır. Genellikle daha yüksek yakıt kullanımı; bütün parametreler sabit tutulduğu zaman daha yüksek verim demektir. Büyük güçlü yük talepleri; hidrojen kullanımını belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Akım dalgalanmasının büyüklüğü düşük yüklerde küçük bir etki yaratmaktadır. Bununla birlikte daha büyük güçlü yüklerde dalgalanma artarken hidrojen kullanımı da artmaktadır. Ayrıca hidrojen kullanımı düşük frekanslarda önemli bir şekilde düşmektedir. Düşük frekanslı akım dalgalanmaları KOYP yığınının ömrü üzerinde zararlı bir etki olan hidrojenin azalmasına yol açacaktır. Yük geçişleri de KOYP yığınının çalışma koşullarını etkilemektedir. Yığın içindeki birimlerin (BOPS), yükteki ani değişimlere cevap veremeyeceği için KOYP yığınının performansında zararlı bir etki oluşturmaktadır. Akımdaki artış, sıcaklığı arttıracak ve üretilen ısı; malzeme özelliklerini yok eden bir etki oluşturacaktır [48].

Bir yakıt pili için geçici durum benzetimleri sabit reaktant akışı ve sabit giriş sıcaklığı ile ilgilidir. Bir KOYP sistemi için uygun çalışma koşullarının içeriğini yığın terminal gerilimi, yakıt kullanımı ve yığın akımı arasındaki ilişki belirlemektedir. Yığın akımına orantılı olarak giriş hidrojen akışının kontrol edilmesiyle sabit yakıt kullanım kontrolü yapılabilir ve harici bir gerilim kontrol döngüsünün sisteme eklenmesiyle de yığın terminal gerilimi sabit bir değerde tutulabilir [5].

KOYP'li bir güç sisteminin yük takip performansı; dahili yakıt dönüştürücü yapısı sayesinde daha iyi olabilmektedir. KOYP, yüksek çalışma sıcaklığına sahiptir ve kısa bir süre içerisinde yüksek sıcaklığa ulaşmaktadır. KOYP'nin bu problemini gidermek

için de borusal tipte piller geliştirilmektedir [49]. Ayrıca KOYP'ler yapısında soymetalleri içermemekte, problem yaratan ve pahalı olan sıvı elektrolitler kullanmamaktadırlar [50].

#### 2.4 Yakıt Pilinin Matematiksel Analizi

Eğer tüm Gibbs serbest enerjisi kullanılır ise; 25 °C-1 atm basınç koşulları altında ideal pil gerilimi [35, 51, 52];

$$V_{açık} = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237.340 \text{ Jmol}^{-1}}{2 \times 96,485 \text{ Asmol}^{-1}} = 1.23 \text{ Volt} \quad (2.1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. 1.23 V değeri teorik pil potansiyeli değeridir. Aynı zamanda pil potansiyeli sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$V_{T,P} = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right) + \frac{RT}{nF} \ln \left[ \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2; Nernst Eşitliği olarak adlandırılmaktadır. dH ve dS'nin sıcaklıkla değişimi ihmal edilirse; bu eşitliğin son durumu;

$$V_{T,P} = 1.482 - 0.000845T + 0.0000431T \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}) \quad (2.3)$$

şeklini alır. Son olarak Nernst denklemi aşağıdaki şekliyle de kullanılmaktadır:

$$V_{açık} = N \left[ V_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left( \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \right] \quad (2.4)$$

Yakıt pili sistemlerinde üç önemli kayıp vardır. Bu kayıplar; elektrokimyasal reaksiyondan kaynaklanan aktivasyon kayıpları, iyonik ve elektronik iletimden

kaynaklanan omik kayıplar ve kütle taşınımından kaynaklanan konsantrasyon kayıplarıdır.

$$V_{akt} = N \frac{RT}{2\alpha F} \cdot \ln \left( \frac{I_{YP}}{I_o} \right) \quad (2.5)$$

$$V_{omik} = I_{YP} \cdot R_{YP} \quad (2.6)$$

$$V_{kons} = -c \cdot \ln \left( 1 - \frac{I_{YP}}{I_{lim}} \right) \quad (2.7)$$

Bu durumda yakıt pilinin gerçek çıkış gerilimi;

$$V_{dc} = V_{açık} - V_{omik} - V_{akt} - V_{kons} \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Akım yoğunluğu ile aktivasyon aşırı voltajı arasındaki ilişki eksponansiyel olup Butler-Volmer eşitliği ile ifade edilmektedir:

$$j = j_o \left( e^{anF\eta_{akt}/(RT)} - e^{-(1-\alpha)nF\eta_{akt}/(RT)} \right) \quad (2.9)$$

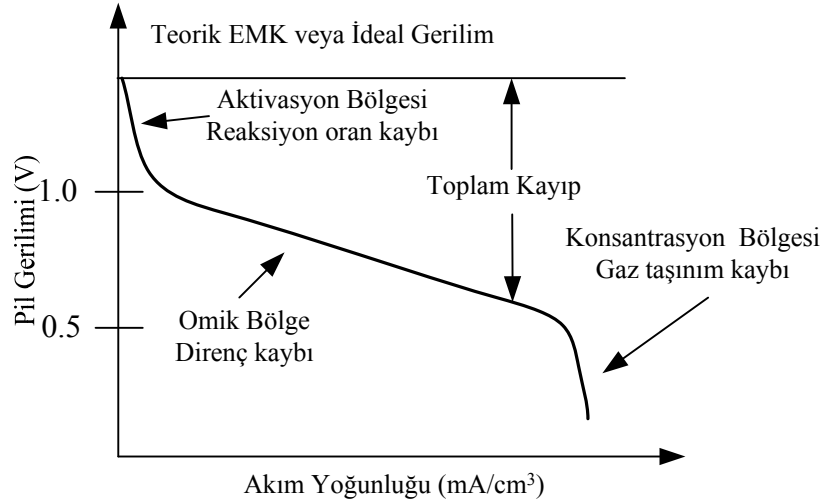
$$\eta_{akt} = a + b \log j \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.10 ise Tafel eşitliği olarak adlandırılır ve bu eşitlikteki b=Tafel eğimidir. Polarizasyon eğrisi bu eşitlik yardımı ile elde edilmektedir. Ayrıca ideal yakıt pili verimi Eşitlik 2.11 ile ifade edilmektedir:

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad \text{veya} \quad \eta = \frac{E_0}{1.482V} \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.1-2.10 arasındaki ifadeler Şekil 2.2'de yakıt piline ait polarizasyon eğrisi olarak görülmektedir. Yakıt pili ideal gerilimi değeri kayıplardan dolayı denge noktası değerinden düşük seviyededir. Aktivasyon kaybı, düşük akım yoğunluklarında etkilidir

ve akım arttıkça değeri de artmaktadır. Omik kayıplar akımla doğru orantılı olarak değişir ve pil direnci sabit olduğundan dolayı akımın geniş değişim aralığında etkili olmaktadır. Son olarak konsantrasyon kayıpları, yüksek akım yoğunluklarında belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 2.2 Yakıt pilinin teorik V-I polarizasyon eğrisi

Anot içerisinden herhangi bir gazın veya sıvının molar akış ifadesinin kanal içerisindeki o gazın veya sıvının kısmi basıncına oranı valf molar sabitlerini verecektir. Hidrojen, oksijen ve su için valf sabitleri Eşitlik 2.12'de ve valf zaman sabitleri ise Eşitlik 2.13'te verilmiştir. Bu zaman sabiti değerlerinin anot veya katodun hacimleri ile ilişkili olduğu görülmektedir.

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = K_{H_2} \quad \frac{q_{O_2}}{p_{O_2}} = K_{O_2} \quad \frac{q_{H_2O}}{p_{H_2O}} = K_{H_2O} \quad (2.12)$$

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{anot}}{K_{H_2} RT} \quad \tau_{O_2} = \frac{V_{katot}}{K_{O_2} RT} \quad \tau_{H_2O} = \frac{V_{anot}}{K_{H_2O} RT} \quad (2.13)$$

Hidrojen, oksijen ve su için kısmi basınç ifadeleri Eşitlik 2.14'te sırasıyla verilmiştir. Buradaki  $K_r$  değeri Faraday sabitine bağlı olup  $K_r = N_e/4F$  olarak ifade edilmektedir. Temel elektrokimyasal denklemlere göre yığın akımı ve reaksiyona giren hidrojenin molar akış arasındaki bağıntı Eşitlik 2.15 ile ifade edilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} P_{H_2} &= \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{giris} - 2K_r I_{YP}) \\ P_{O_2} &= \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{giris} - K_r I_{YP}) \\ P_{H_2O} &= \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O} s} (2K_r I_{YP}) \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

$$q_{H_2}^{gerek} = \frac{N I_{YP}}{2F} = 2K_r I_{YP} \quad (2.15)$$

Yakıt pilleri sabit yakıt girişi veya sabit yakıt kullanımı olmak üzere iki ayrı çalışma biçiminde çalıştırılırlar. Sabit yakıt girişi temelli çalışmada anoda giren hidrojen akış oranı ve katoda giren oksijen akış oranı sabit bir değere ayarlanmaktadır. Sabit yakıt kullanımı temelli çalışmada ise hidrojen akış değeri reaksiyonda tüketilen hidrojenin anoda giren hidrojene oranının belirli bir değere ayarlanması ile denetlenebilir. Bu oran yakıt kullanım faktörü olarak bilinir ve Eşitlik 2.16 ile ifade edilmektedir.

$$q_{H_2}^{giris} = \frac{N_o I_{YP}}{2FU} = \frac{2K_r I_{YP}}{U} \Rightarrow U = \frac{N_o I_{YP}}{2F q_{H_2}^{giris}} \quad (2.16)$$

Sabit yakıt kullanımı temelli çalışmada; hidrojen akış değerini ayarlamak için akım geri beslemesi kullanılarak denetleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Yakıt pili yığını korumak için; yakıt kullanımı değeri 0.8 ile 0.9 değeri arasına sınırlandırılmalıdır ve bu değer 0.85 olacak şekilde denetim işlemi yapılmalıdır [53]. Çünkü, bu değer 0.8'in altında olması durumunda pil gerilimi hızlı bir şekilde yükselecektir. 0.9'un üstünde olması durumunda ise aşırı yakıt kullanımı ortaya çıkacak ve pile kalıcı zararlar verecektir.

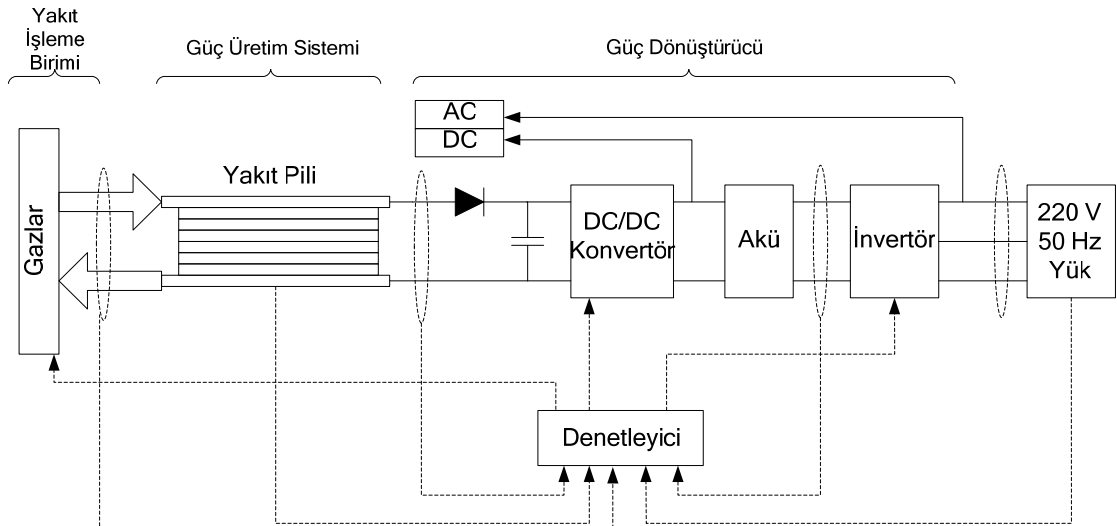
$$\frac{0.8 q_{H_2}^{giris}}{2K_r} \leq I_{YP} \leq \frac{0.9 q_{H_2}^{giris}}{2K_r} \quad (2.17)$$



## 2.5 Yakıt Pili Güç Sistemi

Genel olarak bir yakıt pili sistemi, gazların bulunduğu yakıt işleme/dönüştürme birimi, güç üretim sistemi (yakıt pili grubu, yığın, birim), güç dönüştürücü (konvertör, invertör ve akü) ve kontrol sistemi olmak üzere dört temel birimden oluşmaktadır. Bu birimler arasındaki bağlantıyı gösteren blok diyagram Şekil 2.3'te verilmektedir. Şekilde verilen sistem şebekeden bağımsız çalışan daha çok evsel uygulamalarda kullanılan sistem modelidir [35].

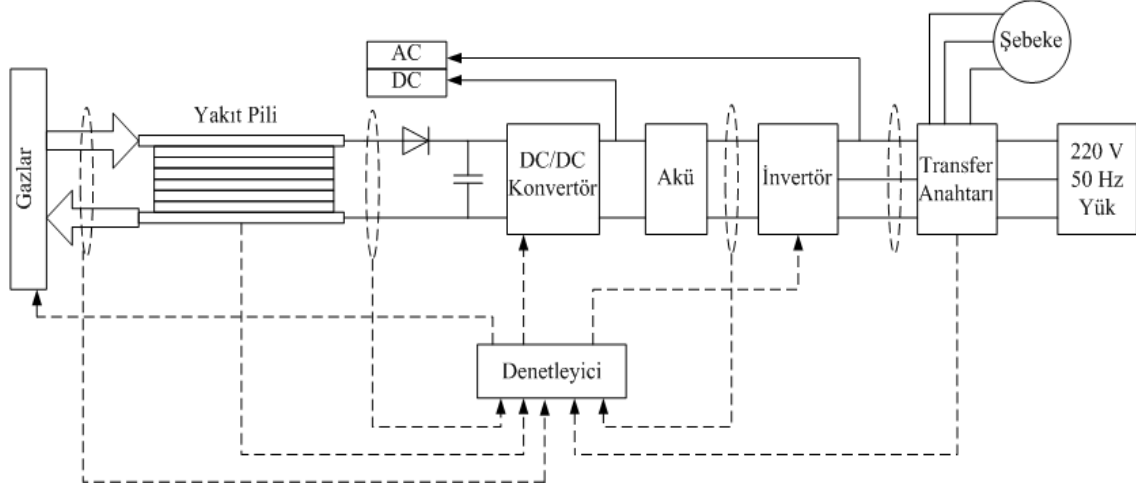
Yakıt işleme birimi, yakıtın yakıt piline gönderilmesi öncesinde hazırlandığı ve eğer doğrudan hidrojen kullanılmıyorsa, kullanılan yakıttan hidrojenin ayrıştırıldığı birimdir. Güç üretim sistemi olarak isimlendirilen bölüm bir veya birden fazla yakıt pili yapısından meydana gelmektedir. Güç dönüştürücü biriminde pil tarafından üretilen doğru akım ilk olarak daha yüksek bir doğru akıma, daha sonra ise ticari kullanım için alternatif akıma çevrilmektedir. Kontrol sistemi biriminde sistemin tüm işleyişi denetlenmektedir. Ayrıca pek çok yakıt pili sisteminde yardımcı elemanlar olarak adlandırılan bazı bileşenler de söz konusudur. Bunlar; fan, kompresör, nem birimi, ısı değiştirici vb. şeklinde sayılabilir [35].



Şekil 2.3 Şebekeden bağımsız yakıt pili sistemi [35]

Şekil 2.4'te ise şebeke bağlantısı olan bir yakıt pili sistemi verilmiştir. Bu tür sistemlerde şebeke ile bağlantı şalter, elektrik sayacı ve trafo üzerinden sağlanmaktadır. Yakıt pili sisteminin (YPS) şebekeye bağlanması konusunda senkronizasyon oldukça

önemlidir. YPS'nin gerilim ve frekans değerlerinin şebeke ile aynı olması gerekmektedir. Bu da invertöre bu özellikteki bir denetleyicinin uygulanması ile yapılmaktadır.



Şekil 2.4 Şebeke bağlantılı yakıt pili sistemi [35]

Yakıt piline doğru akacak akımları engellemek için seri bir diyot, konvertör giriş akımındaki dalgalanmaları elimine etmek için paralel bir kondansatör ve DC baraya bağlanacak bir akü vazgeçilmez teçhizatlardır. Konvertör topolojileri ise temelde DC-DC konvertör+DC-AC invertör ve DC-AC invertör+AC-AC konvertör şeklindedir. Evsel uygulamalarda invertör çıkışı bir (1) ya da iki (2) fazlı olurken şebeke uygulamalarında üç (3) fazlıdır. İnvertör çıkışına bağlanacak bir trafo ile aynı zamanda yalıtım da sağlanacaktır. Güç dönüştürme biriminin yakıt pilinden termal olarak ta yalıtılması gerekmektedir [42].

Yakıt pili yığınının çıkış gerilimi  $V_{DC}$  düşük seviyededir. Gerilim kaynaklı invertör (VKİ)'ü harici şebeke sistemine bağlamak için bir yükseltici trafo kullanılabilir. Yakıt pilinin güç kapasitesinin şebeke sistemininkinden daha küçük olduğu dikkate alınmalıdır. Böylelikle şebeke barası sabit frekansta  $V_S$  genliğiyle ideal kaynak olarak göz önünde bulundurulur. VKİ'nin faz kaymasının kontrolü için ölçülen şebeke gerilimi referans fazör olarak kabul edilmektedir. Aktif ve reaktif gücün üretim ve aktarımının kontrolü üç (3) değişken ile yapılmıştır. Bunlar; gaz giriş akış oranı, modülasyon indeksi ve VKİ ile ilişkili faz ötelemesidir [54].

Güç düzenleme birimlerinin maliyetini azaltmak için yakıt pili DC gerilimini PWM tekniği ile doğrudan AC gerilime dönüştüren bir VKİ'de kullanılabilir. Bu durumda güç anahtarları yüksek frekansta çalışmakta; güç kondansatörlerinin ve filtrelerde kullanılan manyetik bileşenlerin boyutunu vb. azaltmaktadırlar. Düşük frekanslı dalgalanmalar yakıt pilinin aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Akım dalgalanmaları sadece yakıt pili kapasitesini değil yakıt tüketimi ve ömrünü de etkilemekte ve bu sonuçlar yakıt pilinin yüklü şartlarda %10 daha fazla yakıt tükettiğini göstermektedir. Yığın serisindeki yakıt pilinin istenilen çıkış gerilimi, yük değişimi veya giriş yakıt değişikliği ile dalgalanan bir DC gerilimdir. Bu gerilim; DC-DC dönüştürücü tarafından denetlenmelidir [55].

## BÖLÜM III

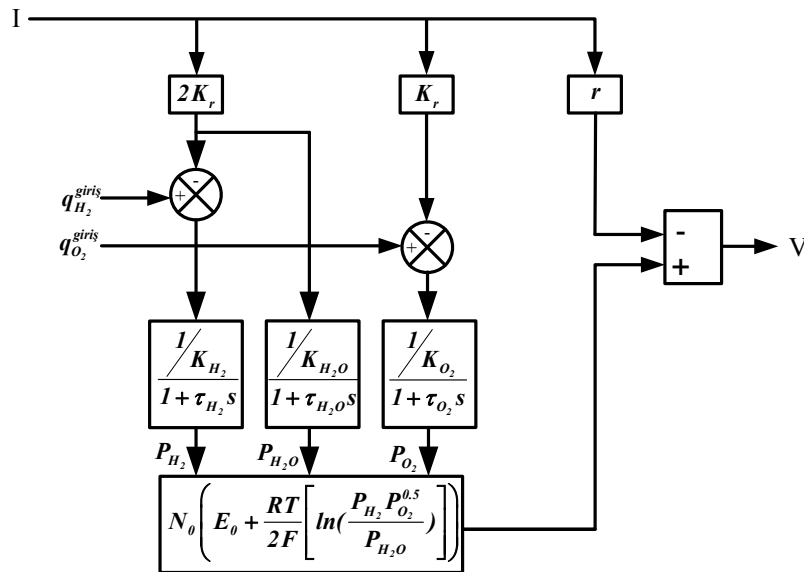
### KOYP MODEL ÖRNEKLERİ

#### 3.1 Literatürde Yer Alan Model Örnekleri ve Modelleme Teknikleri

Bu kısımda ilk olarak katı oksit yakıt pilleri ile ilgili olarak bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar verilecektir. Bu çalışmalar KOYP'nin model örneklerini ve modelleme tekniklerini içermektedir.

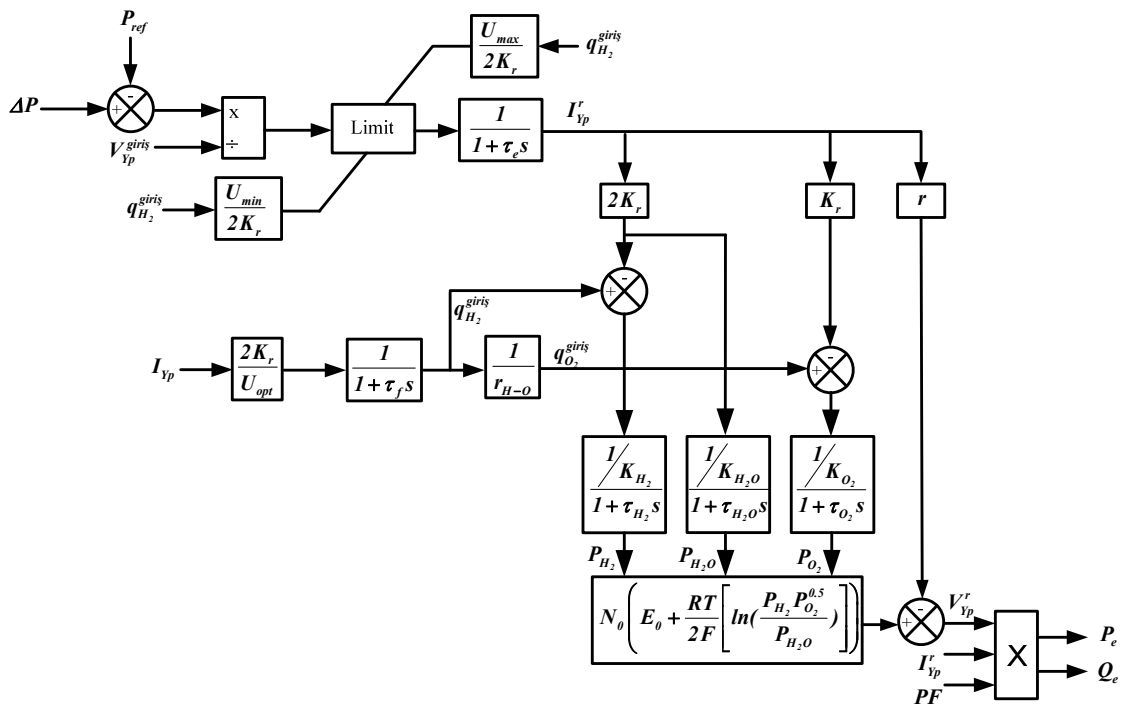
##### 3.1.1 Katı oksit yakıt pilleri için model örnekleri

J. Padulles ve ark. tarafından [56]; güç sistemleri benzetimi (PSS) bilgisayar programı kullanılarak KOYP'li güç sisteminin dinamik modeli elde edilmiştir. Benzetimler için gerekli parametreler Hollanda'da kurulu 100 kW'lık bir sistemden alınmıştır. Ayrıca sistemin yük değişimlerine olan cevabı incelenmiş, bu konuda yakıt girişi kontrolü yanında güç dönüştürme biriminin de önemli bir rolü olduğu belirtilmiştir. Bu model; en temel model olup yakıt tipi olarak saf hidrojen kullanılmıştır. Ayrıca sadece omik kayıpları içermektedir. Yazarlar tarafından geliştirilen KOYP dinamik modeli Şekil 3.1'de verilmektedir [56].



Şekil 3.1 KOYP dinamik modeli [56]

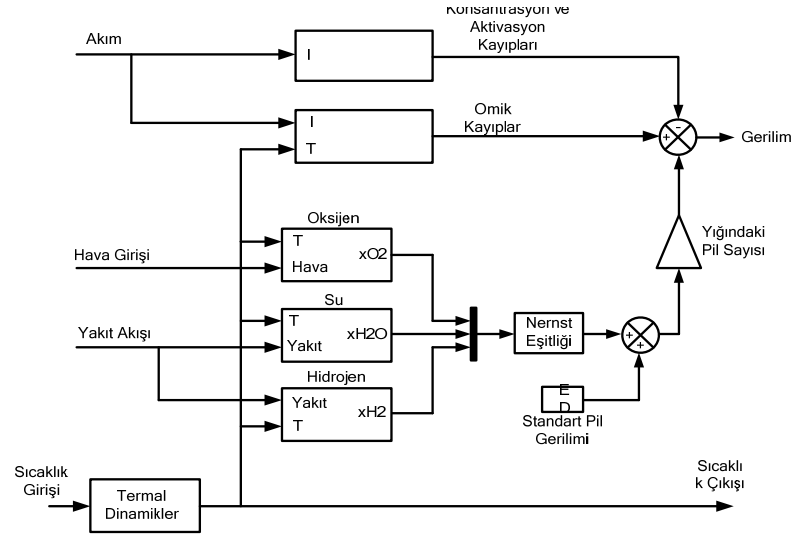
Zhu ve ark. Ref. [56]'da sunulan temel KOYP dinamik modeline CO yakıt işleyici ve güç kontrol kısmı fonksiyonlarını ekleyerek daha gelişmiş dinamik bir KOYP güç üretim sistemini modellemişlerdir. Elektrolitin zarar görmesini engellemek için anot ve katot bölgelerine geçen hidrojen ve oksijen arasındaki yakıt pili basınç farkı; normal çalışma koşulları için 4 kPa'nın altında, geçici hal çalışma koşullarında ise 8 kPa'nın altında olmalıdır. Yakıt pillerindeki elektriksel cevap zamanı genellikle hızlıdır ve yük tarafından çekilen şarjın depolanması yeteneğine sahip kimyasal reaksiyonun hızı ile ilişkilidir. Bu dinamik cevap fonksiyonu Şekil 3.2'de görüldüğü gibi birinci dereceden transfer fonksiyonu olarak modellenmektedir [53].



Şekil 3.2 KOYP sistemi dinamik modeli [53]

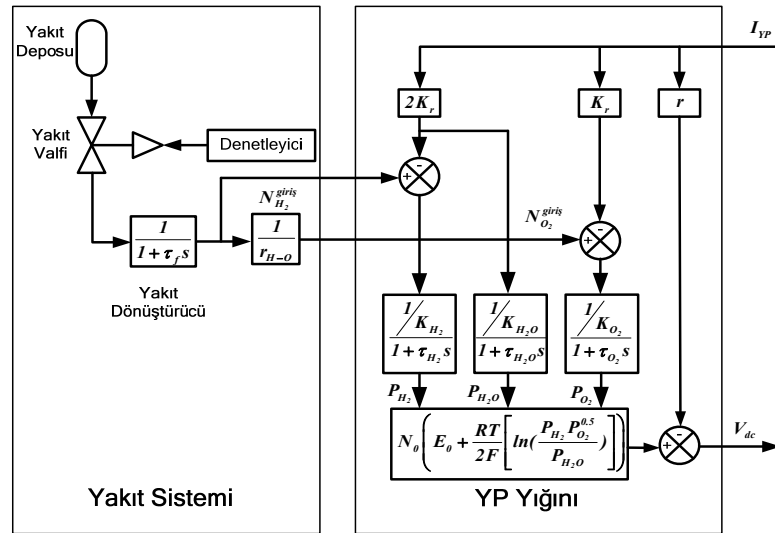
Sedghisigarchi ve ark. tarafından [25]; KOYP için lineer olmayan dinamik model önerilmiştir. Bu model sıcaklık dinamikleri ile omik, aktivasyon ve konsantrasyon gerilim kayıplarının hepsini dikkate alan elektrokimyasal ve termal denklemler temellidir. Evsel bir yakıt pili sisteminin dinamik davranışlarını göstermek için yığın çıkış gerilimi, adım yük, adım yakıt akış ve hızlı yük değişimleri araştırılmıştır. Bu modelin küçük sinyal ve geçici hal kararlılık çalışmalarının her ikisi için de uygun olduğu belirtilmiştir. Yakıt pili sistem modeli Matlab'da gerçekleştirilmiştir. KOYP

sisteminin düzenlemesi ana kimyasal denklemleri ile birlikte Şekil 3.3'te verilmiştir. Bu modelde yakıt tipi olarak saf hidrojen kullanılmaktadır [25].



Şekil 3.3 KOYP dinamik modeli [25]

Li ve ark. [57] yakıt işleyici fonksiyonu eklenmiş Ref. [53, 56]'daki araştırmalar üzerine temellendirilmiş bir KOYP dinamik modelini Matlab/Simulink'te gerçekleştirmişlerdir. Yakıt işleyici doğalgazı hidrojen zengin yakıtla dönüştürmektedir. Sunulan model Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4 KOYP dinamik modeli [57]

Şekilden de anlaşılacağı üzere; Ref [56]'da önerilen yaklaşıma rağmen, KOYP modeli halen karmaşıktır ve analize uygun değildir. Lineer olmayan bu sistemin küçük

sinyal analizi için modelin basitleştirilmesi mümkündür. Buna karşın bu metot KOYP çalışmasının sadece sınırlı aralığı için geçerlidir. Yakıt girişini düzenlemek için başka bir kontrol sinyali olarak  $V_{DC}$  sisteme geri beslenir. Sabit yakıt kullanımı kontrol metodu ile karşılaştırıldığında sabit gerilim kontrolü metodu daha karmaşıktır [57].

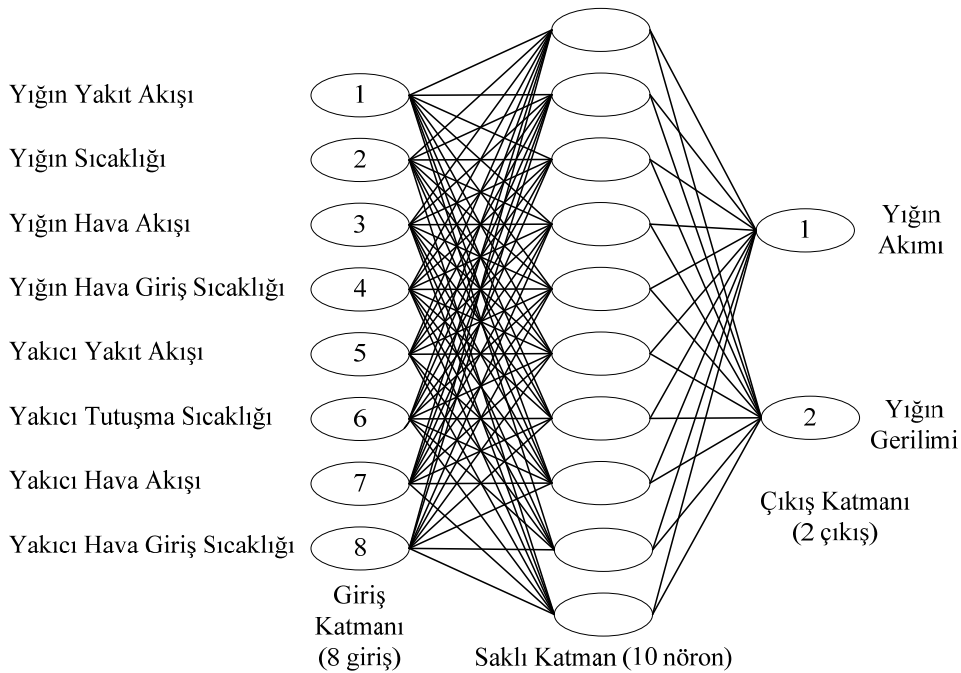
Goel ve ark. [58] Matlab'ta yaptıkları çalışmalarında şu ana kadar verilen model örneklerini temel alarak, bütün gerilim kayıplarını içeren, metanol yakıt dönüştürücüsü bulunan ve termal etkileri hesaba katan bir KOYP sistem modeli sunmuşlardır. Termal modelleri; Ref [25] temelli olup değiştirilerek yeniden tasarlanılmıştır. Ancak yakıt dönüştürücü bloğu birinci dereceden transfer fonksiyonu olarak modellenmiştir [58].

Wang ve ark. tarafından [59] borusal 5 kW'lık KOYP yığının, elektrokimyasal ve termodinamik özellikler tabanlı dinamik modeli sunulmuştur. Önerilen model; kütle ve enerji dönüşüm kanunlarının yakıt pilinin elektriksel karakteristiğine etkisini de içermektedir. KOYP modeli Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmiştir ve çift katman şarj etkisi (Double layer charging effect) modelde hesaba katılmıştır. Ancak herhangi bir yakıt işleyici birimi içermemektedir. Modelin dinamik cevapları, sabit yakıt kullanımı ve sabit yakıt akış hızı için elde edilmiştir. Aynı yük için, sabit yakıt akışı çalışmasındaki çıkış gerilimi sabit yakıt kullanımı çalışmasındakinden daha yüksek olduğu görülmüştür. İki çalışma şekli arasındaki gerilim farkı yük akımının artmasıyla azalmaktadır. Yakıt pili sabit akış çalışmasında daha fazla güç sağlayabilmektedir. Özellikle küçük güçlü yüklerde, sabit akış çalışması modu daha fazla yakıt girişine gereksinim duymaktadır [59].

İyi bir yakıt pili simülatörünü oluşturmak için ilk önce yakıt pilinin güvenilir bir matematiksel modeline ihtiyaç vardır. Böylece yakıt pilinin hem dinamik hem de sürekli hal performansı değerlendirilebilir. Referans [60]'daki çalışmada KOYP'nin dinamik ve sürekli hal davranışları hem benzetim hem de deneysel olarak incelenmiştir. Yakıt olarak saf hidrojen kullanılmış olup yakıt dönüştürücü birimi modellenmemiştir. Pil sıcaklığı sabittir ve sadece aktivasyon ile omik kayıplar dikkate alınmıştır. Ancak benzetim ortamında KOYP olarak modellenen sistem, pratikte tam kontrollü köprü doğrultucu ve serbest uyarımlı DC jeneratör ile gösterilmiştir. Benzetim LabView programı kullanılarak yapılmış olup kullanıcı arayüzü hazırlanmıştır. Yakıt pilinin davranışını görmek için sisteme yük eklemesi yapılmıştır. Bu da sistemden çekilen

akımın artması, verilen gerilimin düşmesi demektir ki benzetim ortamında bu işlem; katoda daha fazla elektron geçişi sağlanarak, daha fazla hidrojen tüketilerek ve kısmi basıncı azaltıp Nernst gerilimi düşürülerek yapılabilir. Ayrıca bu tür sistemlerde ölçülen parametrelerin sürekli hal değerine ulaşmasını hızlandırmak için atık olarak çıkan hidrojen, oksijen ve suyu kontrol eden valflerin zaman sabitlerini aşağıya çekmek gerekmektedir [60].

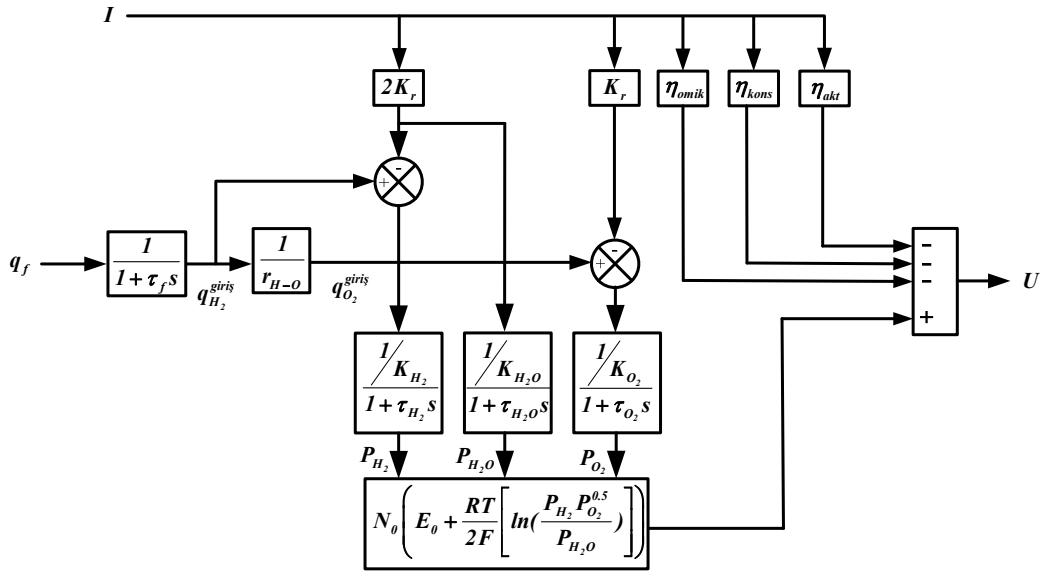
KOYP içeren 5 kW'lık bir mikrojenerasyon sisteminin bilgisayar modelleri elde edilerek gerçek bir evsel sistemde uygulaması yapılmıştır. Bu sistem birleşik ısı ve güç sistemi olarak çalışmaktadır. Geleneksel modellerin bazı olumsuz yönlerinden dolayı bu çalışmada YSA ve bulanık mantık gibi adaptif modeller incelenmiştir. KOYP'nin devreye girme, sürekli hal ve devreden çıkma performansı üzerine çalışmalar yapılmıştır. YSA belirgin matematiksel gösterimlere ihtiyaç duymaksızın karmaşık sistemlerin lineer olmayan giriş ve çıkış değişkenleri arasında lineer olmayan yaklaşık bir bağıntıya göre çalışmaktadır. KOYP için geliştirilen YSA modeli en temel dinamik model olup Şekil 3.5'teki gibidir. Benzetim çalışmaları Matlab ortamında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre her iki modelin de yakıt pili performansı için iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak ANFIS'in YSA'ya göre yakıt pili akımında daha iyi olduğu belirtilmiştir [61].



Şekil 3.5 KOYP modelinde kullanılan sinir ağı yapısı [61]



100 kW'lık, üç gerilim kaybını ve yakıt dönüştürücü modelini içeren KOYP sisteminin fiziksel modeli genetik algoritma ve radyal tabanlı fonksiyon içeren YSA ile elde edilmiştir. Şekil 3.6'da verilen modelin sabit gerilim ve sabit yakıt kullanımı kontrolü analiz edilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre bu tür sistemler karmaşıktır. Ancak yakıt kullanımı daha güvenli bir şekilde gerçekleşmektedir [62].



Şekil 3.6 KOYP dinamik modeli [62]

Wavelet ağı kullanılarak 30 pilden oluşan doğrudan dâhili dönüşümlü 16 kW'lık bir KOYP yığını Matlab ortamında analiz edilmiştir. Bu yapı; yakıt dönüştürücü birimi, elektrokimyasal birim ve sıcaklık biriminden oluşmaktadır. Bu çalışmada Wavelet ağının kullanılması ile hesaplama zamanının oldukça azaltıldığı, yük takibinin hızlı bir şekilde yapıldığı ve yakıt pilinin dinamik ve statik karakteristiklerinin yüksek doğrulukta belirlendiği ortaya çıkarılmıştır. Bu modelde gerilim kayıpları dikkate alınmamış ve yakıt olarak metan kullanılmıştır [24].

Yakıt pili modeli için yapılan başka bir çalışmada lineer olmayan kısım için radyal tabanlı fonksiyon içeren YSA ve lineer kısımlar için dış kaynaklı girişi olan özbağımlı (ARX) modeli ile çalışmalar yapılarak bir Hammerstein modeli sunulmuştur. Benzetim sonuçları; önerilen tahmin kontrolüne dayalı modelin oldukça iyi performans sergilediğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre PI denetleyici ile gerilim denetimi yapıldığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [63]. Aynı yazarlar çok girişli çok çıkışlı lineer olmayan bir sistem olan KOYP'nin geleneksel yöntemler ile

modellenmesinin zor olduğuna dikkat çekmektedir. Elde edilen sonuçlara göre KOYP'nin gerçek çıkış geriliminin; önerilen Hammerstein modellemesiyle oldukça iyi bir şekilde örtüştüğü görülmüştür. Böylece bu modelleme tekniğinin KOYP'nin dinamik davranışını tanımlamak için kabul edilebilir olduğu söylenmektedir. Ancak bu çalışmalardaki KOYP modelleri en temel dinamik modelden oluşmaktadır [64].

Wu ve ark. [65] 100 kW'lık KOYP sisteminin lineer olmayan sıcaklık ve gerilim dinamik özelliklerini tanımlamak için T-S bulanık modelini önermişlerdir. Metan dönüşümü ile hidrojen üreten bir dönüştürücünün birinci dereceden transfer fonksiyonu olarak modellendiği sistem sunulmuştur. Bütün gerilim kayıpları dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunda; T-S bulanık tanımlama metodu kullanılarak KOYP dinamik modelinin oluşturulmasının mümkün olduğunu göstermiştir [65]. Başka bir çalışmada ise lineer olmayan sistemler için uygun olan değiştirilmiş T-S bulanık yöntemini kullanarak 3.5 kW'lık KOYP yığınının Matlab yardımıyla modellemişlerdir. Termal model fiziksel modelin merkezidir ve entalpi, kütle ve enerji denklemleri ile geliştirilmiştir. Model parametreleri geri yayılım algoritması kullanılarak öğrenilmiştir. Yakıt dönüştürücü dinamiği sisteme dahil edilmemiştir. Değiştirilmiş T-S modelinin yığının sıcaklık cevabını yeterince doğru takip edebildiği ve ısı kontrol stratejileri tasarımında rahatça faydalanılabileceği gösterilmiştir [66].

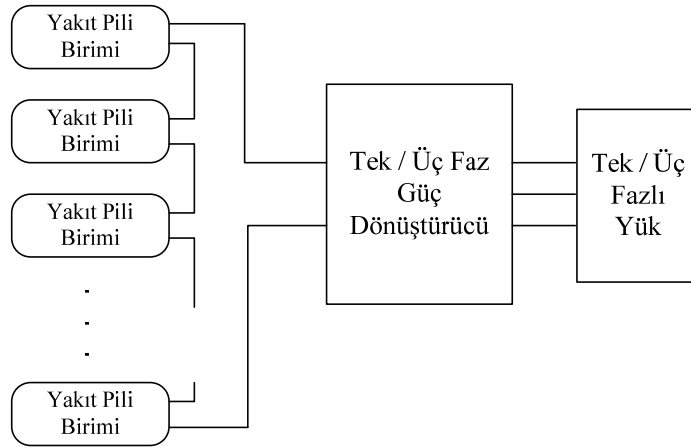
## BÖLÜM IV

### KOYP'NİN ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ UYGULAMALARI

#### 4.1 KOYP İçeren Enerji Sistemleri

SECA (Solid-State Energy Conversion Alliance) programının ilkelerine göre KOYP'ler evsel uygulamalar için 3-10 kW'lık birimler şeklinde üretilebilecektir. Gerekli olan güç ihtiyacını karşılamak için belli bağlantı şekillerinde yakıt pilleri birleştirilerek birimler oluşturulmaktadır. Aşağıda bu kapsamda incelenen beş farklı yaklaşım verilmiştir [67]:

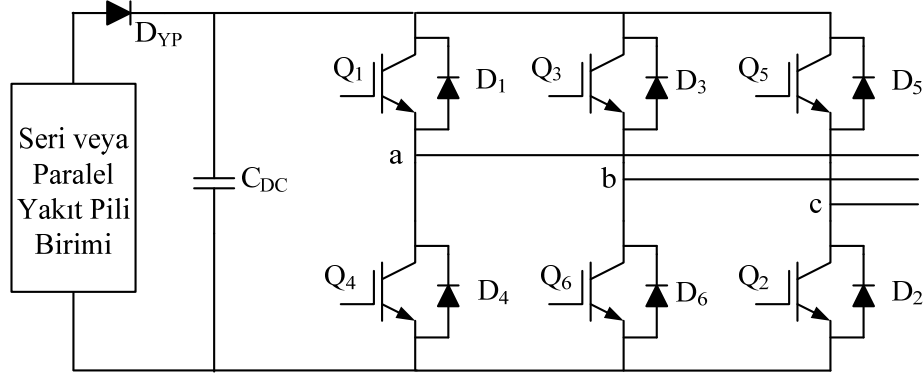
*Seri bağlantı:* Yakıt pillerini birleştirmenin en basit yoludur. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi birbirine seri olarak bağlanan yakıt pillerinin çıkışına sisteme uygun bir güç dönüştürücüsü bağlanarak yüklerin ihtiyacı olan elektrik enerjisi elde edilmektedir. İhtiyaç olan gücü elde etmek için yakıt pilleri paralel de bağlanılabilir. Ancak dikkat edilmelidir ki; yakıt pilleri paralel bağlandığı zaman akımı üstlenemedikleri için birtakım önlemler alınmalıdır [67].



Şekil 4.1 Seri bağlantının blok diyagramı [67]

Şekil 4.2'de gösterildiği gibi yakıt pilleri arasındaki olası bir sirkülasyon akımını önlemek için birimlerin çıkışına seri bağlı bir diyot eklenmektedir. Yakıt pilleri şekildeki gibi bir DC link üzerinden tek fazlı ya da üç fazlı olabilen güç dönüştürücüsüne bağlanmaktadır. Dahili kayıplardan dolayı yük akımının artmasıyla yakıt pili gerilimi düşmektedir. Bu sebeple Şekil 4.2'deki DC link gerilimi sabit

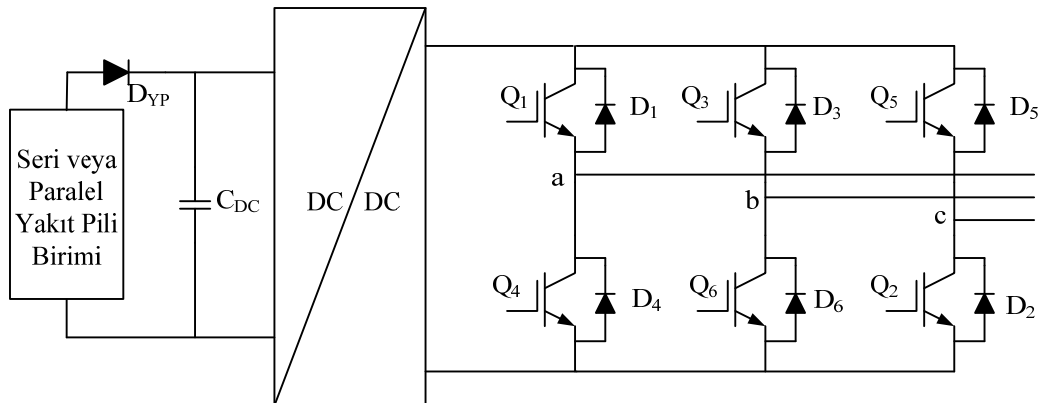
değildir. Normal koşullarda; invertör sabit bir DC link gerilimi ( $V_{DC}$ ) beklemektedir, fakat DC link üzerindeki gerilim sensörleri ve invertör kontrol sistemindeki bazı değişiklikler ile invertör değişken DC link gerilimi ile de çalışabilmektedir [67].



Şekil 4.2 Üç fazlı invertör [67]

Şekil 4.3'te gösterildiği üzere DC link gerilimini sabit tutmak için sisteme DC-DC gerilim konvertörü eklenebilir. Bu yolla invertör giriş gerilimi yük akımından bağımsız olacaktır. DC-DC konvertör kullanılmadığı takdirde şu sonuçlar oluşacaktır:

- Özellikle küçük güçlü yüklerde yakıt pilleri yüksek gerilim üreteceklerinden güç anahtarları da daha yüksek gerilimde çalışacaklardır. Bu durum invertörün daha pahalı olmasına neden olacaktır. Lakin eklenecek DC-DC konvertörün de maliyeti hesaba katılmalıdır.
- İnvirtörün kontrol sisteminin karmaşıklığı artacaktır, fakat ek bir DC-DC konvertör de kontrol karmaşıklığına neden olacaktır.



Şekil 4.3 DC-DC gerilim regülatörü ve üç fazlı invertör

Seri bağlantının faydaları:

- Yakıt pili birimleri basit bir şekilde bağlanabilmektedir.
- Düşük cihaz maliyeti olmaktadır. DC-DC konvertör kullanılmadığı zaman sadece altı güç anahtarı ile ihtiyaç duyulan güç elde edilebilmektedir.
- Pahalı olmadıklarından dolayı genellikle üç fazlı invertör birimleri kullanılır. Çünkü sadece yüksek gerilimde çalışan güç anahtarları maliyeti arttırmaktadır.

Seri bağlantının sakıncaları:

- Eğer yakıt pillerinden biri arızalanırsa sistem çalışmayacaktır. Arızalanan birim yenisiyle değiştirilmelidir ya da harici bir bağlantı ile devre dışı bırakılmalıdır. Bu güvenilirlik ile ilgilidir.
- Yakıt pili gerilimi ve akımı kontrol edilemez.

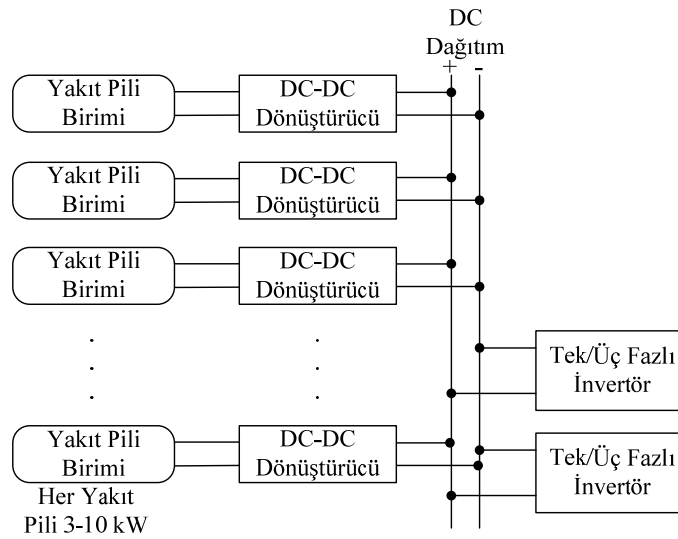
*DC dağıtım:* Şekil 4.4'te gösterildiği gibi; birer yükseltici DC-DC konvertör her bir yakıt piline bağlanmakta ve bu konvertörlerin sabit DC çıkışları da paralel bağlanarak DC dağıtım bağlantı şeklini oluşturmaktadırlar. Bu bağlantı şekliyle seri bağlantının olumsuz yönleri önlenebilmektedir.

DC dağıtım bağlantı şeklinin faydaları:

- Her bir yakıt pili DC-DC konvertör birimiyle bağımsız olarak kontrol edilebilir. Yakıt pili birimleri bakım veya yenileme için sistemden sökülebilir ve sistemin durduğu zamanlarda işleyiş devam edecektir. Bu yüzden bu sistem seri bağlantıdan daha emniyetlidir.
- Artan güvenilirlik ve arıza toleranslı çalışma durumu; DC-DC konvertör birimleri ile birlikte gereğinden fazla yakıt pili birimlerinin eklenmesiyle elde edilebilir.
- Her bir alt-sistem tek bir birim olarak tasarlanabilir ve ihtiyaç duyulduğu kadar birleştirilebilir. Birimlerin listesi yakıt pili, DC-DC konvertör ve invertör birimini içerecektir. Invertör bir birim olarak piyasadan temin edilebilir.

DC dağıtım bağlantı şeklinin sakıncaları:

- DC-DC konvertörün çıkışındaki ani gerilimler eşit olmadığı zaman sirkülasyon akımları meydana gelecektir. Bu; sistem çalışmasında önlenmesi gereken parazitler yapacaktır.
- Bu bağlantı şekli DC-DC konvertörden dolayı seri bağlantıdan daha yüksek maliyetli cihaza ihtiyaç duymaktadır, fakat cihaz daha düşük güç oranlarına sahiptir.



Şekil 4.4 DC dağıtım bağlantı şeklinin blok diyagramı

*Yüksek frekanslı alternatif akım dağıtım bağlantı şekli:* Şekil 4.5'te gösterildiği üzere her bir yakıt pili; girişindeki DC işareti 20 kHz'den daha yüksek frekanslı AC işarete dönüştüren H-köprü invertöre bağlıdır. İnvörtör çıkışı gerek görüldüğü takdirde yüksek frekanslı, yükseltici bir trafoya bağlanmaktadır. Bu trafonun sekonderine bir veya birkaç tane yüksek frekanslı AC işareti 50 Hz-60 Hz gibi daha düşük frekanslı AC işarete dönüştüren tek faz-üç faz çevrimsel-konvertör (sabit frekanslı AC işaretleri değişken frekanslı AC işaretlere doğrudan çeviren güç elektroniği devreleridir. Üstün kontrol imkanı sağlarlar.) veya matris konvertörler bağlanır.

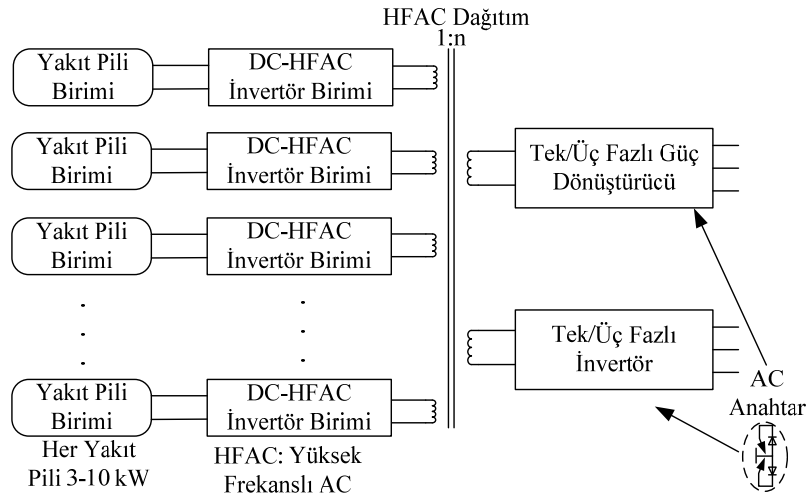
Yüksek frekanslı alternatif akım dağıtım bağlantı şeklinin faydaları:

- Yüksek frekansta çalışılmasından dolayı harmonikler daha yüksek derecededir ve daha küçük filtreler ile kolaylıkla harmonikleri süzülebilir.

- Yüksek frekanslarda ihtiyaç duyulan pasif elemanlar trafo şasesinde olduğu gibi daha küçük boyuttadır.
- Birimsellik; DC dağıtım bağlantı şekline benzemektedir.

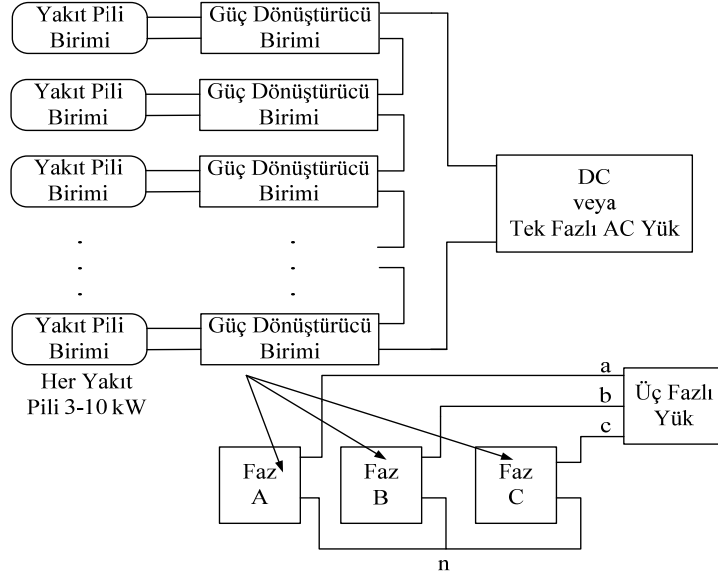
Yüksek frekanslı alternatif akım dağıtım bağlantı şeklinin sakıncaları:

- Yüksek frekanslı alternatif akım trafosu özel olarak tasarlanmaktadır. Bu sebeple trafo maliyeti pahalı olmaktadır.
- Eğer trafo giriş gerilimi DC bileşen içeriyorsa, bu noktada trafo doyumu ile ilgili bir problem ortaya çıkacaktır.
- Çevrimsel-konvertörler ve matris konvertörler Şekil 4.5'te de gösterildiği gibi sırt sırta bağlı iki anahtardan oluşan AC anahtarlara ihtiyaç duymaktadır. Bu anahtarlar genelde birim olarak mevcut değildir.
- Çevrimsel-konvertör/matris konvertör denetiminden ve onların tek fazlı yüksek frekanslı invertörler ile etkileşiminden dolayı sistem denetimi karmaşıktır.



Şekil 4.5 Yüksek frekanslı alternatif akım dağıtım bağlantı şeklinin blok diyagramı [67]

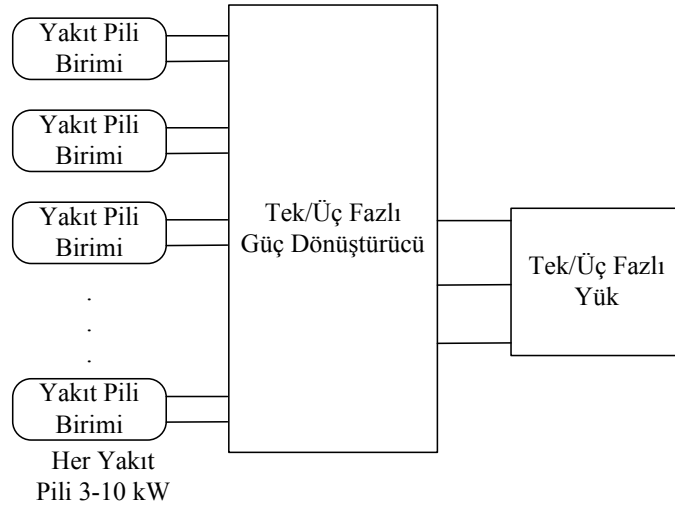
*Kaskat bağlı çoklu seviyeli bağlantı şekli:* DC dağıtım bağlantı şeklindeki paralel bağlantı yerine; yakıt pili ve güç konvertörü çiftlerinin seri bağlanarak Şekil 4.6'da gösterildiği gibi kaskat bağlı çoklu seviyeli konvertör formu elde edilebilmektedir. Bu bağlantıda giriş kaynaklarının her biri, diğerinden yalıtılmıştır. Tek fazlı invertörler yıldız ve üçgen bağlanılarak üç fazlı çoklu seviyeli invertör sistemleri oluşturabilir.



Şekil 4.6 Kaskat bağlı çoklu seviyeli bağlantı şeklinin blok diyagramı

Bu yapıda her H-köprü konvertörü; farklı darbe genişlik oranlarına (duty ratio) sahip sıfır seviyeli kare dalgalar üretmektedir. Konvertörün çıkışında bu gerilimler toplanmaktadır. Yakıt pili gerilimindeki düşüşün üstesinden gelebilmek için ya yakıt pili çıkışlarına gerilim regülatörleri bağlanmalıdır ya da yakıt pili gerilimleri takip edilmeli ve denetim sinyalleri uygun bir şekilde değiştirilmelidir.

*Çoklu seviyeli bağlantı şekli:* Şekil 4.7’de gösterildiği gibi yakıt pili birimleri bir adet 1/3 fazlı çoklu seviyeli invertöre bağlanmaktadır. Bu yapıda eğer yakıt pili gerilimi takip edilirse gerilim regülatörüne ihtiyaç olmayabilir.



Şekil 4.7 Çoklu seviyeli bağlantı şeklinin blok diyagramı



Çoklu seviyeli bağlantı şeklinin faydaları:

- Birimseldirler ve daha düşük üretim maliyetine sahiptirler. Kaskat bağlı çoklu seviyeli konvertörler diğer çoklu seviyeli konvertörlerden daha birimsel yapıdadırlar.
- Güvenilirliği arttırmak için çok sayıda seviyeler eklenilebilir.
- Her bir faz diğerlerinden ayrı olarak çalıştığı için son konvertör kolaylıkla tek fazlı, çok fazlı veya yıldız-üçgen üç fazlı yapılara bağlanabilmektedir.
- Anahtarlama kayıplarını azaltmak ve konvertör verimini arttırmak için temel frekans anahtarlama tekniği kullanılabilir.
- Çoklu seviyeli PWM, çoklu seviyeli uzay vektör PWM v.b. denetim stratejilerini uygulamak ta mümkündür.

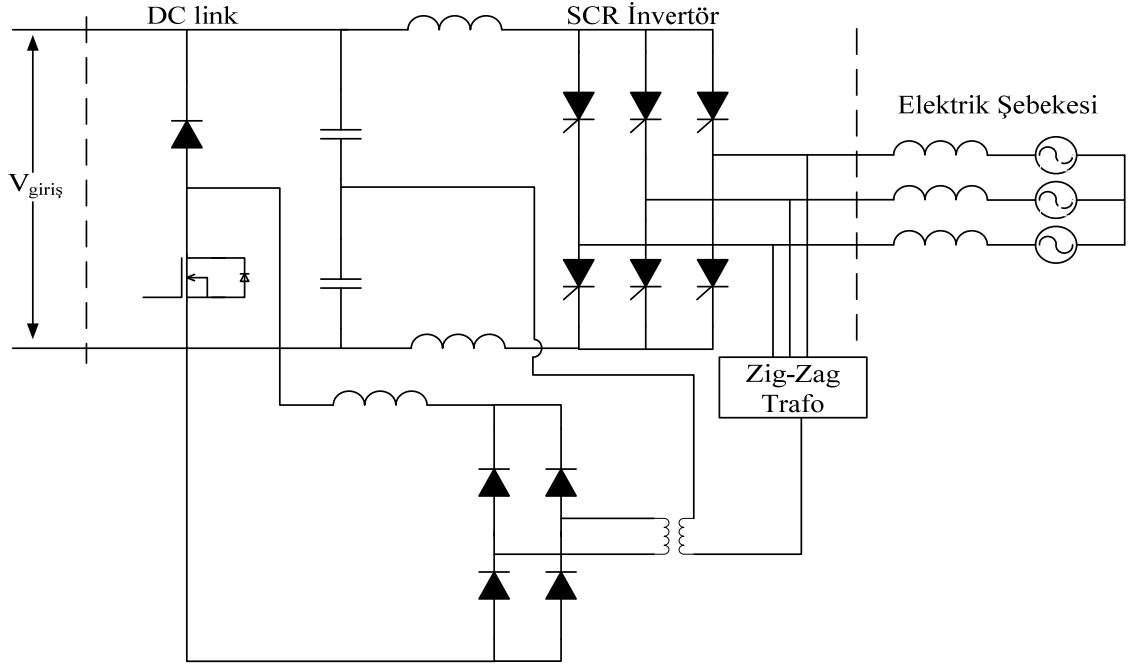
Çoklu seviyeli bağlantı şeklinin sakıncaları:

- Bu tip konvertörlerde kullanılan cihazların sayısı yüksektir. Fakat çalışma gerilimleri düşüktür. Artan anahtar sayısı fiyatı arttırır, fakat daha düşük gerilimde çalışan anahtarlar pahalı değildir.
- Temel frekans anahtarlamasından dolayı daha düşük seviyedeki harmoniklerin miktarı daha yüksektir. Fakat burada bu harmonikleri azaltmak için birtakım teknikler vardır. Örneğin; anahtarlama açıları, ihtiyaç duyulan 5. ve 7. harmonikleri içermeyen gerilimi elde etmek için seçilebilir.
- Yakıt pili uygulamaları için dalgalanma akımı önlenmelidir. Çoklu seviyeli bir konvertör için yakıt pili akımında yüksek dalgalanma oluşmaktadır [67].

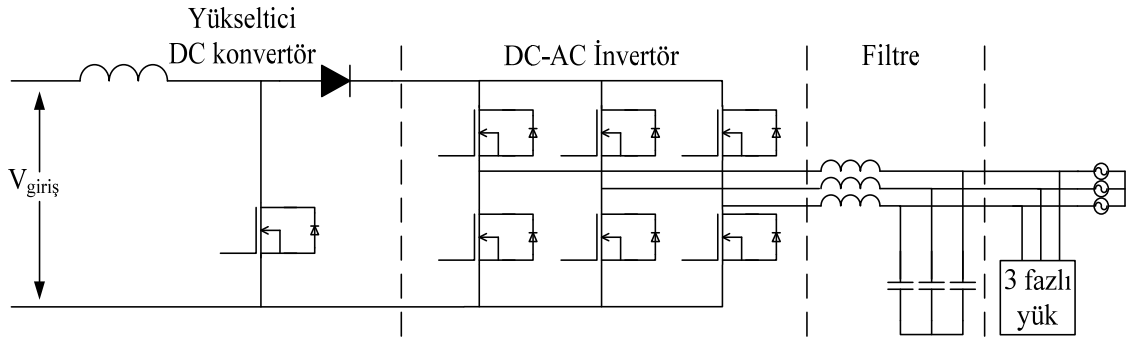
Yakıt pilli güç sistemlerinde şebekenin uzaktan kontrolü; fazla ölçüm sayısı, veri transferi, veri işlemesi ve şebeke yönetimi vb. nedenlerden dolayı zordur. Ayrıca bu tür sistemlerde yerel dağıtım şirketlerinin yük tahmin analizini olabildiğince sağlıklı yapması gerekmektedir. Yapılan bir yakıt pilli ev uygulamasında akım kontrollü ve ısı kontrollü çalışma karşılaştırılmıştır [68]. Akım kontrollü çalışmada, düşük yük seviyelerinde yük akımında kapanmaların olduğu bu yüzden de şebekeden enerji transfer edildiği belirtilmektedir. Ancak yakıt pili düşük yük seviyelerinde yarı-zamanlı olarak çalıştırılırsa şebekeden enerji transferi önlenebilmektedir. Bu çalışmada yakıt pili tarafından kullanılan ısı %26 iken ısı kontrollü çalışmada %80, akım kontrollü

çalışmada, şebekeye enerji aktarılmazken ısı kontrollü çalışmada şebekeye de enerji verilmektedir. Ancak ısı kontrollü çalışma tavsiye edilmemektedir. Çünkü kış aylarında düşük yük seviyelerinde bu tip yakıt pilleri şebekeye yüksek seviyede elektrik gücü enjekte etmektedirler. Bu da gerilim seviyesinde sınırların aşılmasına ve aşırı-gerilim rölelerinin atarak yakıt pilinin kapanmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu çalışmada yakıt pilli güç sisteminde kısa devre olayları da incelenmiştir. İlk olarak bir (1) adet yakıt pili içeren bir sistemde üç faz kısa devre incelenmiştir. Yakıt pili sistemleri güç sistemlerine kesiciler, aşırı/düşük gerilim röleleri ve sigortalar üzerinden bağlanmalıdır. Röle atana kadar geçen sürede ise kendinden komütasyonlu invertör aracılığı ile kontrol yapılabilir. Yakıt pilinin geçici durum çalışmasının EMTDC programı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. İkinci olarak dal şebeke tipindeki bir sistem altı (6) adet yakıt pili sistemi içermektedir. Bu tür sistemlerde sadece ana bara ile dal noktalarının bağlandığı düğüme bir (1) adet kesici yerleştirilmektedir. Herhangi bir dalda üç faz kısa devre meydana geldiğinde arızanın olduğu barada gerilim düşerken başka baralarda gerilim yükselmesi meydana gelebilmektedir. Bu durumda aşırı-gerilim röleleri ile koruma yerine sadece arızalı dal devreden çıkarılarak koruma gerçekleştirilmektedir. Orta ve yüksek gerilim şebekelerinde meydana gelen kısa devre olayları ise ilgili barada bir gerilim çökmesine neden olmaktadır. Bu tür durumlarda ters akım rölesi de kullanılmaktadır [68].

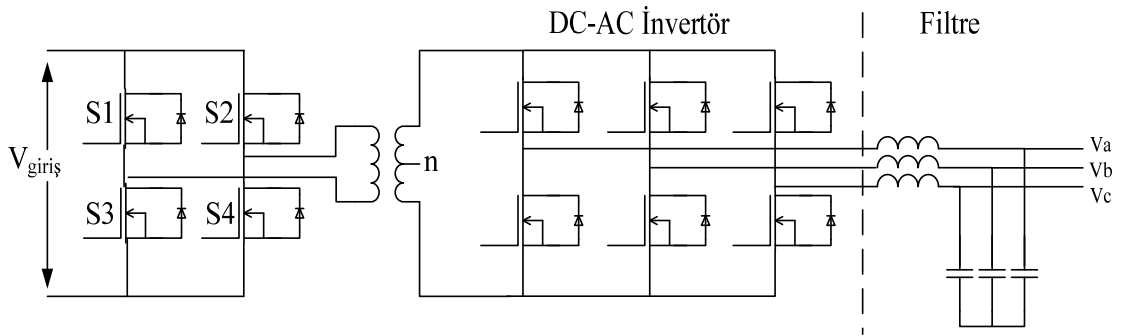
Şekil 4.8-4.10'da gösterildiği gibi güç elektroniği sistem topolojileri yakıt pilli sistem için araştırılmıştır [69-71]. Bunlardan ilki; hat komütasyonlu akım kaynaklı invertör (AKİ), ikincisi; kendinden komütasyonlu PWM VKİ ve sonuncusu ise yüksek frekanslı trafo yalıtımlı çevrimsel-konvertördür. Bu üç topoloji 5 kW'tan az tam yük çıkış gücü vermekte ve KOYP yığını üzerine farklı dalgalanma dinamikleri uygulamaktadırlar. İlk topoloji yakıt pili üzerine ağır ölçekli bir akım dalgalanması uygularken; ikinci ve üçüncü topolojiler bu uygulamanın yanı sıra hızlı ölçekli akım dalgalanmaları da uygulamaktadırlar. Son olarak yükteki geçici durumların etkisini görmek için hem SPWM hem de SVM teknikleri kullanılmıştır. Bu durumda SVM tekniği düzeltilmiş bir DC bara kullanımı sunmaktadır ve bunun sonucu olarak giriş akımını da düzeltmektedir. Ancak SVM durumundaki ısınma oranı SPWM'den daha yüksektir [69-71].



Şekil 4.8 Hat komütasyonlu akım kaynaklı invertör (AKİ)



Şekil 4.9 Kendinden komütasyonlu PWM gerilim kaynaklı invertör (VKİ)



Şekil 4.10 Yüksek frekanslı trafo yalıtımlı çevrimsel-konvertör

KOYP'nin 3 fazlı şebekeye bağlı olduğu durumda yapılan bir çalışmada kullanılan invertör DC gerilimi doğrudan üç fazlı 50 Hz'lik AC gerilime dönüştürmektedir. Trafo

güvenlik gereği yalıtım için kullanılmıştır. Güç sistemi eşleştirme bloğu ise yakıt pili çıkışındaki gerilimi 300 V'luk DC gerilim seviyesine yükseltmek için kullanılmaktadır. Güç sistemi eşleştirme bloğu ile yakıt pili çıkışı; %65'lik regülasyonlu, %3'ten küçük dalgalanma miktarı olan, geri güç akışını önleyen, çok yüksek güvenilirlik sağlayan, akımdaki bütün geniş değişimleri sınırlayan ve akımdaki bütün küçük değişimleri  $\pm 5$  A'e sınırlayan özellikte olmalıdır. Bu blok yükseltici konvertör olarak tasarlanmaktadır. Yükseltici konvertörler çoğunlukla süreksiz (kesintili) durumda çalıştırılırlar. Bu durumda bütün enerji; cihazın anahtarlanmasıyla (devreye girmesiyle) birlikte bobin üzerinde depolanmakta ve cihazın kapatılmasıyla da çıkış kapasitörüne aktarılmaktadır. Ayrıca bu durumda; filtrelemeyi engellemek uygulama açısından uygun olmadığı için sürekli durumda çalışma tercih edilebilir. Ancak bu çalışma da darbe genişlik oranı ile hiperbolik olan elemanın kazancından dolayı denetim ile ilgili bazı problemler oluşmaktadır. Bu nedenden dolayı DC link çıkış gerilimini yükseltmek için trafo kullanılabilir. Önerilen yakıt pili için yüksüz gerilim değeri 220 V ve konvertör çıkış gerilimi 300 V olarak seçilmiştir. Bu durum hem yükseltici konvertörde hem de invertörde 20 kHz'den büyük frekanslarda çalışan 600 V'luk IGBT'lerin kullanılması ile sağlanmaktadır. KOYP'den çekilen akımın denetlenmesiyle ilgili iki kontrol yöntemi dikkate alınmalıdır. Güç sönümlenmesi için denetimli bir rezistif eleman kullanılabilir. Bu yöntem ucuzdur fakat oldukça mürif bir uygulamadır. Bunun dışında güç sönümlenme direncindeki akımı regüle etmek için aktif denetime ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum iyi bir sürekli sistem çalışması sağlanmasına rağmen elektriksel olarak gürültüye sebebiyet vermektedir. Ya da ikili ağırlıklı (binary weighted) rezistörler kullanılabilir ki bu sistemler de oldukça karmaşık ve pahalıdır. İkinci kontrol yöntemi için bir enerji depolayıcı kullanılabilir. Bunun için de en iyi seçenek ultra kapasitörlerdir. Ancak bu ekipmanlar da günümüzde hala pahalı bir çözüm olmaktadır. 6 (altı) darbeli invertörün şebekeye senkronizasyonu için Vektör Kontrolü kullanılmış olup bu kontrol ile şebeke içerisinde çok hızlı akım denetimi sağlanmış olmaktadır. İntertör tasarımındaki en büyük problem standart uyumsuzluğudur. Temel invertör tasarımında gerilim regülasyonu, DC enjeksiyon, harmonikler ve dalgalanma kapasitesi dikkate alınmalıdır. İntertör çıkışındaki indüktansın büyüklüğü, çıkış gerilimini 0.2 pu'den büyük olmayacak şekilde etkilemektedir [4].

Doğal gaz ile çalışan 5 kW'lık bir KOYP güç sisteminin performansı, çalışması ve kontrol karakteristikleri şebeke bağlantılı durumda incelenmiştir [72]. Bu tür

sistemlerde yakıt pilli sistemi ile şebeke arasında senkronizasyonun sağlanması oldukça önemlidir. Bu işlem güç dönüştürme birimi tarafından yapılmaktadır. Yakıt pilli bir sistemin yük değişikliklerine cevap verebilmesi için yapısında kapasitör ve akü gibi araçlar bulundurması gerekmektedir. Ayrıca invertörün anahtarlanmasından kaynaklanan akım dalgalanmaları yakıt piline zarar verebilmektedir. Bu dalgalanmaların belirli sınırlar içerisinde kalması gerekmekte ve yakıt piline göre çeşitlilik göstermektedir [72].

Matlab/Simulink'te dinamik benzetimi ve kontrolü yapılan KOYP'li güç sistemi yapısında yer alan akım kaynaklı invertör; GTO tabanlı olup PI ile denetimi yapılmıştır [6]. Sistemin açık ve kapalı çevrim çalışma koşulları bozulmalar altında incelenmiştir. İlk olarak sadece KOYP'li güç sistemi, test amacıyla sonsuz baraya bağlanmış ve hızlı yük takip kabiliyeti olduğu görülmüştür. Daha sonra ise KOYP'li güç sistemi; IEEE 13 baralı sisteme dizel ve gaz türbini jeneratörleri ile birlikte bağlanmıştır. Dizel jeneratöre yakın bir noktada meydana gelen üç faz-toprak arızasında sistemin davranışı incelenmiş ve bir arıza meydana geldiği zaman sistemin dinamik cevabının oldukça iyi olduğu belirlenmiştir [6]. Bu çalışmanın ikinci kısmında ise elde edilen lineer olmayan dinamik modeli lineerleştirerek kararlılık kontrolü yapılmıştır. Böylece KOYP içeren bir dağıtılmış güç sisteminin, meydana gelen dalgalanmaları söndürme kabiliyeti araştırılmıştır. 13 baralı sistemin farklı bölgelerinde meydana gelen üç faz-toprak hatasının sisteme etkisi incelenmiştir. Benzetim sonuçları yakıt pili içeren dağıtılmış güç sistemlerinin dağıtım sistemindeki dalgalanmaları söndürme kabiliyetinin olduğunu göstermiştir [73].

Şebekeden bağımsız KOYP içeren bir güç sisteminde bulunan DC-DC yükseltici konvertör; bulanık mantık ile kontrol edilmiştir [7]. Burada gerilim tabanlı kontrol yapılmıştır. Güç dönüştürme biriminde yer alan invertörün şebeke bağlantılı olması durumunda akım tabanlı kontrol yapılması gerektiği belirtilmiştir. Çünkü bu durumda şebeke içerisine yük akışı olacaktır. MOSFET tabanlı konvertörün bulanık mantık ile kontrolü; sistem kararlılığını ve performansını arttırdığı gözlemlenmiştir [7].

Genetik algoritma tabanlı kontrolü yapılan KOYP'li bir güç sisteminin yük-frekans kontrolü üzerine etkileri incelenmiştir [8]. Bu çalışmada iki ayrı kontrol döngüsü önerilmiştir. Bu kontrol döngüleri; yakıt girişi kontrolü ve invertörün tetikleme açıları

kontrolü şeklindedir. Yakıt pilinin kontrolü ile frekans sapmalarını düzeltmek ve sistem enerjisini dengelemek amaçlanmıştır. İnvörtörün şebekeye senkronizasyonu faz kilitlemeli döngü (FKD) ile sağlanmıştır. Matlab'ta modellenen 1 MW'lık KOYP ve gaz türbininden oluşan dağıtılmış güç sisteminin açık ve kapalı çevrim çalışma koşulları incelenmiştir. Önerilen kontrol döngüleri ile yakıt pilinin küçük yük değişimlerini takip edebilme kabiliyetine sahip olduğu ve frekans ayarı sağladığı belirtilmiştir [8].

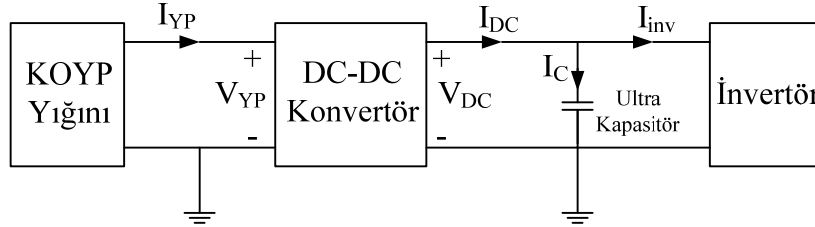
J. Lee ve arkadaşları [9] 5 kW'lık KOYP için düşük maliyetli ve yüksek verimli 10 kW'lık bir güç dönüştürücü birimi tasarlayarak hem benzetim hem de deney çalışmasını yapmışlardır. Ancak burada KOYP ve bir batarya hibrit olarak incelenmiştir. Genel olarak güç dönüştürme biriminde yer alan invörtörler aşağıdaki karakteristiklere sahip olmalıdır:

Yakıt pili için kabul edilebilir genişlikte gerilim ayarı olmalı,  
Çıkış gerilimi kontrol edilebilmeli,  
Yalıtımlı ve şebekeye paralel çalışabilmeli,  
Hızlı reaktif güç dağılımı olmalı,  
Düşük çıkış harmonikleri olmalı,  
Yüksek verimlilik ve  
Geniş güç sistemleri için uygunluk şeklinde sıralanabilir.

DC-DC konvertör gerilimi PI ile denetlenmektedir. Dalgalanma bileşenlerini azaltmak ve düşük THD'li AC gerilim çekmek için invörtör çıkışında LC filtre kullanılmıştır. Bu yapıda hem MOSFET hem de IGBT kullanılmıştır [9].

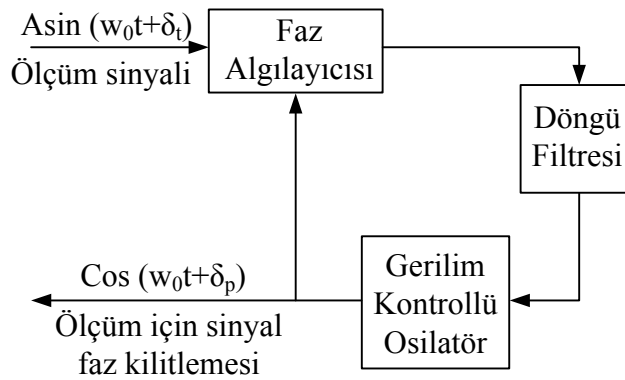
Bir başka çalışma kapsamında Mikroşebekeler incelenmiştir. Mikroşebekeler; şebeke bağlantılı veya özerk çalışan, bağlantılı/bağlantısız süreçlerde güvenilir bir şekilde geçişe izin veren yapılardır. Bu yapılar, sadece yakıt pili gibi döner ataleti olmayan invörtör tabanlı kaynaklar tarafından beslenir. Bunun bir sonucu olarak AC gerilimin ve akımın frekansının invörtör denetimi ile sağlanması gerekmektedir. Genellikle bu durum güç elektroniği elemanlarını tetiklemek için referans bir sinyal oluşturan FKD kullanımı ile yapılmaktadır. Referans [10]'daki çalışmada sabit yakıt akış durumu ve sabit yakıt kullanım durumu olmak üzere iki temel durum incelenmiştir. İkinci durum; birinci duruma göre düşük akım seviyelerinde polarizasyon eğrisinde herhangi bir diklik

göstermemektedir. Ancak ikinci durum eğri üzerinde birinci duruma göre aşağı seviyelerde seyrederek. Şekil 4.11’de gösterildiği gibi DC baradaki enerji depolama işlemi için ultra kapasitör kullanılmıştır [10].



Şekil 4.11 DC bara topolojisi [10]

Bu çalışmada DC-DC konvertör için iki kontrol döngüsü içeren kontrol şeması verilmiştir. Döngünün biri DC bara gerilimini bir PI denetleyici ile istenilen değerine ayarlamaktadır. Diğer döngü ise yakıt pili akımını invertör kontrol sisteminden beslenen KOYP sistemi için ayarlanan güç değerine karşılık gelen akım seviyesine ayarlamak için kullanılmaktadır. Özellikle akım ayar noktası; güç ayar noktasının yakıt pili gerilimine oranı olduğuna dikkat edilmelidir. Burada incelenen invertör-şebeke arayüz modelinde invertör; şebekeye verilen aktif gücü ve terminal barası gerilimini ayarlamak için çalışmaktadır. Bu işlem gerilim dalga formunun faz açısına denk gelen invertör tetikleme açısının yanı sıra modülasyon indeksinin de denetlenmesiyle yapılmaktadır. İnvörtör ve şebeke senkronizasyonu faz kilitlemeli döngü kullanılarak yapılabilir. Örnek bir FKD blok diyagramı Şekil 4.12’de verilmektedir [10].



Şekil 4.12 FKD blok diyagramı [10]

Şekil 4.12'ye göre ölçülen sinüs işareti, FKD osilatör tarafından üretilen kosinüs sinyali ile karıştırılmaktadır. Burada oluşan hata sinyali filtrelenir ve gerilim kontrollü osilatöre geri besleme yapılmaktadır. İncelenen 4 baralı sistemde iki barada KOYP yapısı, bir barada sabit güçlü yük bulunmaktadır. Son bara ise sonsuz bara olarak modellenmiştir. Sabit yakıt kullanımı durumunda benzetimler yapılmıştır [10].

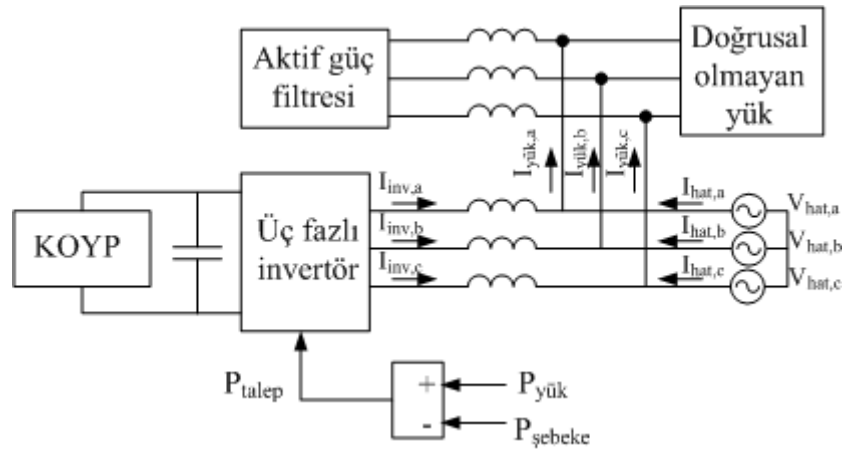
Şebeke bağlantılı durumda bir KOYP'nin dinamik davranışı incelenmiştir [74]. Özellikle yakıt pili güç sisteminin; yakıt kullanım ve güç faktörü üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Doğal gazla çalışan 100 kW'lık yakıt pili güç sistemi; gerilim kaynaklı bir invertör modeli içermektedir. Üç farklı kontrol stratejisi uygulanarak her yük seviyesinde sistem güç faktörü istenilen seviyelerde sabit tutulmuş ve yığın akımı ayarlanılmıştır [74]. Referans [59]'da fiziksel tabanlı dinamik modelini oluşturdukları 5 kW'lık KOYP'nin; dağıtılmış güç sistemi çerçevesinde, kısa-sürelili aşırı yüklenme yeteneğini inceleyen yazarlar; çalışmalarını Matlab/Simulink'te yapmışlardır. Ayrıca geçici hata koşulları altında sistem davranışı da incelenmiştir. İntertör kaynaklı harmonikler için LC filtre, arıza akımını sınırlamak için bağlama (coupling) bobini, konvertörün ve invertörün kontrolü için PI denetleyici kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda KOYP'nin; kısa-sürelili aşırı yüklenme yeteneğinin dinamik karakteristikleriyle yakından ilgili olduğu görülmüştür. Önerilen model ve kontrol teknikleriyle; sistemde meydana gelen arızalar sonunda tekrar kararlı sistem koşullarının oluştuğu belirtilmiştir. Gerilim regülasyonunu yapmak ve bununla birlikte aktif ve reaktif gücün denetiminin sağlanması için invertöre SPWM denetleyici tasarlanmıştır [11].

A. E. Auld ve ark. [12] şebeke bağlantılı durumdaki bir KOYP sisteminin sürekli ve geçici hal analizlerini gerçek deneysel veriler kullanarak Matlab ortamında analiz etmişlerdir. Bu çalışmada tek-döngü kontrol tabanlı üç fazlı yarım köprü invertör yapısı, aktif güç filtresi ve lineer olmayan yük kullanılarak analizler yapılmıştır. Bu çalışmadaki paralel aktif güç filtresi; lineer olmayan yüklerin oluşturduğu akım harmoniklerini kompanze etmek, dengesiz fazları dengelemek ve güç faktörünü 1'e yaklaştırmak için kullanılmaktadır. AGF; üç fazlı yarım köprü devre formundadır [12].

KOYP'li sistemin dinamik davranışı geçici yük değişimi koşulları altında incelenmiştir. KOYP'nin sistem içine eklenmesiyle oluşan blok diyagram Şekil 4.13'te sunulmuştur.



Bu tür bir devrede ise talep edilen güç ile üretilen güç arasında oluşacak fark, şebeke bağlantı noktasındaki akımın istenmeyen değerlere yükselmesine neden olacaktır. Sistem bir süre sonra sürekli hale ulaşsa da bu durum iyi bir yük takip davranışı değildir. Yük takip problemlerini azaltmak için invertöre bir DC kapasitör eklenilmektedir. Böylelikle sürekli hal süresince şarj olan invertör girişindeki kapasitör; geçici hal süresince de deşarj olarak KOYP gücünü tamamlayacaktır. Bir PID denetleyici yardımı ile bu kapasitör gerilimi kontrol edilmektedir. Ayrıca yakıt akışı gecikmesi de yük değişimlerine karşı KOYP'nin cevabını belirlemektedir. Çünkü oluşacak güç farkı kapasitör boyutunu belirlemektedir. Yakıt akış gecikmesi arttıkça güç talebini karşılamak için daha yüksek değerli kapasitör kullanılması gerekmektedir [12].



Şekil 4.13 DGS'ye ait blok diyagram [12]

Aynı yazarlar tarafından bir sonraki çalışmalarında KOYP'li sistemlerin şebeke üzerindeki etkilerini azaltmak ve yerel güç kalitesini artırmak için yük takip eden aktif güç filtresi önerilmektedir. Bu filtrenin sisteme entegrasyonu sistem sürekli hal davranışını düzeltmekte, gerilim çökmelerini ve adım değişimlerini azaltmaktadır [75].

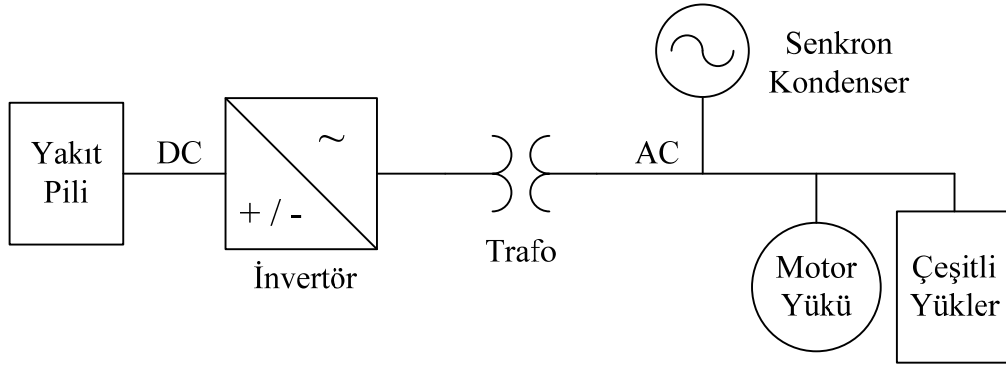
D. J. Lee ve ark. tarafından [5] çalışmalarında şebekeden bağımsız olarak çalışan yakıt pili güç sisteminde yakıt pili çıkışına bağlanan DC-DC yükseltici konvertörün sürekli iletim durumunda çalıştığını varsaymışlardır. Konvertörün hem gerilim hem de akım geri beslemeli kontrolü yapılmıştır. Gerilim kontrolü ile daha hızlı yük takibi yapılmakta, lineer olmayan faz davranışlarından sakınmak için de akım kontrolü yapılmaktadır. Denetleyici olarak PI kullanılmıştır. Matlab'ta yapılan benzetim

çalışmalarına göre önerilen algoritma ve modelin şebekeden bağımsız durumda güvenli bir şekilde çalıştığı, ani yük değişimlerini azalttığı, yük karakteristiklerinden bağımsız olduğu ve herhangi bir gerilim denetleyicisi ile kullanılabilceği belirtilmiştir [28].

F. Jurado ve ark. [13]; şebekeye bağlı, 13 baralı, 100 kW'lık bir güç sistemindeki KOYP'yi matematiksel ve dinamik olarak modellemişler ve yapısındaki invertörün vektör kontrolü (histerisiz metodu) tekniği ile kontrolünü Matlab ortamında gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmanın amacı gerilim kararlılığı, geçici hal kararlılığı ve frekans kontrolünü incelemektir. Yapılan çalışmalar sonucunda bu tür bir sistemin geçici hal kararlılığında başarılı olduğu görülmüştür. Ancak orta-dönem ve uzun-dönem gerilim kararlılığı çalışmalarında sistemin yük talebini sağlıklı bir şekilde karşılayamadığı görülmüştür [13]. Diğer bir çalışmada; modellenen bu KOYP'li güç sisteminin dış kaynaklı girişi olan özbağlanımlı tanıma algoritması (ARX) kullanılarak kontrolü ve analizi yapılmıştır. Bu algoritma ile gerçek sistem arasında oldukça iyi eşleşme olduğu görülmüştür. Ayrıca IEEE 13, IEEE 34 ve IEEE 123 baralı sistem örneklerinde seçilen baralarda meydana gelen gerilim ve güç düşümlerine karşı sistemin cevabı incelenmiş, gerilim regülatörü ve paralel kondansatörlerin de devreye eklenmesi ile bu tür sistemlerde elverişli çalışma ortamlarının elde edilebileceği belirtilmiştir [14]. Güç sistemindeki bozulmaları ve harmonikleri azaltmak için IGBT tabanlı invertörün bulanık mantık ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kullanılan metot ile histerisiz metodu da karşılaştırılmıştır. Benzetimler sonucu geliştirilen kontrol tekniği ile sistemdeki dalgalanmaların ve harmonik bozulmaların klasik histerisiz metoduna göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [76]. Aynı yazarlar bu KOYP modelini genetik bulanık mantık denetleyici kullanarak ta modellemişler ve bu tip bir denetleyicinin klasik bulanık mantık denetleyiciye göre daha iyi cevap verdiğini belirtmişlerdir [15].

KOYP'nin korozyon probleminin olmaması ve yüksek çalışma sıcaklığına sahip olması sebebiyle güç sistemi uygulamalarında tercih edilmektedirler. Genellikle PWM tabanlı gerilim kaynaklı invertörler kullanılmaktadır. Sistemin aktif ve reaktif güç denetimi invertör üzerinden yapılmaktadır. İntertörün AC tarafında; invertör tarafından üretilen harmonikleri süzmek için çoğunlukla LC filtre kullanılır. Filtre çıkışı bir eşleme (coupling) bobini ve iletim hattı üzerinden şebekeye bağlanır. Bazı durumlarda AC gerilimi yükseltmek için trafo üzerinden de bağlanmaktadır. DC konvertörün çıkışı, AC

invertörün çıkış gerilimi, frekansı, aktif/reaktif gücü ve faz açısı kontrol edilmesi gereken temel parametrelerdir [77]. Trafo üzerinden şebekeye bağlanan bir yakıt pili sisteminde trafo çıkışına STATKOM bağlanıldığı takdirde bu tür bir sistemin hem aktif güç hem de reaktif güç sağlayıcı ve ataleti olan dönen AC jeneratör şeklinde davranacağı belirtilmiştir. Şekil 4.14'te bu çalışmaya ilişkin eşdeğer devre verilmektedir. Buradaki STATKOM reaktif güç sağlayıcısı olarak çalışmaktadır [78].

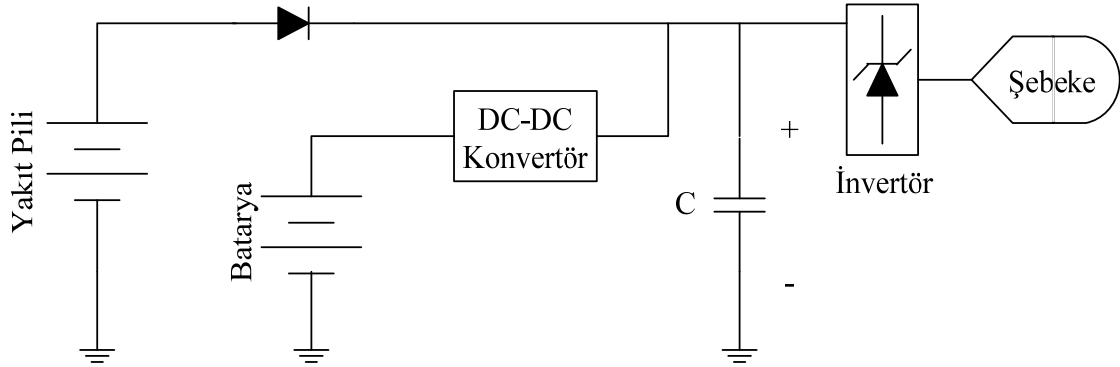


Şekil 4.14 STATKOM içeren bir yakıt pili sistemi [78]

PWM tekniğinin GTO tabanlı gerilim kaynaklı invertöre uygulanması, yakıt pilinin temel frekansta bir gerilim ile simgelenmesini sağlamaktadır. Sedghisigarchi ve ark. [25] DC-DC yükseltici konvertör kullanmadan güç düzenleme birimi elde etmişlerdir. Bu çalışmanın amacı, yakıt pili içeren dağıtım sistemlerinin dinamiklerini analiz etmek ve yakıt pilini kontrol ederek sistem kararlılığını geliştirmektir. Güç düzenleme birimi üzerinden yakıt pili kontrol döngüsü sonsuz bara kullanılarak açıklanmıştır. Daha sonra yakıt pili, başlangıçta sadece gaz türbini içeren güç dağıtım test sistemine entegre edilmiştir. Benzetim sonuçları yakıt pili ve gaz türbini kombinasyonunun frekans sapmalarının denetlenmesine ve dağıtım sisteminin çökmesinden sonra güç beslemesine nasıl yardımcı olduğunu göstermektedir. Dağıtım modeli Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Şebeke bağlantılı yakıt pili sistemi Şekil 4.15'te görüldüğü gibi yardımcı güç kaynağı veya depolama için aküye ihtiyacı olmaktadır. Akü başlangıç denetimi ile yük geçişleri ve optimum enerji kullanımı denetimi sağlanabilmektedir [25].

Güç kontrolü; hızlı yük değişimi için invertör tetikleme açısının ayarlanmasıyla yapılmaktadır. Güç kontrolü, yakıt akışı kontrolünün sağlanmasıyla da yapılabilir. Ancak, bu kontrol geniş zaman sabitine sahiptir ve geçici durum davranışını

etkilemeyecektir. Gerilim kontrolü ise konvertör çıkış büyüklüğünü etkileyen modülasyon indeksinin ayarlanmasıyla yapılmaktadır. PI denetleyici kullanılmıştır [16].



Şekil 4.15 Yakıt pili ve yardımcı kaynak [16]

E. M. Stewart ve ark. [17] kısa devre ve gerilim yükselmesi hatasının şebeke bağlantılı KOYP'nin üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Yakıt pili Matlab/Simulink'te modellenerek, çalışmalar 5 kW'lık tek fazlı ve 50 kW'lık üç fazlı sistemler için yapılmıştır. Denetleyici olarak PI kullanılmıştır. Dağıtım hattı RL olarak modellenmiştir. Geçici hal süresince yakıt pilinden çekilen güç; gerilim ve akımı maksimum ve minimum seviyelere saldırmaktadır. Bu durum yakıt pilinin ömrünü etkilemektedir ve yakıt pilinden maksimum seviyede akım çekilmesi onun konsantrasyon bölgesinde çalışmasını sağlamaktadır. Çalışma akımındaki ani değişim, yakıt pilinde kullanılan hidrojeni azaltmaktadır. Böylece kullanılmamış hidrojenin büyük bir kısmı yüzeyde kalmaktadır. Dağıtım şebekesinde gerilim yükselmesi olduğu zaman yakıt pili akımı azalırken yakıt pili gerilimi ise artmaktadır. Gerilim yükselmesi ortadan kalktığı zaman ise akımda çok küçük bir azalış ve gerilimde de artış görülecektir. Bu durumun yakıt pili üzerine etkisi çok küçüktür ve çalışma sınırları içerisinde [17].

Matlab/Simulink'te şebeke bağlantılı bir KOYP'nin geçici hal kararlılığı incelenmiştir [18]. KOYP; bir gaz türbini ile hibrit olarak bağlanmış ve farklı çıkış gücü değerlerine göre çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca bu enerji sisteminin sürekli hal analizleri de yapılmıştır. Sistemin geçici hal kararlılığını düzeltmek için güç dönüştürme birimindeki invertör için bir denetleyici tasarlanmıştır. Bu çalışmada güç dönüştürme birimi için iki önemli kontrol döngüsü üzerinde durulmuştur. İlki; hızlı geçici değişimler için invertörün tetikleme açısı ayarı ve yavaş değişimler için yakıt girişi kontrolü ile yapılan

güç kontrol döngüsüdür. Sonraki ise konvertör çıkış geriliminin büyüklüğünü etkileyen modülasyon indeksinin ayarlanması ile yapılan gerilim kontrolü döngüsüdür. Güç dönüştürme birimi PI denetleyicisi ile denetlenmektedir. Her iki kontrol döngüsünde de KOYP'li güç sisteminin geçici durumlarda oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [18].

Şebekeden bağımsız KOYP içeren bir güç sisteminde bulunan DC-DC yükseltici konvertör; bulanık mantık ile kontrol edilmiştir [7]. Burada gerilim tabanlı kontrol yapılmıştır. Güç dönüştürme biriminde yer alan invertörün şebeke bağlantılı olması durumunda akım tabanlı kontrol yapılması gerektiği belirtilmiştir. Çünkü bu durumda şebeke içerisine yük akışı olacaktır. MOSFET tabanlı konvertörün bulanık mantık ile kontrolü; sistem kararlılığını ve performansını arttırdığı gözlemlenmiştir [7].

F. Jurado ve ark. [19] şebeke bağlantılı 100 kW'lık bir KOYP sistemi içindeki invertörü Yapay Sinir Ağları tabanlı vektör kontrol stratejisi ile kontrol etmişlerdir. Matlab'ta yapılan çalışmanın amacı bu şekilde tasarlanmış bir sistemin güç kalitesi üzerine olan etkilerini incelemektir. Farklı trafo bağlantılarının yük barasında meydana getireceği arızalar ile dengesiz arızalar incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda özellikle gerilim çökmesinin (düşümü) olduğu hassas yük noktalarında bu tür sistemin başarılı olduğu görülmüştür [19].

Yardımcı güç kaynağı olarak pil gücü, ana güç kaynağı olarak KOYP içeren hibrit dağıtım sistemleri (HDS) için yenilikçi bir kontrol stratejisi önerilmiştir [20]. HDS sisteminin tüm bağlantı şekilleri verilmiş ve KOYP güç sisteminin dinamik modelleri, akü grubu ve güç elektroniği arabirimi kısaca açıklanmıştır. Güç düzenleme birimleri için denetleyici tasarım metotları ve hibrit güç sisteminden şebeke kullanıcılarına kadarki güç akışını kontrol eden yakıt pili sunulmuştur. Güç kaynakları arasındaki gücü dağıtmak için, bulanık anahtarlama denetleyicisi geliştirilmiştir. Daha sonra, DC-DC ve DC-AC dönüştürücü, giriş yakıt akışını ayarlamak ve istenilen çıkış gücü seviyesini elde etmek için Lyapunov tabanlı nöro-bulanık algoritma denetleyici tasarımı sunulmuştur. Benzetim sonuçları yük takibi ve sistemin güç yönetimi de dahil olmak üzere genel sistem performansını göstermek için verilmiştir. Aktif ve reaktif güç kontrolü yeteneğine sahip hibrit yakıt pili/akü dağıtılmış üretim sisteminin güç kontrol stratejisi ve modellenmesi verilmiştir. Hibrit yakıt pili/akü güç sistemi şebekeye DC-DC

konvertör ve üç fazlı PWM invertör ile bağlanmaktadır. HDS sistemi benzetim sonuçları, HDS sisteminden şebekeye aktif ve reaktif güç kontrolünün beklenen gibi sağlandığını göstermektedir. Talep edilen gücün değişik durumları için HDS sistemindeki çift yönlü güç kaynakları arasındaki güç yönetiminin tatminkar olduğu da sonuçlardan görülebilmektedir. Bu sistemde KOYP; termal birim içermemektedir. Bu tür denetleyici; kontrol edilemeyen büyük aşmalar ve büyük akım dalgalanmaları gibi olumsuzlukların üstesinden gelmek için kullanılmıştır [20].

S. R. Moon ve arkadaşları [79] 5 kW'lık şebeke bağlantılı bir KOYP'nin kaynak empedansının düşük frekanslı AC dalgalanmalar üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Yakıt pilinin kaynak empedansını omik kayıp olarak modellemişlerdir. Bu çalışmada dalgalanma akımı için lineerleştirilmiş AC model sunulmuş ve ilgili eşdeğer devreler verilmiştir. Dalgalanmayı azaltmak için ise ileri aktif dalgalanma kontrol tekniği; DC-DC konvertör içerisine entegre edilmiştir. Yakıt pili sistemi PI denetleyici ile denetlenmektedir. Ayrıca yükte meydana gelen geçici olaylara karşı hem açık hem de kapalı çevrim çalışma koşulları incelenmiştir. Sonuç olarak invertör tarafından üretilen düşük frekanslı akım dalgalanmalarının mutlaka sınırlanması gereklidir. Çünkü bu durum yakıt pilinin kararlılığı ile yakından alakalıdır. Deneysel olarak ta desteklenen çalışmalar göstermiştir ki küçük kaynak empedansı; yüksek akım dalgalanmasına neden olmaktadır. Kontrol metodu sayesinde akım dalgalanması miktarı ve onun kaynak empedansına bağımlılığı etkili bir şekilde azaltılmaktadır. Genel sistem kontrolü açısından bakıldığında ise ağır yük değişimlerinde sistemin kararlılığı başarılı bir şekilde sağlanmıştır [79].

S. Y. Park ve ark. tarafından [21] 5 kVA'lık şebeke bağlantılı yakıt pili invertörü için akım döngü denetleyicisi tasarımını ve admitans kompanzasyonunu göstermek için DSP tabanlı denetleyici kullanılmaktadır. Önerilen admitans kompanzasyonu ile çıkış gücü etkili biçimde sıfır komutundan tam güç komutuna kadar kontrol edilebilmektedir. Çalışmalar sonucunda; geri reaktif güç akışı kontrolü altında, DC bara geriliminin aktif güç akışını kontrol etmek için tasarlanandan daha yüksek olması gerektiği bulunmuştur. DC bara gerilimi artmadan, çıkış akımı dalga formu, fazör analiz sonuçları ile benzer olarak darbe genişlik oranı doygunluğu nedeniyle bozuk olma eğilimindedir. Admitans kompanzasyonunun eklenmesi ile düşük güç seviyelerinde hassas güç akış kontrolü sağlanmaktadır [21].

C. M. Colson ve ark. [22] şebeke bağlantılı 1 MW'lık KOYP güç sisteminin büyük ölçekli modellemesini ve denetimini sunmaktadırlar. KOYP'li güç sistemi için aktif ve reaktif güç kontrolü benzetim modeli Matlab/Simulink'te oluşturulmuştur. Denetleyici sistemi PI olarak tasarlanmıştır. Benzetim sonuçları KOYP teknolojisinin büyük güç üretim uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Sisteme KOYP kapasitesi eklemek yerine, KOYP güç sisteminin ortak DC barasına akü eklemek maliyet olarak daha uygun olabilmektedir. Pil sistemleri ani yük değişimleri süresince DC bara akımı azalmasını düşürür. Böylelikle bazı güç geçişlerinin KOYP sistemi üzerindeki baskısı azaltılmaktadır [22].

M. Uzunoğlu ve ark. [23] Statik VAr Kompanzator içeren şebekeden bağımsız bir KOYP'li güç sisteminin dinamik davranışını aktif ve reaktif güç kontrolü için incelemiştir. Akü desteği ile aktif güç yönetimi, SVC ile de reaktif güç yönetimi sağlanmıştır. Matlab/Simulink'te yapılan benzetimlerde aktif güç kontrol döngüsü sistemin sadece DC bara kısmındadır. Diğer taraftan reaktif güç yönetimi ise sistemin sadece AC bara kısmındadır. Yük terminallerindeki gerilim; invertör için tasarlanan PI denetleyici ile sabit tutulmaktadır. İki yönlü çalışan DC-DC konvertör için tasarlanan kontrol döngüsü aynı zamanda akünün şarj ve deşarjını da kontrol etmektedir. SVC yapısındaki tristörlerin denetlenmesi de PI ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda KOYP ve akü yapısı ile tüketicinin aktif güç talebi, SVC yapısı ile de reaktif güç talebi oldukça iyi bir şekilde takip edilebilmiştir. Böylece yük barasında gerilim regülasyonu işlemi de başarıyla gerçekleştirilmiştir [23].

Ren ve ark. tarafından [80]; KOYP modeli elektroliz modu ve dinamik sıcaklık değişikliklerini içermesi için genişletilmiştir. Aynı zamanda güç sistem benzetimi basit dengeli dağıtılmış, sabit frekanslı ve sabit gerilimli durumdan şebeke bağlantılı duruma genişletilmiştir. Burada farklı şebeke frekansının, gerilim genliğinin, gerilim dengesizliğinin ve gerilim harmonik bileşeninin etkisi de araştırılmıştır. Bu çalışmadaki model, terslenebilir KOYP modelidir. Burada elektroliz modundaki elektrokimyasal reaksiyon denklemlerine ihtiyaç duyulur. Bu denklemler yakıt pili durumunda kullanılanlardan düzenlenilmiştir. Eğer KOYP içerisine güç beslemesi olursa katı oksit elektroliz pili olarak ters davranmaktadır. KOYP modeli ve güç invertör blokları üç farklı kontrol şeması ile Matlab'da gerçekleştirilmiştir. Şema 1; güç akışı dalgalanmalarını azaltmaktadır fakat çıkış akımında yüksek THD oluşturmaktadır.

Şema 2; çıkış akımının THD'sini azaltmaktadır fakat daha yüksek güç akışı dalgalanmasına sahip olmaktadır. Şema 3; çok daha geniş güç akışı dalgalanması ile sonuçlanmakta ve aynı zamanda çıkış akımı üzerindeki bozulma ve dengesizliğin yüksek seviyelerine de sahip olmaktadır. Bununla birlikte bağlantı noktasındaki AC gerilimin bozulma ve dengesizliği azalmaktadır. Böylelikle, şebeke geriliminde dengesizlik ve harmoniklerin olduğu durumda DC bara güç akış dalgalanmasını azaltmanın invertör kontrolü ile mümkün olduğu gösterilmiştir. Ancak, invertörün bu durumda çalıştırılması invertör akımının harmonik bozulmalarına neden olur. İnvvertörün sinüzoidal akım durumunda çalıştırılması güç dalgalanmasını az miktarda yükseltirken akım bozulmasını önemli ölçüde azaltmaktadır [80].

Dahili dönüştürücü yapısı sayesinde KOYP'li bir güç sisteminin yük takip performansı daha iyidir. KOYP, yüksek çalışma sıcaklığına sahiptir ve kısa bir süre içerisinde yüksek sıcaklığa ulaşmaktadır. KOYP'nin bu problemini gidermek için de boru tipinde piller geliştirilmektedir [49]. Ayrıca KOYP'ler yapısında soymetalleri içermemekte, problem yaratan ve pahalı olan sıvı elektrolitler kullanmamaktadırlar [50].



## BÖLÜM V

### KATI OKSİT YAKIT PİLİ MODELİ ve GÜÇ DÜZENLEME BİRİMİNİN ENERJİ SİSTEMLERİNDEKİ UYGULAMALARI

#### 5.1 Giriş

Bu bölümde aşağıdaki çalışmalar yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmaktadır.

1. KOYP dinamik modelinin elde edilmesi ve DC yük takibinin incelenmesi
2. Güç düzenleme biriminin tasarımı ve test edilmesi
3. Sonsuz baralı KOYP'li enerji sistemi
4. Omik yüklü KOYP'li enerji sistemi
5. Zaman anahtarlama omik–endüktif yük içeren KOYP'li enerji sistemi
6. Asenkron motor bağlı KOYP'li enerji sistemi
7. Üç baralı KOYP'li enerji sistemi
8. KOYP'li enerji sisteminin klasik yöntemle kompanzasyonu
9. KOYP'li enerji sisteminin TAK ile kompanzasyonu
10. KOYP'li enerji sisteminin AC arıza durumundaki davranışının incelenmesi

İlk olarak termal dinamikler içeren yeni KOYP modeli elde edilmiştir. KOYP için gerekli parametreler literatürden elde edilmiştir. Elde edilen yakıt pili modelinin DC yük takip edebilme yeteneğini görebilmek için farklı yük çeşitlerinde çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra yakıt pili ile uyumlu olarak çalışabilecek DC–DC yükseltici konvertör modeli hem elektrik devresi hem de matematiksel olarak modellenmiştir. Konvertörün çalışma performansını görebilmek için de farklı yük çeşitleri ile çalışmalar yapılmıştır.

Son olarak ta invertör elektriksel devre olarak modellenmiş ve AC enerji sistemi uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Konvertör için denetleyici olarak PI denetleyici kullanılmıştır. İntertör için ise I ve PI denetleyicileri kullanılmıştır. Çalışmaların tamamı Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

## 5.2 KOYP Modelinin Elde Edilmesi

Bölüm II'de, literatürde yer alan yakıt pili model örnekleri verilmiştir. Yapılan literatür çalışması sonunda KOYP için model oluşturma aşamaları incelenmiş ve üretilen elektrik enerjisinin uygulamaları bazında eksiklikler olduğu görülmektedir. Yeni ve özgün KOYP modeli; literatürdeki bazı makalelerden yola çıkılarak elde edilmiştir. Çizelge 5.1'de verilmiş olduğu üzere; yakıt pili parametreleri Ref. [23, 25, 56, 58, 62]'den derlenmiştir ve omik, aktivasyon ve konsantrasyon olmak üzere bütün gerilim kayıplarını içeren bir sistem oluşturulmuştur. Yakıt dönüştürücü modülü Ref. [81]'den ikinci-dereceden transfer fonksiyonu olarak alınarak yeni KOYP modeline entegre edilmiştir. Ayrıca yeni KOYP sisteminin termal dinamikleri içermesi için Ref. [58]'den geliştirilmiş termal blok ve parametreleri derlenerek yeni sisteme uyarlanmıştır. Gerekli düzenlemeler yapılarak yeni KOYP sisteminin çalışması sağlanılmıştır.

Çizelge 5.1 KOYP parametreleri

Değişken	Değer	Referans
$P_{\text{yığın}}$	100 kW	[56]
T	Değişken	–
F	96484600 C/mol	–
R	8314.47 J/(kmol °K)	–
E	0.935 V	[25]
$N_0$	384	[56]
$K_r$	$9.9498 \cdot 10^{-7}$ kmol/(s A)	–
$K_{H_2}$	$8.43 \cdot 10^{-4}$ kmol/(s atm)	[56]
$K_{H_2O}$	$2.81 \cdot 10^{-4}$ kmol/(s atm)	[56]
$K_{O_2}$	$2.52 \cdot 10^{-3}$ kmol/(s atm)	[56]
$\tau_{H_2}$	26.1 s	[56]
$\tau_{H_2O}$	78.3 s	[56]
$\tau_{O_2}$	2.91 s	[56]
$R_{\text{int}}$	0.126 $\Omega$	[56]
$r_{H-O}$	1.145	[62]
B	$0.04777 \text{ A}^{-1}$	[23]
C	0.0136 V	[23]
$\tau_1 = \tau_3 = \tau_2$	4 s	–
CV	2	[23]
$k_3$	$1/(2 \cdot CV)$	–
$I_L$	800 A	[62]
$h_{\text{eff}}$	0.05 m	–
$\lambda_s$	27 W/(m °K)	[58]
$\eta$	0.8	[25]
$\sigma$	7800 kg/m <sup>3</sup>	[58]
t	200 s	[58]

### 5.2.1 Yakıt dönüştürücü modeli

KOYP için yakıt dönüştürücü modeli; metanolü hidrojene dönüştürmektedir. Bu model ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu olup matematiksel modeli aşağıdaki şekilde yazılabilir:

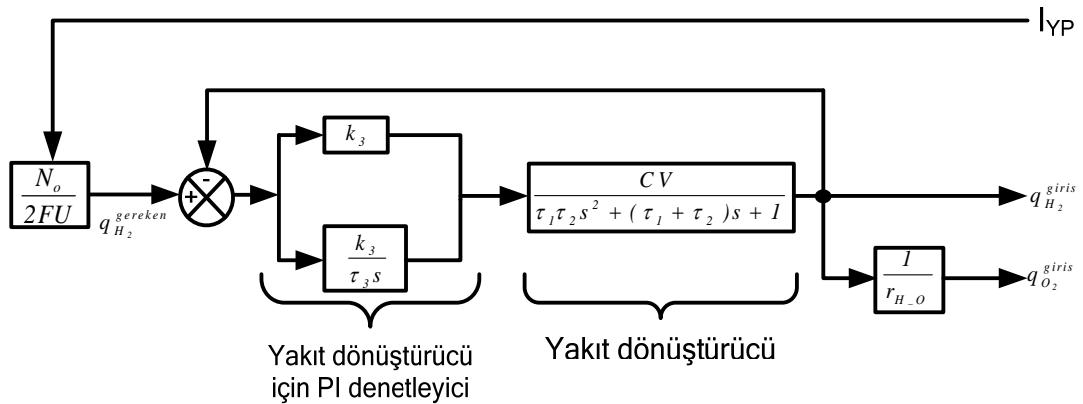
$$\frac{q_{H_2}}{q_{\text{metanol}}} = \frac{CV}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2)s + 1} \quad (5.1)$$

Burada  $q_{\text{metanol}}$ ; metanol akış hızı olup birimi kmol/s'dir. Yakıt pilinden çekilen güce göre  $H_2$  akış hızını denetlemek için yığın akımından bir geri besleme yapılmıştır. İhtiyaç duyulan  $H_2$  ve yığın akımındaki artış arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$q_{H_2}^{\text{gereklen}} = \frac{N_o I_{YP}}{2FU} \quad (5.2)$$

Yük değişimine göre gereken  $H_2$  akışı, metanol akış hızını denetlemek için kullanılabilir. Akım geri beslemeli denetleyicinin transfer fonksiyonu Eşitlik (5.3)'te verilmiştir. Yakıt dönüştürücü ve denetleyicisi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

$$q_{\text{metanol}} = \left( k_3 + \frac{k_3}{\tau_3 s} \right) \left( \frac{N_o I_{YP}}{2FU} \right) \quad (5.3)$$



Şekil 5.1 Yakıt Dönüştürücü ve denetleyici modeli [81]

### 5.2.2 Enerji denge denklemi

Yakıt pilinin çıkış gücü pil sıcaklığıyla çok yakından ilişkilidir [25]. Bir KOYP üzerindeki ısı transferleri ana olarak iletim, taşınım ve radyasyon olmak üzere üç çeşitten meydana gelmektedir [59]. Enerji denge denklemi her bir pil için aşağıdaki şekilde yazılabilir [25, 82]. Isı kapasitesi  $C_p$ 'nin katsayıları standart referans tablolarında verilmektedir [65]. Ref. [62]'de araştırmacılar değiştirilmiş termal dinamik bloğu sunmuşlardır. Bu çalışmaya göre mevcut durumdaki sıcaklık Eşitlik (5.6)'daki gibi verilebilir.

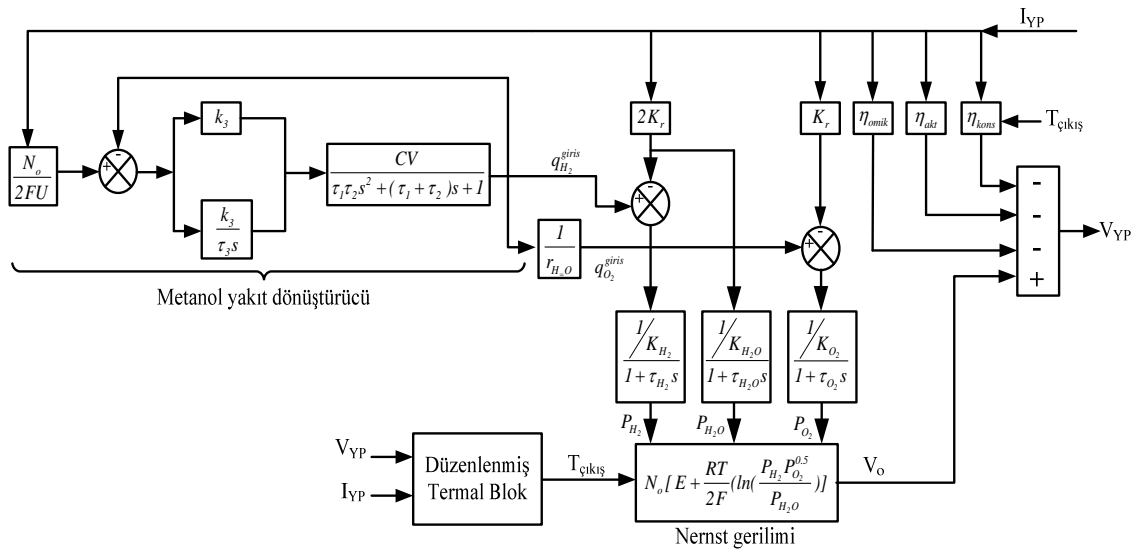
$$M_p C_p \frac{dT}{dt} = q_e V_e + \sum Q_i \quad (5.4)$$

$$C_{p,i} = a_i + b_i T + c_i T^2 \quad (5.5)$$

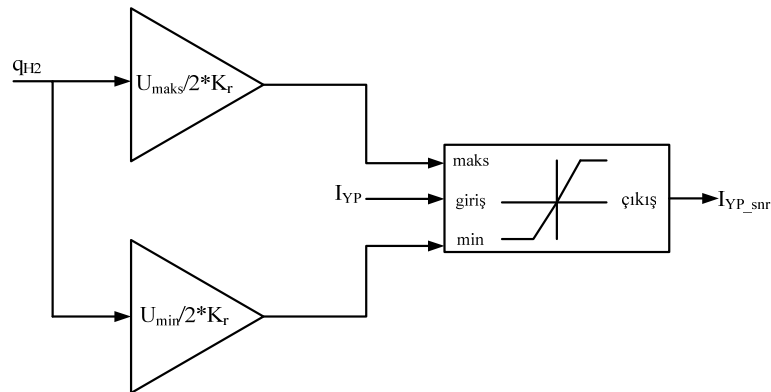
$$T_{cikis} = T + \left( \frac{T_{giris} + \Delta T - T}{t} \right) dt \quad (5.6)$$

Yeni elde edilen KOYP sistemine bu termal birim başarılı bir şekilde uyarlanmıştır. Bu durumda elde edilen yeni dinamik model Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Yakıt dönüşümü akım geri beslemeli denetime göre çalışmaktadır ve bu akım sınırlandırılmıştır. Ancak, bu modelde yakıt kullanım faktörü ayar değeri 0.85'tir ve herhangi bir sınırlama söz konusu değildir. Yakıt kullanımı sınırlandırılmadığı sürece yığın gücü de tam olarak sınırlandırılmamaktadır. Bu sebeple; Şekil 5.3'te verilen yakıt kullanım faktörü temelli akım sınırlama bloğu yakıt pili sistemine eklenmiştir. Bu bloğa yığın geri besleme akımı giriş olarak verilmektedir. Yakıt kullanım faktörünün minimum ve maksimum değerleri ile sınırlandırılmakta ve çıkış olarak elde edilen akım tüm model bloklarına giriş olarak verilmektedir. Böylelikle yakıt kullanımı da sınırlandırılmış olmaktadır. Yığın gerilimi; geri besleme akımı ve sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan dolayı 280 V–330 V aralığında sınırlandırılmıştır. Çünkü yakıt pili yığın gerilimi belli bir değer altına düştüğü ve sistem bu durumda akım çeken bir yüke bağlı olduğu zaman anot malzemeleri oksitlenebilir. Bu durum ilk önce yakıt azalması ile devam eder, fakat bu tip tekrarlanan tepkimeler yakıt pili anoduna ciddi bir

şekilde zarar verebilir. Dolayısıyla anot oksidasyonlarını önlemek için etkin bir gerilim denetimi yapılmalıdır [45].



Şekil 5.2 Yeni KOYP dinamik sistemi

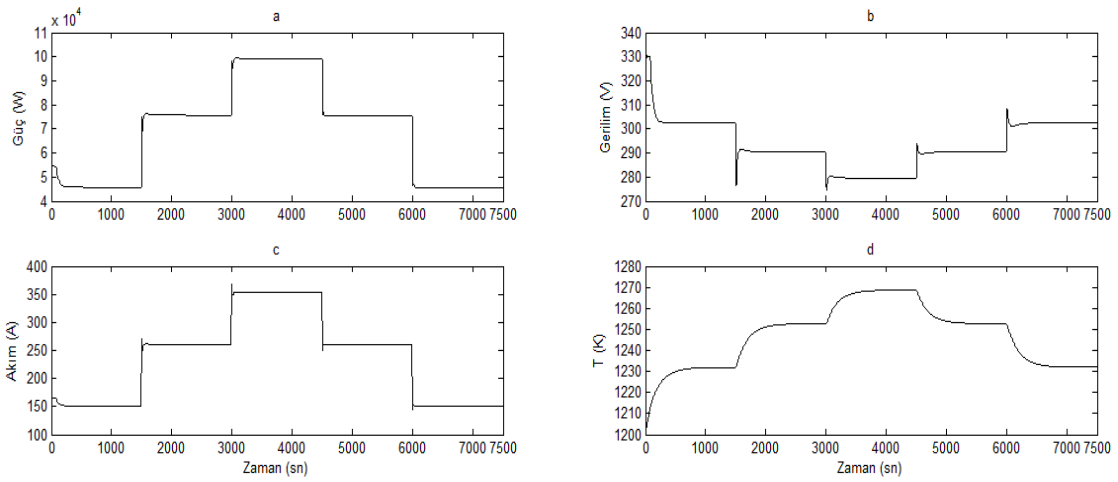


Şekil 5.3 Yeni KOYP dinamik sistemine eklenilecek yakıt sınırlama bloğu

### 5.3 KOYP'nin DC Yük Takip Testi

Önerilen KOYP dinamik modelinin yükteki adım değişimler ile DC testi yapılmıştır. Yük gücündeki adım değişimler, sistemin yük takip edebilme yeteneğinin testi için gereklidir. Bu çalışmada yakıt sınırlama bloğu bulunmamaktadır. Çıkış gücündeki, akımındaki, gerilimindeki ve sıcaklığındaki değişimler Şekil 5.4.a-d'de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları 7500 sn süresince elde edilmiştir. DC sistem için KOYP'nin çıkış gücü dalga formu Şekil 5.4.a'dan görülebilir. Şekil 5.4.b ise sistemin yığın gerilimindeki değişimleri göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere; yığın

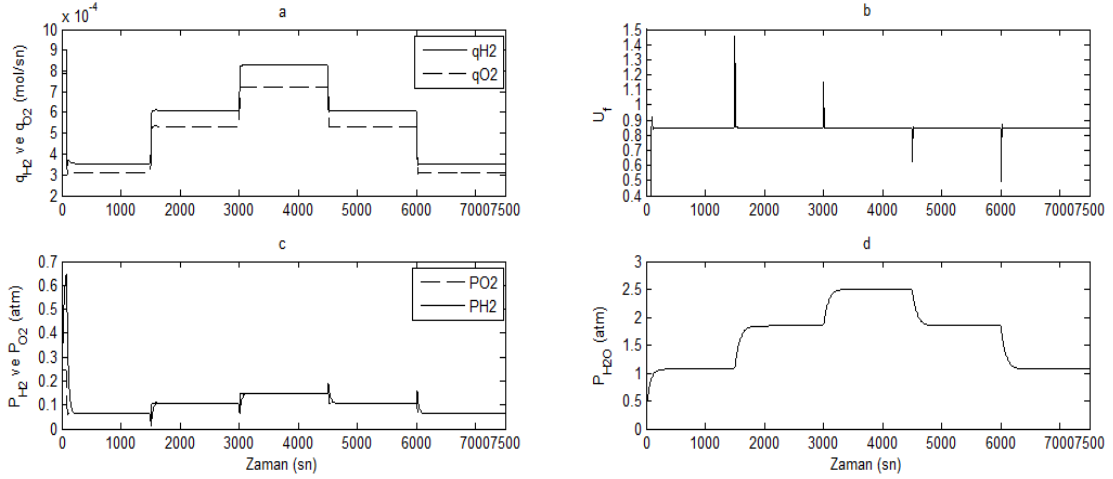
gerilimi 1500 sn aralıklarla 302 V–290 V–280 V–290 V–302 V seviyelerinde adım değişimleri ile değişmektedir. Şekil 5.4.c'ye göre yük akımındaki artış KOYP'nin çıkış geriliminde düşüşe neden olmaktadır. Önerilen KOYP dinamik modelinin sıcaklık cevabı ise Şekil 5.4.d'de verilmektedir. Yığın sıcaklığı 1200 °K (927 °C) ve 1270 °K (997 °C) arasında değişmektedir. Yakıt pilinin sıcaklığı yük akımı arttığı zaman artmakta, azaldığı zaman azalmaktadır. Bu şekle göre de dinamik sistem yük akım değişimlerini takip edebilmektedir. Bu sonuca göre, Ref. [58]'de tasarlanan termal dinamik biriminin yeni geliştirilen KOYP sistemine başarılı bir şekilde uyarlandığı söylenebilir.



Şekil 5.4 KOYP yığın niceliklerindeki adım değişimler a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık

Şekil 5.5.a'da görüldüğü gibi, H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> akış hızı yük gücündeki değişimleri takip edebilmektedir. H<sub>2</sub> akış hızı 1500 sn aralıklarla 0.36–0.61–0.84–0.61–0.36 mol/s seviyelerinde adım değişimleri ile değişmektedir. Böylece, yakıt dönüştürücü modelinin ikinci–dereceden fonksiyon olarak kullanılması yumuşak bir yük takibi sağlamaktadır. Şekil 5.5.b ise sistemin yakıt kullanım faktörünü göstermektedir. U<sub>f</sub>=0.85 olduğu için yakıt dönüştürücü sisteminin bu değere göre üretim yapması gerekmektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere; yük değişimleri olmasına rağmen 0.85 değeri elde edilmiştir. Yüklerin anahtarlandığı anda meydana gelen yaklaşık 0.5–1.5 arasında değişen sıçrama değerleri kısa sürelidir. Ancak anlık olarak bile U<sub>f</sub>'nin 0.8–0.9 aralığından çıkması yakıt pili fiziksel sistemine de zarar vermekte ve aşırı yakıt kullanımına yol açmaktadır. Bu sebeple yakıt kullanım faktörü sınırlandırılmalıdır. KOYP yığınınındaki H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basınçlarındaki değişimler Şekil 5.5.c'de verilmiştir.

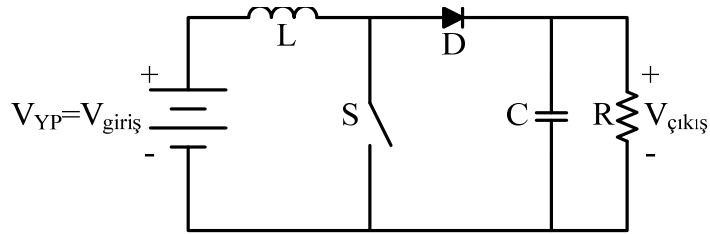
H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basınçlarının değişimi birbirine çok yakın olup DC yük değişimleri takip edilebilmiştir. Şekil 5.5.d'deki H<sub>2</sub>O kısmi basıncından da yük takibi açıkça görülmektedir. Sonuç olarak; yığın gerilimi hariç diğer nicelikler yük gücü ile orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 5.5 KOYP yığın niceliklerindeki adım değişimler a–H<sub>2</sub>–O<sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H<sub>2</sub>–O<sub>2</sub> kısmi basınçları d–H<sub>2</sub>O kısmi basıncı

#### 5.4 Güç Düzenleme Birimine Ait Matlab/Simulink Modeli

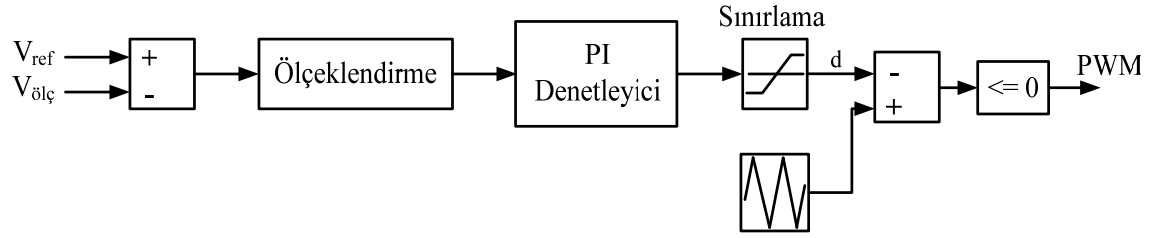
Şekil 5.6’da temel bir DC–DC yükseltici konvertör devresi verilmiştir. Bu konvertör için giriş gerilimi yakıt pilinden verilmekte ve 280 V ile 330 V arasında değişmektedir. L=4100 µH ve C=11000 µF olarak belirlenmiştir. Yarı iletken anahtar olarak IGBT kullanılmıştır. IGBT ve diyot elemanlarının yükseltici konvertör içerisinde sırasıyla devreye girmesiyle çıkışta yaklaşık 400 V<sub>DC</sub> gerilim elde edilmektedir.



Şekil 5.6 Temel DC–DC yükseltici konvertör devresi

Konvertör giriş ve çıkış işaretleri DC olduğundan dolayı klasik PWM tekniği ile denetleyici tasarımı yapılmıştır. PI denetleyici katsayıları K<sub>p</sub>=0.2 ve K<sub>i</sub>=20 şeklindedir.

Şekil 5.7'de DC–DC yükseltici konvertör için tasarlanılan denetleyici yapısı verilmektedir.



Şekil 5.7 DC–DC yükseltici konvertör için denetleyici yapısı

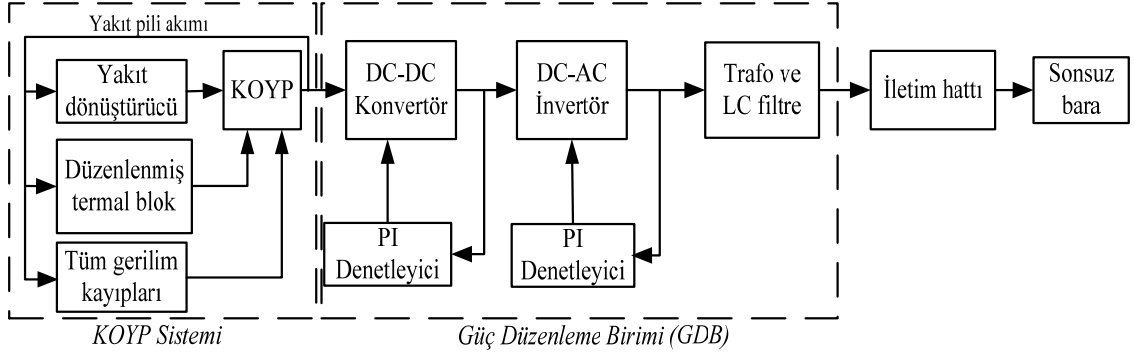
Konvertör çıkışındaki DC gerilim üç fazlı invertörün girişine uygulanarak yük için gerekli olan AC gerilim elde edilmektedir. İntertör yapısında elektronik anahtar olarak IGBT ve tetikleyici olarak PWM jeneratör kullanılmış olup kullanılan teknik SPWM tekniğidir. PI denetleyici katsayıları ise sırasıyla  $K_p=1$  ve  $K_i=22$  şeklindedir. DC işaret PWM ile kısıldığından dolayı invertör çıkışındaki sinyalin her bir saykılı kare dalga görünümündedir. İntertör çıkışındaki dalga şeklini sinüzoidal forma dönüştürmek için üç fazlı 220/400 voltluk trafo kullanılmıştır. Aynı zamanda, trafo GDB ve AC sistem arasında yalıtım sağlamaktadır. GDB; DC–DC yükseltici konvertör, DC–AC invertör ve onların denetleyicilerinden meydana gelmektedir. Böylelikle yakıt pili sistemi için temel bir güç düzenleme birimi modellenmiş olmaktadır.

#### 5.4.1 KOYP'nin AC sistem testi

##### 5.4.1.1 Sonsuz bara bağlı KOYP'li enerji sistemi

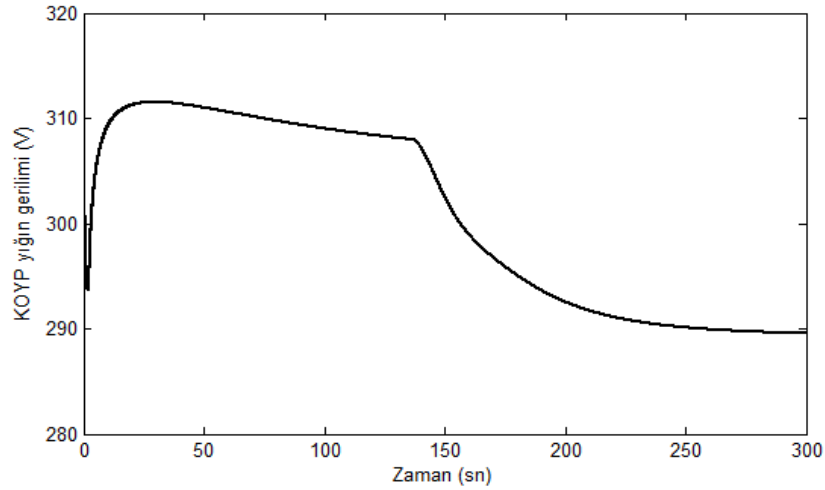
Bu benzetim çalışması için, temel GDB elektrik devresi olarak tasarlanılmıştır. KOYP modelinin AC testi için sisteme sonsuz bara bağlanılmıştır. Sonsuz baranın gerilim ve frekans karakteristikleri herhangi bir değişimle değişmemektedir. LC filtre; harmonikleri azaltmak için trafo ve iletim hattı arasına bağlanılmaktadır. 3 km uzunluğundaki iletim hattından sonra da 400 V ve 50 Hz parametrelerine sahip sonsuz bara hattın sonuna bağlanılmıştır. Burada dikkat edilmelidir ki benzetimi yapılan AC sistem herhangi bir yük birimi içermemektedir. Sonsuz baralı AC sisteme ait blok diyagram Şekil 5.8'de verilmiştir.





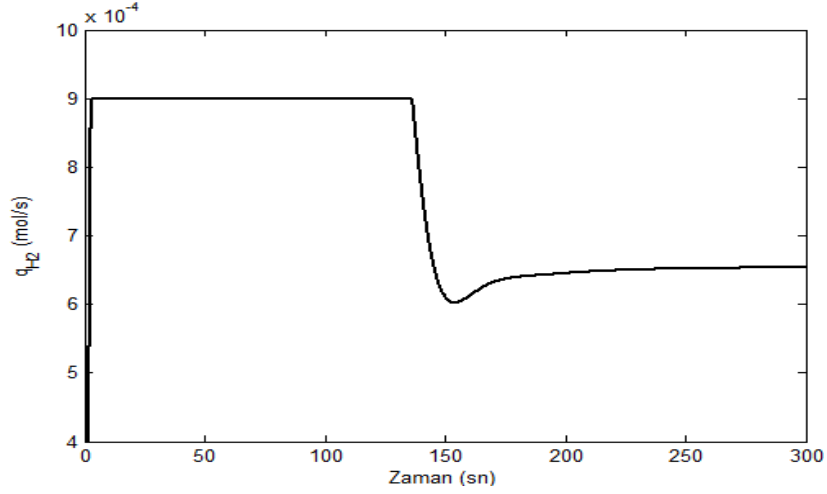
Şekil 5.8 Sonsuz bara bağlı KOYP'li enerji sistemi

KOYP yığın gerilimi,  $H_2$  akış hızı, DC-DC yükseltici konvertör çıkış gerilimi ve onun darbe genişlik oranı, DC-AC invertör için modülasyon indeksi ve son olarak iletim hattının faz-faz rms gerilimi Şekil 5.9 ve Şekil 5.14 arasında verilmektedir. Benzetim sonuçları 300 sn süresince elde edilmiştir.



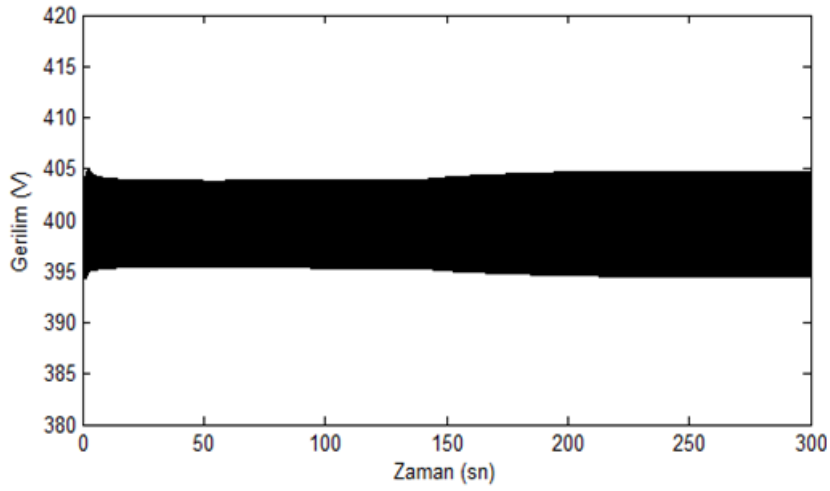
Şekil 5.9 Sonsuz baralı sistem için KOYP yığın gerilimi

Şekil 5.9 ve 5.10'dan görüldüğü gibi, yakıt pili sisteminin çıkış gerilimi ve  $H_2$  akış hızı sırasıyla 350 V ve 0.9 mol/s olarak elde edilmiştir. Çalışılan enerji sistemi herhangi bir AC yük içermemektedir.

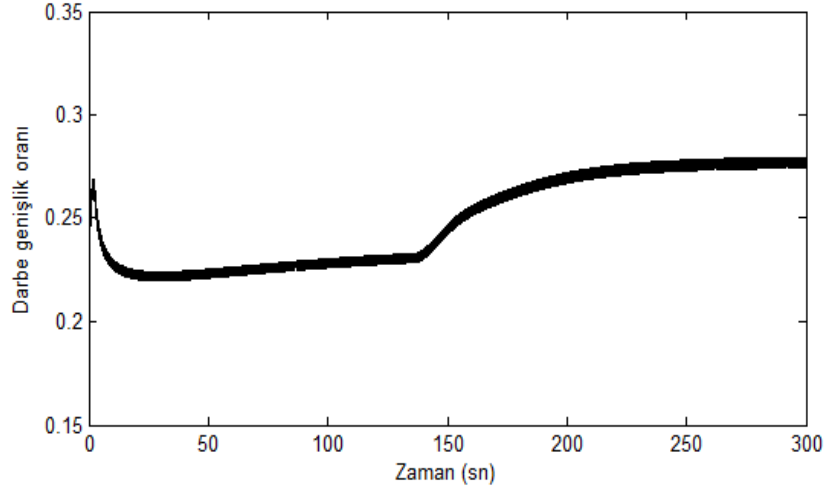


Şekil 5.10 Sonsuz baralı sistem için KOYP yığının H<sub>2</sub> akış hızı

KOYP sisteminin regüle edilmemiş çıkış gerilimi yükseltici konvertöre verilmektedir. Regüledi bir DC gerilimin istenilen değeri darbe genişlik oranı ayarlanılarak elde edilmektedir. Şekil 5.11 ve 5.12'ye göre çıkış gerilimi darbe genişlik oranına bağlı olarak artmaktadır. Gerilim üzerindeki dalgalanma miktarı %1.25'tir. Konvertörün cevap hızı yakıt pili yığın çıkış gerilimi ile karşılaştırıldığında oldukça kısadır.

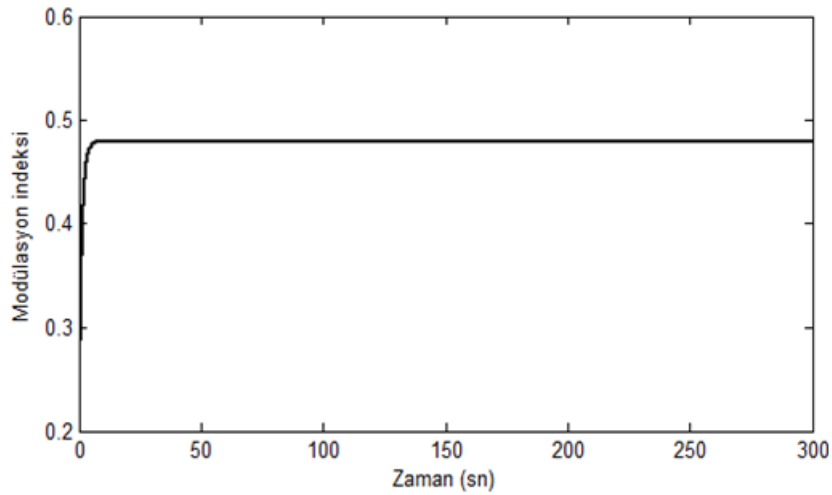


Şekil 5.11 DC-DC yükseltici konvertör çıkış gerilimi



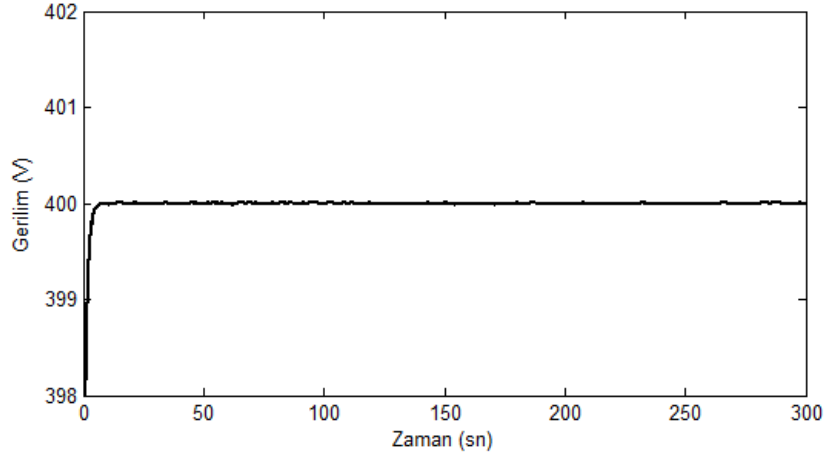
Şekil 5.12 DC–DC yükseltici konvertörün darbe genişlik oranı

İnvertörün giriş ve çıkış gerilimleri ortalama olarak sırasıyla  $400 V_{DC}$  and  $220 V_{rms}$ 'tir. İnvertörün modülasyon indeksi ayarlanılarak AC çıkış gerilimi istenilen değerde tutulabilir. Şekil 5.13'te verilen modülasyon indeksi yaklaşık olarak 5 saniyede sürekli hal değerine ulaşmaktadır. Bunun sonucu olarak, invertörün PI denetleyicisinin cevap hızı bu tür bir enerji sistemi için oldukça iyidir. Burada, trafo ve filtre de GDB ile birlikte düşünülmelidir. Çünkü invertörün çıkışı darbeli kare dalga formundadır ve bu çıkış işareti trafo aracılığıyla sinüzoidal ve istenilen genlikte olan bir sinyale dönüştürülmektedir. LC filtre istenmeyen dalgalanmalardan arındırılmış sinüzoidal form elde etmek için kullanılmaktadır.

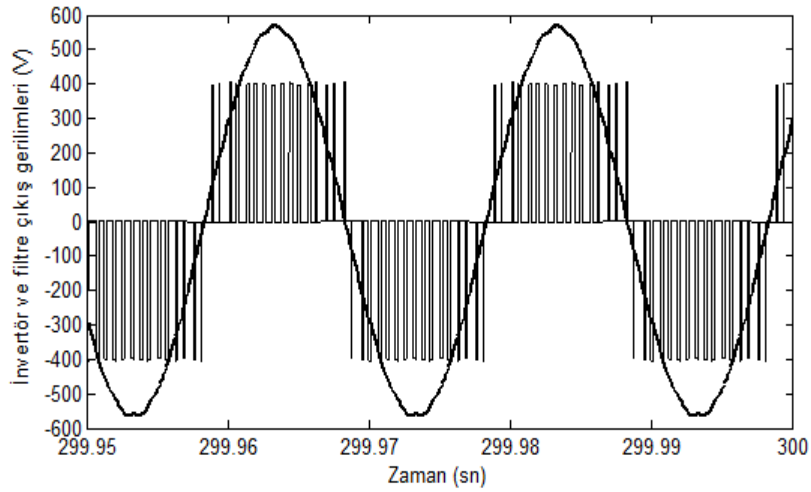


Şekil 5.13 DC–AC invertörün modülasyon indeksi

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi filtrenin çıkışı ile iletim hattının başı aynı noktadır. Şekil 5.14'e göre bu noktadaki gerilim 2.5 sn civarında 400 Vrms'lik istenilen değere ulaşmaktadır. Son olarak Şekil 5.15 ile GDB ve şebeke arasında senkronizasyonun sağlandığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5.14 İletim hattının faz-faz rms gerilimi

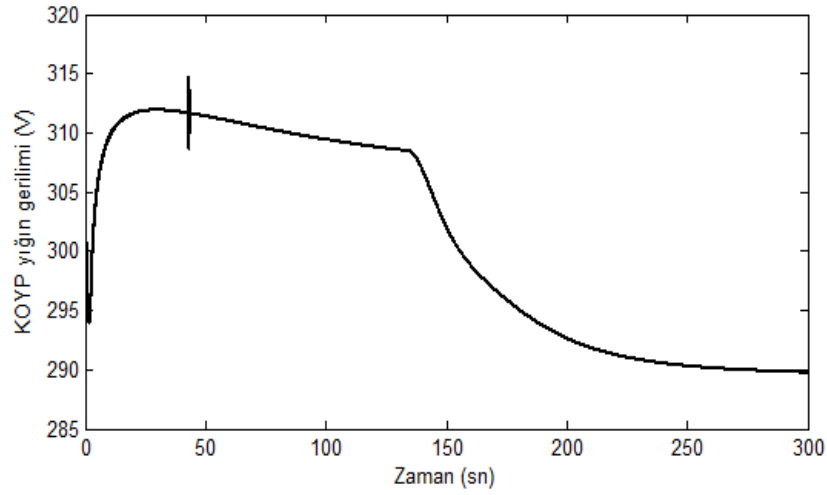


Şekil 5.15 İnvörtör ve filtre çıkış gerilimleri

#### 5.4.1.2 AC omik yüklü KOYP'li enerji sistemi

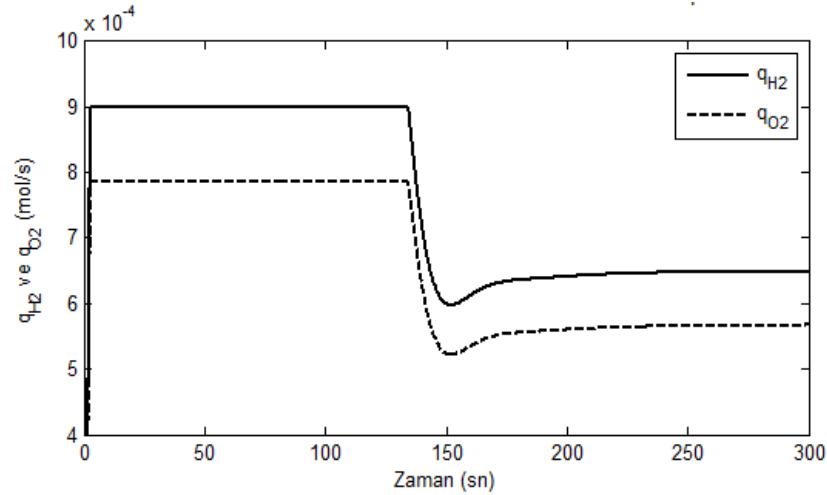
Bu bölümde; önerilen KOYP modeli omik yüklü AC enerji sistemi üzerinde test edilmiştir. Bu çalışma için 200 W'lık yıldız bağlı omik yük kullanılmıştır. KOYP çıkış gerilimindeki,  $H_2-O_2$  akış hızındaki, yığın sıcaklığındaki ve yük gerilimindeki değişimler Şekil 5.16 ve Şekil 5.19 aralığında gösterilmektedir. Şekil 5.16'ya göre, AC

omik yüklü sistem için 250 sn'lik geçici hal süresinden sonra KOYP yığın gerilimi 290  $V_{DC}$  değerine ulaşmıştır.

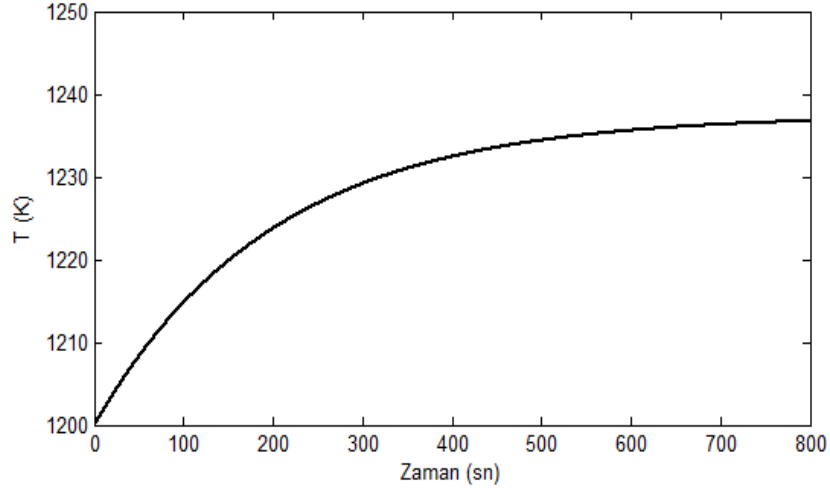


Şekil 5.16 AC yüklü sistem için KOYP yığın gerilimi

Şekil 5.17'de  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı sürekli hal değeri olan 0.65 mol/sn ve 0.57 mol/sn değerlerine yaklaşık 175 s sonra ulaşmıştır. Şekil 5.18'e göre yığın sıcaklığı 800 sn sonunda 1237 °K olarak elde edilmiştir. Bu genlik ve zaman değerleri literatürle karşılaştırıldığı zaman beklenen sonuçlardır.

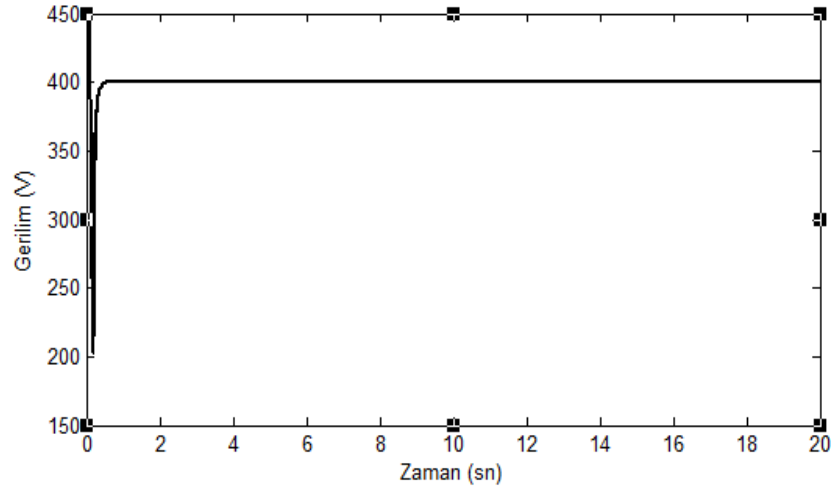


Şekil 5.17 AC yüklü sistem için  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı



Şekil 5.18 AC yüklü sistem için yığın sıcaklığı

Son olarak yük barası rms gerilimi  $400 V_{AC}$  olarak ölçülmüştür ve çıkış gerilimi herhangi bir dalgalanma içermemektedir. Bundan dolayı; sistem için uygun bir GDB elde edildiği söylenebilir ve AC omik yük için nominal çalışma koşulları başarılı bir şekilde elde edilmiştir.



Şekil 5.19 AC yüklü sistem için yük barası gerilimi

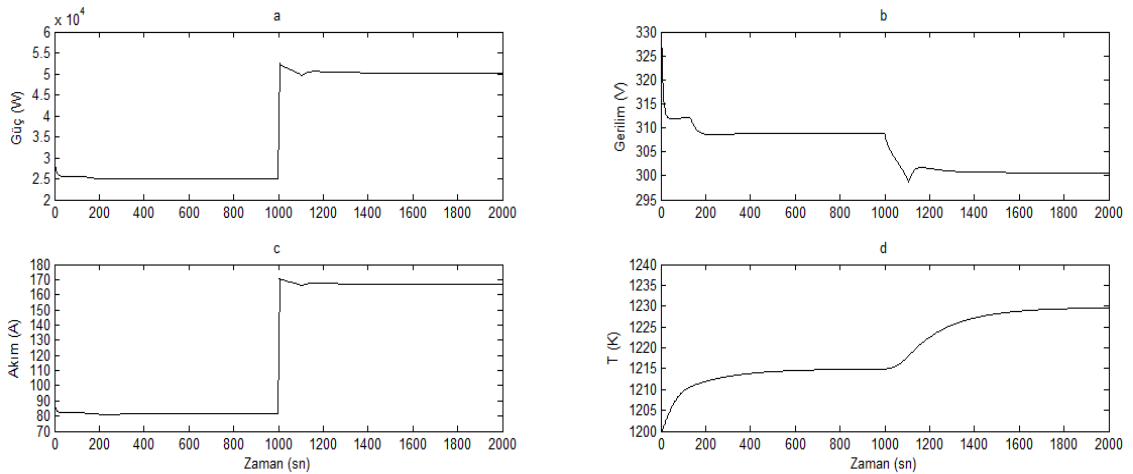
### 5.5 $U_f$ Sınırlamalı KOYP'nin DC Yük Takip Testi

Bölüm 5.4'te verilen KOYP modeli yakıt kullanım faktörü sınırlaması içermemektedir. Yakıt dönüştürücü bloğunun denetleyicisi;  $U_f$  için en uygun değer olan 0.85 değerine ulaşmak için tasarlanılmıştır. Bu bölümde ise KOYP sisteminin bu özelliklerinin yanı sıra yakıt kullanım faktörü temelli olarak geri besleme akımı sınırlandırılmaktadır.

Yığın gerilimi de sınırlı olduğu için yığın çıkış gücü de sınırlanmış olmaktadır. Bölüm 5.5.1'de son olarak elde edilen KOYP modelinin farklı yük tiplerindeki davranışı incelenecektir.

### 5.5.1 KOYP modelinin adım yük analizi

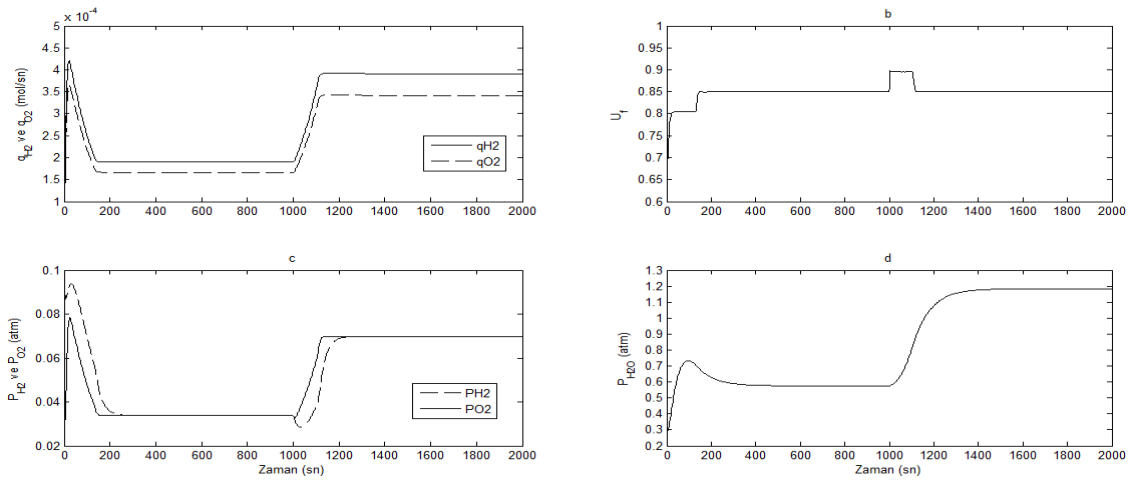
Önerilen yakıt kullanım faktörü sınırlamalı KOYP dinamik modelinin DC yük takip edebilme yeteneğinin testi için adım yük tipi kullanılmıştır. Çıkış gücündeki, gerilimindeki, akımındaki ve sıcaklığındaki değişimler Şekil 5.20.a–d'de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları 2000 sn süresince elde edilmiştir. Şekil 5.20.a'ya göre sistemde ilk 1000 sn süresince 25 kW'lık ve ikinci 1000 sn süresince de 50 kW'lık omik yük bulunmaktadır. Şekil 5.20.b ise sistemin yığın gerilimindeki değişimleri göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere; yığın gerilimi 1000 sn aralıkla 308 V–300 V seviyelerinde adım değişim ile değişmektedir. Bu güç değerlerindeki bir yük için elde edilen KOYP yığın çıkış akımı dalga formu Şekil 5.20.c'den görülebilir. Son olarak; KOYP dinamik modelinin sıcaklık cevabı ise Şekil 5.20.d'de verilmektedir. Yığın sıcaklığı 1200 °K ve 1235 °K arasında değişmektedir. Yakıt pilinin sıcaklığı yük akımının artmasıyla artmakta, azalmasıyla da azalmaktadır. Yığın sıcaklığının geçici hal süresi diğer yığın niceliklerine göre daha fazladır. Bu şekle göre de yakıt pili dinamik sistemi yük gücü değişimlerini takip edebilmektedir.



Şekil 5.20 Adım yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık

Şekil 5.21.a–d'de H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> akış hızındaki, yakıt kullanım faktöründeki ve H<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O–O<sub>2</sub> kısmi basınçlarındaki değişimler görülmektedir. Şekil 5.21.a'da görüldüğü gibi, H<sub>2</sub> ve

O<sub>2</sub> akış hızı yük güç değişimlerini takip edebilmektedir. Böylece, yakıt dönüştürücü modelinin ikinci-dereceden fonksiyon olarak kullanılması yumuşak bir yük takibi sağlamaktadır. Şekil 5.21.b'de görüldüğü gibi yakıt kullanım faktörü yaklaşık 180 sn'lik geçici hal süresince 0.8, ikinci yük anahtarlanana kadar geçen süre içinde olması gereken 0.85, 50 kW'lık yükün devreye girmesinden sonraki yaklaşık 150 sn'lik süre içerisinde 0.9 ve son olarak geçici hal bittikten sonra tekrar olması gereken 0.85 değerine ulaşılmıştır. Bir önceki modele göre burada dikkat edilmesi gereken yükün artması durumundaki yakıt kullanım faktörü değerinin 0.9 ile sınırlandırılabilmiş olmasıdır. Son olarak Şekil 5.21.c'de adım tipi yük için H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basınçları verilmiştir. Bu şekle göre, H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basınçlarının değişimi birbirine çok yakın olup DC yük değişimleri takip edilebilmiştir. H<sub>2</sub>O kısmi basıncından da yük takibi açıkça görülmektedir.



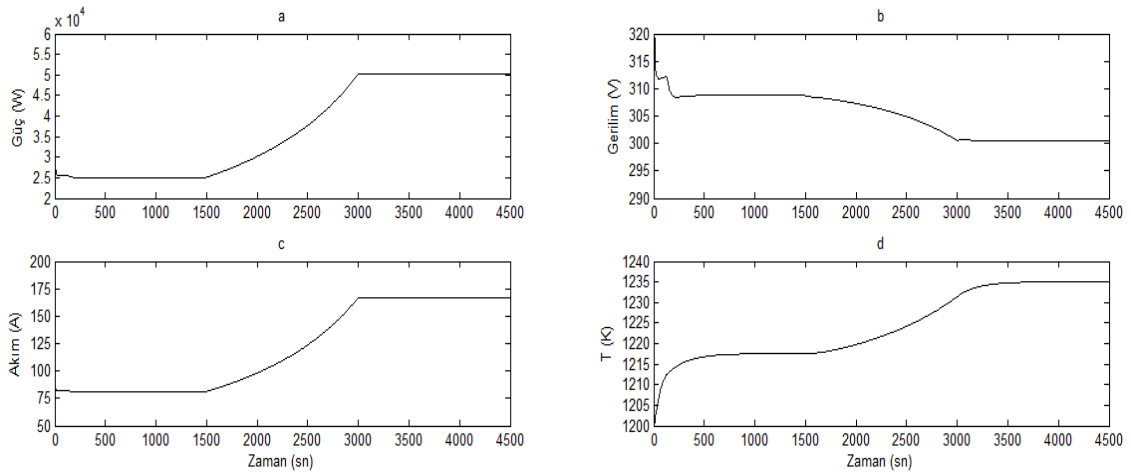
Şekil 5.21 Adım yük için KOYP yığın nicelikleri a–H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basınçları d–H<sub>2</sub>O kısmi basıncı

### 5.5.2 KOYP modelinin rampa yük analizi

Önerilen son KOYP dinamik modelinin DC yük takip edebilme yeteneğinin testi için rampa yük tipi kullanılmıştır. Yığın çıkış gücündeki, gerilimindeki, akımındaki ve sıcaklığındaki değişimler Şekil 5.22.a–d'de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları 4500 sn süresince elde edilmiştir. Şekil 5.22.a'ya göre sistemde ilk 1500 sn süresince 25 kW'lık, ikinci 1500 sn süresince son 1500 sn süresince ulaşılacak istenilen yük güç değerine ulaşılması durumu ve son kısımda da 50 kW'lık omik yük bulunmaktadır. Şekil 5.22.b ise sistemin yığın gerilimindeki değişimleri göstermektedir. Bu şekilden de

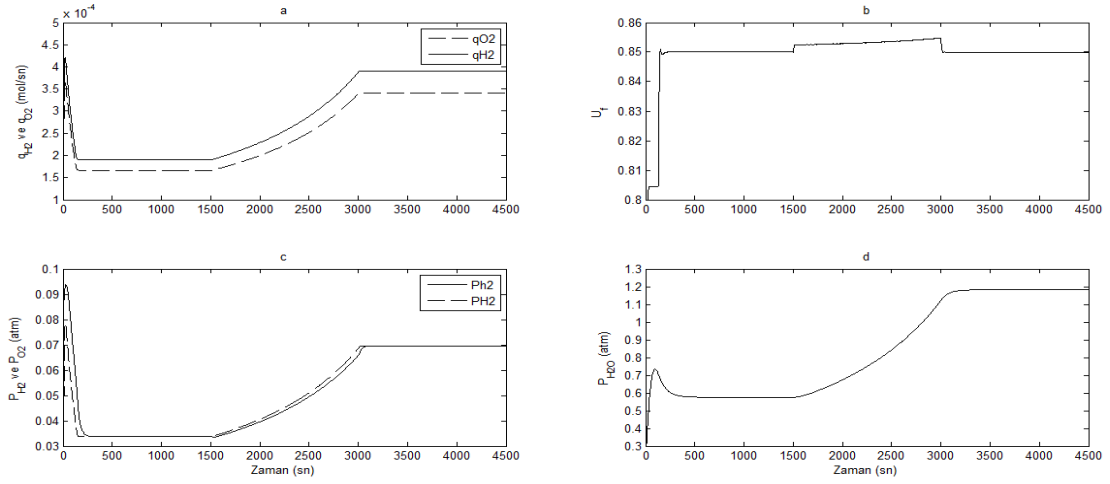


görüldüğü üzere; yığın gerilimi 1500 sn aralıklarla yaklaşık olarak 308 V–300 V seviyelerinde değişmektedir. Bu güç formuna sahip bir yük için KOYP'nin çıkış akımı dalga formu Şekil 5.22.c'den görülebilir. Son KOYP dinamik modelinin sıcaklık cevabı ise Şekil 5.22.d'de verilmektedir. Yığın sıcaklığı 1200 °K (927 °C) ve 1235 °K (962 °C) arasında değişmektedir. Yakıt pilinin sıcaklığı yük akımının artmasıyla artmakta, azalmasıyla da azalmaktadır. Bu şekilde göre de yakıt pili dinamik sistemi yük gücü değişimlerini takip edebilmektedir.



Şekil 5.22 Rampa yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık

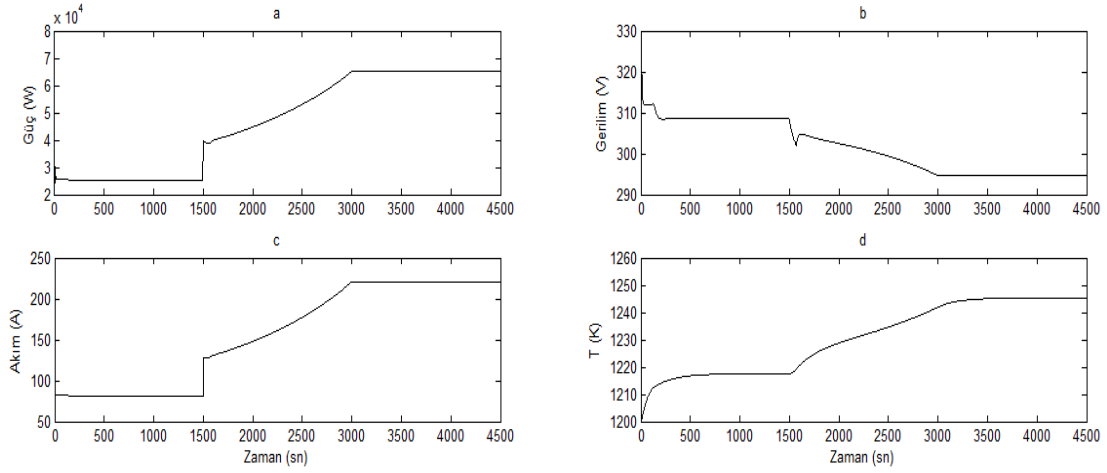
Şekil 5.23.a–d'de  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızındaki, yakıt kullanım faktöründeki ve  $H_2$ – $H_2O$ – $O_2$  kısmi basınçlarındaki değişimler görülmektedir. Şekil 5.23.a'da görüldüğü gibi,  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı yük güç değişimlerini takip edebilmektedir. Bütün bu şekillerden rampa değişimin etkisi açıkça görülebilmektedir. Şekil 5.23.b'de görüldüğü gibi yakıt kullanım faktörü yaklaşık 180 sn'lik geçici hal süresince 0.8, ikinci yük anahtarlanana kadar geçen süre içinde olması gereken 0.85, 3000 sn'den sonra tekrar olması gereken 0.85 değerine ulaşmıştır. Rampa yükte adım tipi yüke göre geçici hal süresinin daha az olduğu görülmektedir. Çünkü yük değişimi ani olarak yapılmamakta ve yakıt pili sistemi diğer yük seviyesine yavaşça hazırlanmaktadır. Son olarak Şekil 5.23.c'de rampa tipi yük için  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçları verilmiştir. Bu şekilde göre,  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçlarının değişimi birbirine çok yakın olup DC yük değişimleri takip edilebilmiştir.  $H_2O$  kısmi basıncından da yük takibi açıkça görülmektedir.



Şekil 5.23 Rampa yük için KOYP yığın nicelikleri a–H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c–H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basınçları d–H<sub>2</sub>O kısmi basıncı

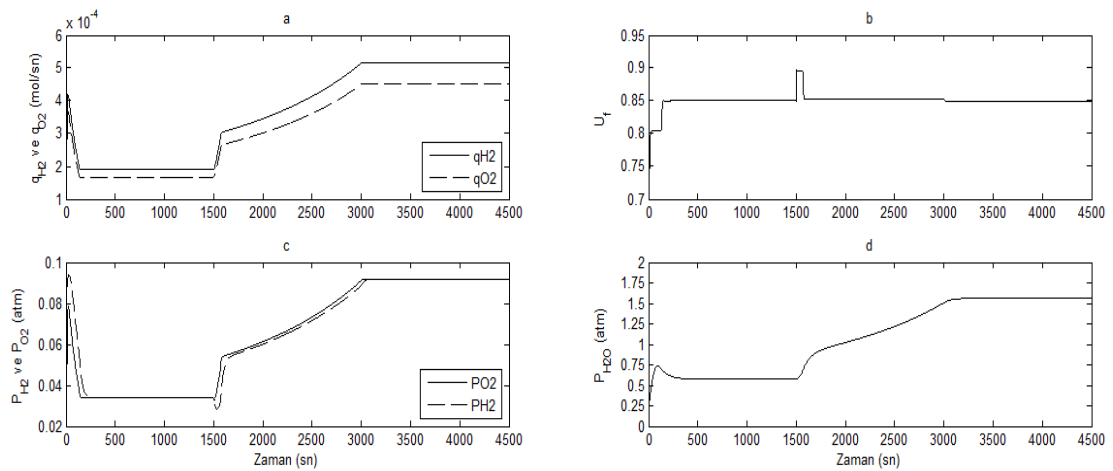
### 5.5.3 KOYP modelinin karma yük analizi

Bu uygulamada; yakıt kullanım faktörü sınırlamalı KOYP dinamik modelinin DC yük takip edebilme yeteneğinin testi için karma yük tipi kullanılmıştır. Yığın çıkış gücündeki, gerilimindeki, akımındaki ve sıcaklığındaki değişimler Şekil 5.24.a–d'de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları 4500 sn süresince elde edilmiştir. Şekil 5.24.a'ya göre sistemde ilk 1500 sn süresince 25 kW'lık, ikinci 1500 sn süresinin başında 40 kW'a ani bir anahtarlama ve sonraki 1500 sn süresince ulaşılmak istenilen yük güç değerine ulaşılması durumu ve son kısımda da 65 kW'lık omik yük bulunmaktadır. Şekil 5.24.b ise sistemin yığın gerilimindeki değişimleri göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere; yığın gerilimi ilk 1500 sn süresince 308 V, anahtarlama esnasında 301 V ve 65 kW'lık yük için de 295 V seviyelerinde değişmektedir. Bu güç formuna sahip bir yük için KOYP'nin çıkış akımı dalga formu Şekil 5.24.c'den görülebilir. KOYP dinamik modelinin sıcaklık cevabı ise Şekil 5.24.d'de verilmektedir. Yığın sıcaklığı 1200 °K (927 °C) ve 1245 °K (972 °C) arasında değişmektedir. Yakıt pilinin sıcaklığı yük akımının artmasıyla artmakta, azalmasıyla da azalmaktadır. Bu şekle göre de yakıt pili dinamik sistemi yük gücündeki değişimleri takip edebilmektedir.



Şekil 5.24 Karma yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık

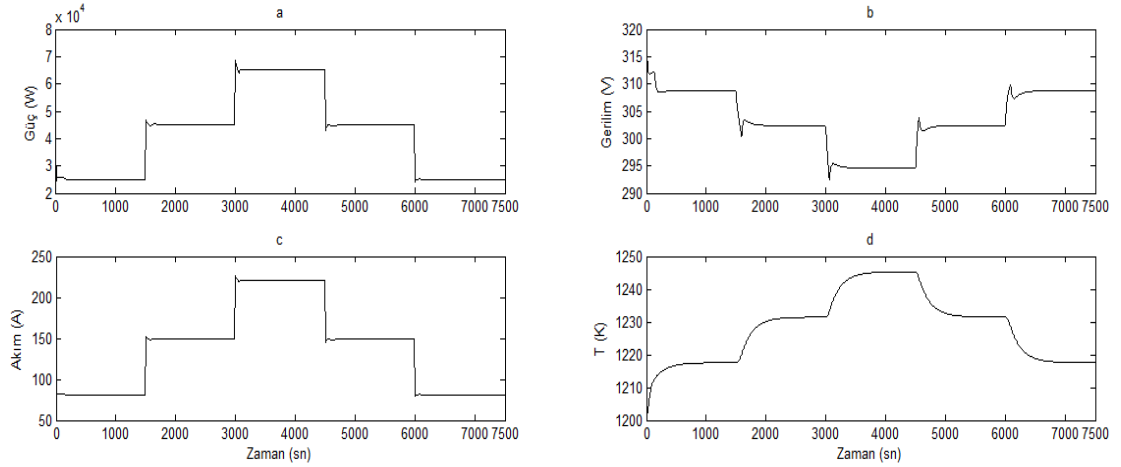
Şekil 5.25.a'da görüldüğü gibi,  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı yük güç değişimlerini takip edebilmektedir. Şekil 5.25.b'de görüldüğü gibi yakıt kullanım faktörü yaklaşık 180 sn'lik geçici hal süresince 0.8, ilk 1500 sn'lik süre sonuna kadar olması gereken 0.85, 40 kW'lık yük anahtarlandığında en yüksek sınır noktası değeri olan 0.9, 3000 sn'den sonra tekrar olması gereken 0.85 değerine ulaşılmıştır. Bu şekilden adım yük değişiminin sistemin özellikle yakıt kullanım faktörü değerindeki geçici hal süresini uzattığı açıkça görülebilmektedir. Son olarak Şekil 5.25.c'de karma tipi yük için  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçları verilmiştir. Bu şekle göre,  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçlarının değişimi birbirine çok yakın olup DC yük değişimleri takip edilebilmiştir.  $H_2O$  kısmi basıncından da yük takibi açıkça görülmektedir.



Şekil 5.25 Karma yük için KOYP yığın nicelikleri a– $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı b–Yakıt kullanım faktörü c– $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçları d– $H_2O$  kısmi basıncı

#### 5.5.4 KOYP modelinin anahtarlamalı yük analizi

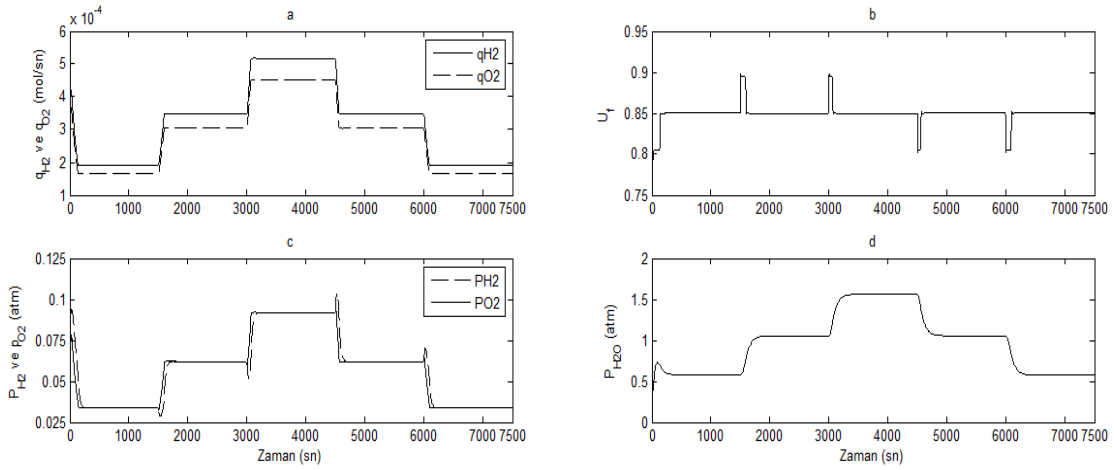
Son olarak yakıt kullanım faktörü sınırlamalı KOYP dinamik modelinin DC yük takip edebilme yeteneğinin testi için anahtarlamalı yük tipi kullanılmıştır. Yığın çıkış gücündeki, gerilimindeki, akımındaki ve sıcaklığındaki değişimler Şekil 5.26.a–d’de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları 8000 sn süresince elde edilmiştir. Şekil 5.26.a’ya göre sistemde 1500 sn aralıklarla 25 kW–45 kW–65 kW–45 kW–25 kW güç değerlerine sahip omik yük bulunmaktadır. Şekil 5.26.b ise sistemin yığın gerilimindeki değişimleri göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere; yığın gerilimi 1500 sn aralıklarla 309 V–302 V–295 V–302 V–309 V seviyelerinde değişmektedir. Bu güç değerlerindeki bir yük için elde edilen KOYP’nin çıkış akımı dalga formu Şekil 5.26.c’den görülebilir. KOYP dinamik modelinin sıcaklık cevabı ise Şekil 5.26.d’de verilmektedir. Yığın sıcaklığı 1200 °K ve 1245 °K arasında değişmektedir. Yakıt pilinin sıcaklığı yük akımının artmasıyla artmakta, azalmasıyla da azalmaktadır. Bu şekle göre de yakıt pili dinamik sistemi yük gücündeki değişimleri takip edebilmektedir.



Şekil 5.26 Anahtarlamalı yük için KOYP yığın nicelikleri a–Güç b–Gerilim c–Akım d–Sıcaklık

Şekil 5.27.a’da görüldüğü gibi,  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı yük güç değişimlerini takip edebilmektedir.  $H_2$  akış hızı 1500 sn aralıklarla 0.19–0.35–0.52–0.35–0.19 mol/s seviyelerinde adım değişimler ile değişmektedir. Şekil 5.27.b ise sistemin yakıt kullanım faktörünü göstermektedir. Yüklerin anahtarlandığı anda meydana gelen yaklaşık 0.8–0.9 arasında değişen sıçrama değerleri kısa sürelidir. Ancak anlık olarak bile  $U_f$ ’nin 0.8–0.9 aralığından çıkması yakıt pili fiziksel sistemine de zarar vermekte ve

aşırı yakıt kullanımına yol açmaktadır. Böylece  $U_f$ 'nin sınırlı durumu açıkça görülebilmektedir. KOYP yığınınındaki  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçlarındaki değişimler Şekil 5.27.c'de verilmiştir.  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçlarının değişimi birbirine çok yakın olup DC yük değişimleri takip edilebilmiştir.  $H_2O$  kısmi basıncından da yük takibi açıkça görülmektedir.



Şekil 5.27 Anahtarlamalı yük için KOYP yığın nicelikleri a- $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı b-Yakıt kullanım faktörü c- $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basınçları d- $H_2O$  kısmi basıncı

## 5.6 Güç Düzenleme Birimine Ait Matlab/Simulink Modeli

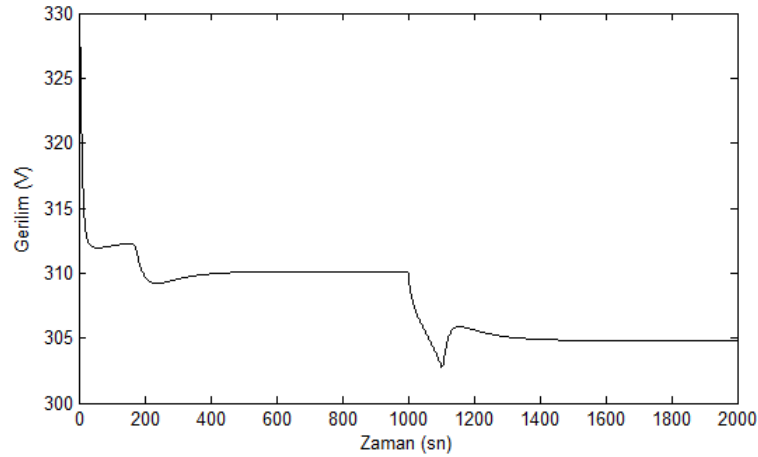
Bölüm 5.3'te DC testi yapılan modelin AC çalışmaları için temel DC-DC yükseltici konvertör elektrik devresi olarak tasarlanılmıştır. Son elde edilen model için yapılacak AC uygulamalarda matematiksel konvertör kullanılmıştır. Çünkü; yakıt pili güç kaynağı 400 V'luk DC güç kaynağı olarak konvertör ile birlikte düşünülmüştür. Yakıt pili matematiksel modele sahip olduğu ve iki birim arasında herhangi bir dönüştürme bloğu kullanılmasına gerek olmadan bu yapıyı elde edebilmek için matematiksel konvertör ile çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca; elektrik devresi olarak modellenilen konvertör; benzetim sürelerini oldukça fazla arttırmaktadır. DC-DC konvertörün çıkış gerilimi PI denetleyici yardımıyla 400 V değerinde sabit tutulmaya çalışılmaktadır. PI denetleyici katsayıları  $K_p=0.2$  ve  $K_i=10$  şeklindedir. Elde edilen bu gerilim altı IGBT anahtarlı gerilim kaynaklı DC-AC invertörün girişine uygulanmakta ve AC sistem için gerekli olan gerilim elde edilmektedir. İntertör için tetikleyici olarak histerisiz ve PWM kullanılmış olup denetleyici olarak ta I ve PI denetleyicileri kullanılmıştır. Bölüm 5.6.1'de konvertörün adım ve karma yük tiplerindeki çalışma sonuçları verilecektir. Bölüm

5.6.2'de ise 400 V'luk KOYP'li güç kaynağının AC enerji sistemi uygulamaları sunulacaktır.

### 5.6.1 DC–DC yükseltici konvertörün farklı yük tiplerindeki analizi

#### 5.6.1.1 Konvertörün adım yük analizi

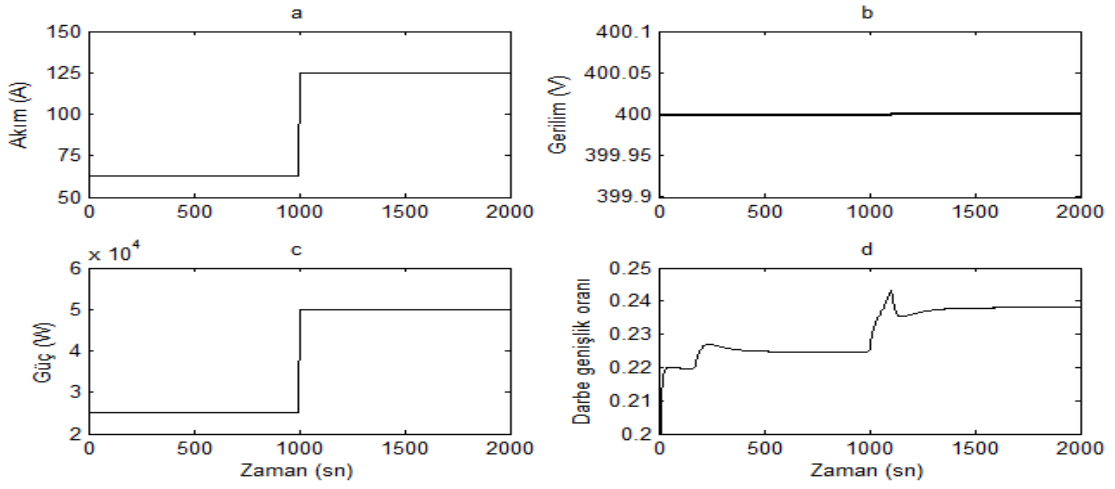
Birbirine bağlı yakıt kullanım faktörü sınırlamalı KOYP termal modeli ve DC–DC yükseltici konvertör sisteminin yük takip edebilme yeteneğinin testi için adım tipi yük kullanılmıştır. Bu durumda elde edilen yığın gerilimi Şekil 5.28 ve konvertör için çıkış akımındaki, gerilimindeki, gücündeki ve darbe genişlik oranındaki değişimler ise Şekil 5.29.a–d'de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları 2000 sn süresince elde edilmiştir.



Şekil 5.28 Konvertörlü sistemde adım tipi yük için KOYP yığın çıkış gerilimi

Şekil 5.28'ye göre yakıt pili yığını çıkış gerilimi 1000 sn aralıklarla 310 V–305 V seviyelerinde değişmektedir. Bu gerilim işareti DC–DC yükseltici konvertörün giriş işaretini oluşturmaktadır. Konvertörün de denetleyici yardımıyla bu gerilimi 400 V değerine yükseltmesi gerekmektedir. Konvertör çıkış akımı ve gerilimi sırasıyla Şekil 5.29.a ve Şekil 5.29.b'de verilmektedir. Şekil 5.29.b'de yük değişimine rağmen konvertör çıkış gerilimi 400 V değerinde sabit tutulabilmiştir. Konvertör matematiksel olarak modellendiğinden dolayı gerilim dalgalanması da görülmemektedir. Konvertör çıkış gücü ise Şekil 5.29.c'de verilmektedir ve sistemde ilk 1000 sn süresince 25 kW'lık ve ikinci 1000 sn süresince de 50 kW'lık omik yük bulunmaktadır. Son olarak, Şekil

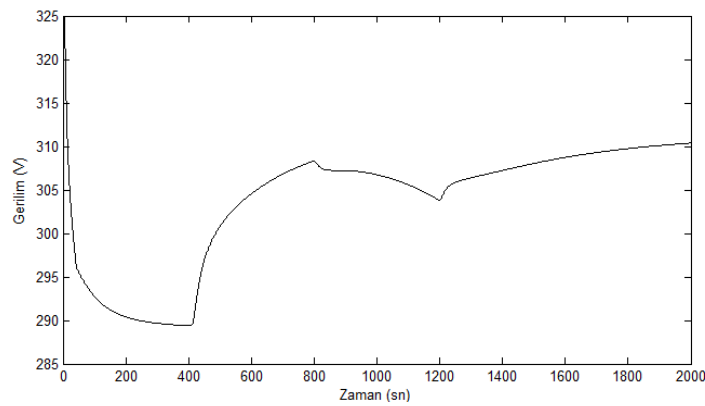
5.29.d'de 1000 sn aralıklarla 0.225 ve 0.235 değerlerine sahip DC–DC yükseltici konvertör darbe genişlik oranı görülmektedir.



Şekil 5.29 Adım yük için DC–DC konvertör nicelikleri a–Çıkış akımı b–Çıkış gerilimi c–Güç d–Darbe genişlik oranı

### 5.6.1.2 Konvertörün karma yük tipi analizi

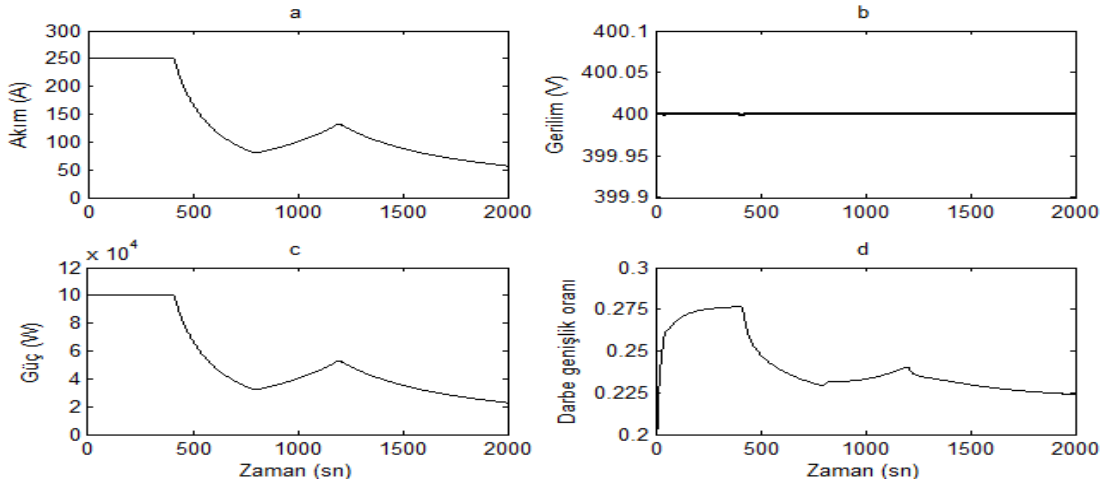
DC–DC yükseltici konvertöre zamanla farklı güç değerlerine sahip yük bağlanılmış ve bu durumda elde edilen yığın gerilimi Şekil 5.30 ve konvertör için çıkış akımındaki, gerilimindeki, gücündeki ve darbe genişlik oranındaki değişimler ise Şekil 5.31.a–d'de gösterilmektedir. Benzetim sonuçları 2000 sn süresince elde edilmiştir.



Şekil 5.30 Konvertörlü sistemde karma tipi yük için KOYP yığın çıkış gerilimi

Şekil 5.30'a göre yakıt pili yığını çıkış gerilimi benzetim süresince 290 V ile 310 V aralığında değişmektedir. Konvertör çıkış akımı ve gerilimi sırasıyla Şekil 5.31.a ve Şekil 5.31.b'de verilmektedir. Şekil 5.31.b'de yük değişimine rağmen konvertör çıkış

gerilimi 400 V değerinde sabit tutulabilmiştir. Konvertör çıkış gücü ise Şekil 5.31.c'de verilmektedir ve benzetim süresince 25 kW ile 100 kW değerlerinde değişmektedir. Bu şekle göre; konvertör gücünün 100 kW'a sınırlandırıldığı görülmektedir. Böylelikle 100 kW ve 400 V özelliklerine sahip KOYP'li DC güç kaynağı elde edilmiş olmaktadır. Son olarak, Şekil 5.31.d'de 0.225 ve 0.275 değerlerine sahip DC-DC yükseltici konvertör darbe genişlik oranı görülmektedir.



Şekil 5.31 Karma tipi yük için DC-DC konvertör nicelikleri a-Çıkış akımı b-Çıkış gerilimi c-Güç d-Darbe genişlik oranı

### 5.6.2 Yakıt kullanımı sınırlamalı KOYP sisteminin enerji sistemi uygulamaları

Yakıt pilinin enerji sistemi uygulamaları için invertör elektrik devresi olarak tasarlanmıştır. Şebeke frekansı ile GDB çıkışındaki işaretin frekansı birbiri ile senkronize olması gerekmektedir. Bunu yapmak için FKD kullanılmıştır. İnvörtör; Park dönüşümü ( $abc/dq0$ ) temelli aktif-reaktif güç denetleyici ile karakterize edilmiştir. Bu dönüşüm tekniği; üç fazlı devrelerin analizini basitleştirmek için kullanılan matematiksel bir dönüşümdür. Dengeli üç fazlı sistemlerde Park dönüşümü ile üç AC bileşen iki DC bileşene indirgenmektedir. Bu teknik genellikle üç fazlı senkron makinelerin analizini veya üç fazlı invertörlerin kontrolü için gerekli hesaplamaları basitleştirmek için kullanılmaktadır.  $abc$  koordinatlarından  $dq0$  senkron referans koordinatlarına dönüşüm yapabilmek için sistem geriliminin senkron bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Senkronizasyon için kullanılan FKD girişine kaynak gerilimleri uygulanarak üretilen  $\omega t$ , sistemin  $\omega t$ 'si ile senkronize olduğunda  $dq0$  senkron referans



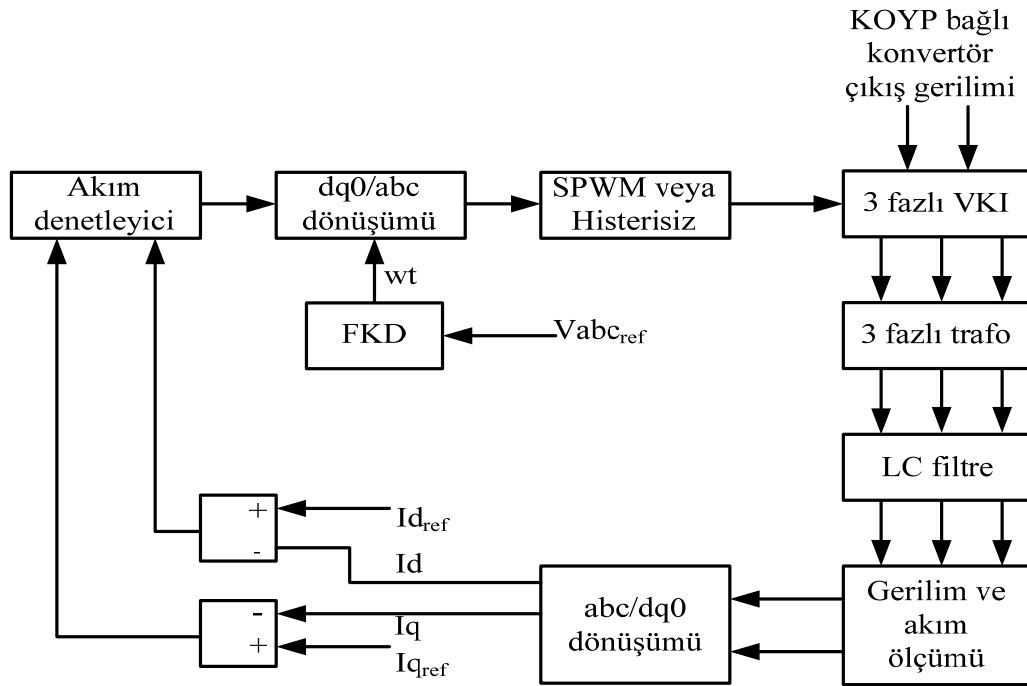
yapı, sistem gerilimiyle senkron olmaktadır. Üç fazlı akıma uygulanan Park dönüşümü matris formatında Eşitlik 5.7'de görülmektedir.

$$I_{dq0} = T I_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Üç fazlı sistemlerde,  $dq0$  koordinatlarına dönüşümü yapılan akımın “ $d$ ” ekseninde bulunan  $I_d$  bileşeni gerilimle aynı fazda olduğu için pozitif sıralı aktif akıma karşılık gelmektedir. “ $q$ ” ekseninde bulunan  $I_q$  bileşeni,  $I_d$  bileşenine göre dik olduğu için negatif sıralı reaktif akımlara karşılık gelmektedir.  $I_d$  ve  $I_q$  bileşenlerine dik olan “ $0$ ” ekseninde bulunan  $I_0$  bileşeni ise akımın sıfır sıralı bileşenine karşılık gelmektedir. Akımın “ $q$ ” ekseninde bulunan  $I_q$  bileşeni negatif ise, yükün endüktif bileşen içerdiğini, pozitif ise yükün kapasitif bileşen içerdiğini göstermektedir [83].

Şekil 5.32'de KOYP bağlı AC enerji sistemine ait blok diyagram verilmiştir. İnvörtör çıkışındaki bu sinyalin her bir saykılı kare dalga görünümündedir. İnvörtör çıkışındaki dalga şeklini sinüzoidal forma dönüştürmek için üç fazlı 220/400 voltluk trafo kullanılmıştır. LC filtre ise trafo çıkışındaki işaretin üzerindeki dalgalanmaları azaltmak için kullanılmıştır. Üç fazlı AC bara gerilimi ve akımı ölçülerek ve “ $abc/dq0$  dönüşümü” bloğu yardımıyla  $dq$  değerlerine dönüştürülmektedir. AC baranın aktif ve reaktif güç talepleri referans alınarak referans  $dq$  değerleri de elde edilmektedir. Bu değerler akım denetleyicisine giriş olarak verilmekte ve denetleyici sinyali elde edilmektedir. Bu sinyal tetikleyicinin giriş işareti formu olan  $abc$ 'ye “ $dq0/abc$  dönüşümü” bloğu ile dönüştürülmektedir. Ayrıca bu bloğa senkronizasyon için gerekli olan açısal frekans değeri faz kilitlemeli döngü bloğu yardımıyla ikinci bir giriş olarak verilmektedir. Tetikleyici; girişine gelen bilgiye göre invörtörü tetiklemekte ve nominal değerlere sahip AC gerilimin elde edilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak; güç düzenleme birimi DC–DC yükseltici konvertör, DC–AC invörtör ve onların denetleyicilerinden meydana

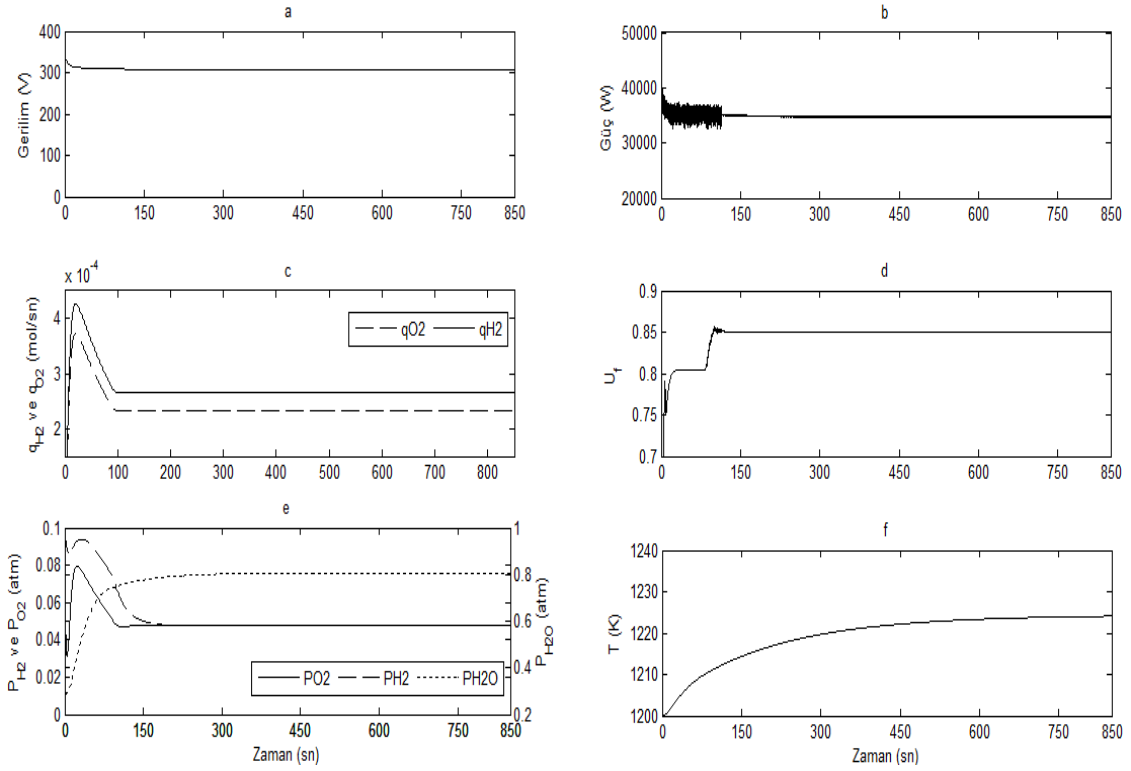
gelmektedir. Böylelikle yakıt pili sistemi için güç düzenleme birimi modellenmiş olmaktadır.



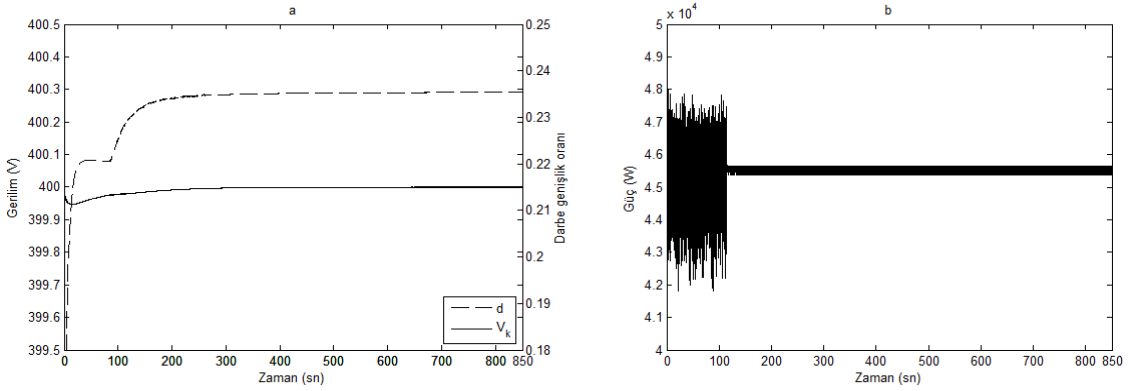
Şekil 5.32 KOYP bağlı AC enerjisi sistemine ait blok diyagram

### 5.6.2.1 Sonsuz baralı KOYP enerji sistemi

$U_f$  sınırlamalı KOYP modelinin AC testi için sisteme sonsuz bara bağlanılmış ve bu sisteme ait blok diyagram Şekil 5.8'de verilmiştir. PI denetleyici katsayıları konvertör için sırasıyla  $K_p=1.6$  ve  $K_i=0.02$  ve invertör için ise  $K_p=10$  ve  $K_i=3000$  şeklindedir. Şekil 5.33.a-f'de sonsuz bara bağlı enerji sisteminde KOYP için sırasıyla gerilim, güç,  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı, yakıt kullanım faktörü,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  kısmi basınçları ve sıcaklık nicelikleri verilmiştir. Benzetim sonuçları 850 sn süresince elde edilmiştir. KOYP yığın gerilimi 306 V, yığın gücü 35 kW,  $H_2$  akış hızı 0.27 mol/s,  $O_2$  akış hızı 0.23 mol/s, yakıt kullanım faktörü ( $U_f$ ) 0.85,  $H_2O$  kısmi basıncı 0.806 atm,  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basıncı  $4.74 \cdot 10^{-2}$  atm ve sıcaklık 1224 °K olarak elde edilmiştir.

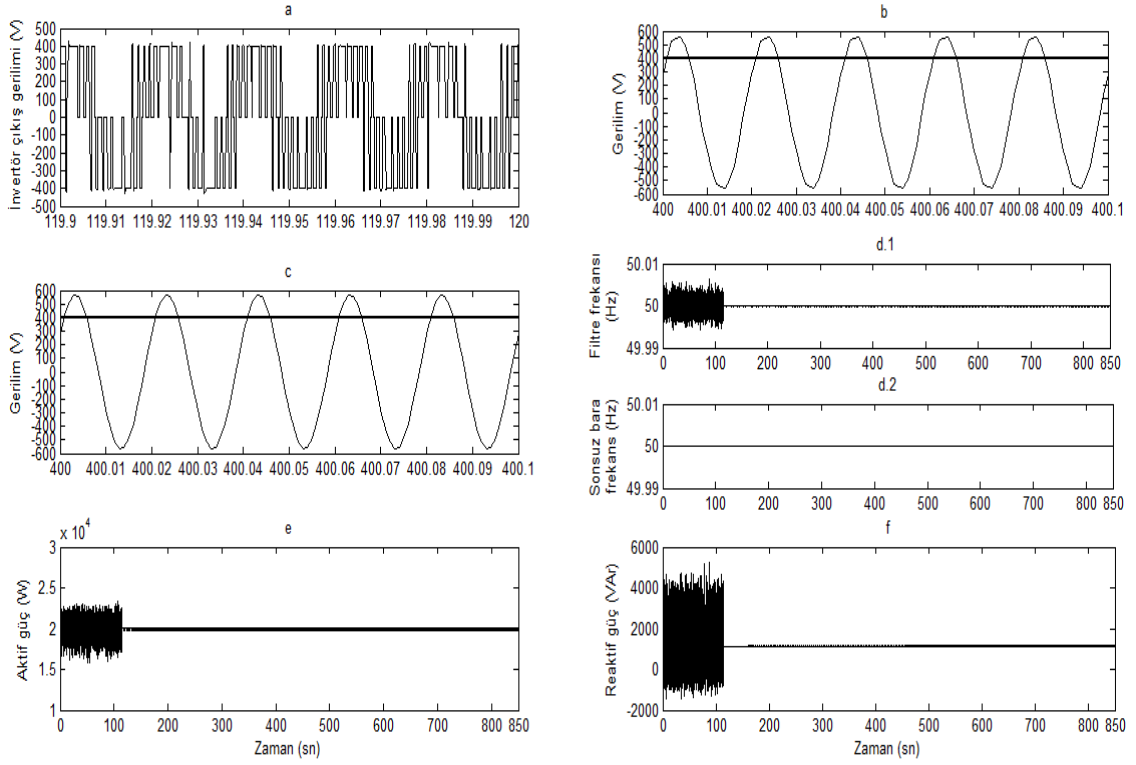


Şekil 5.33 Sonsuz bara bağlı enerji sisteminde KOYP nicelikleri a–Gerilim b–Güç c– $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı d– $U_f$  e– $P_{H_2O}$ ,  $P_{H_2}$  ve  $P_{O_2}$  f–Sıcaklık



Şekil 5.34 Sonsuz bara bağlı enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç

Şekil 5.34.a–b’de sonsuz bara bağlı enerji sisteminde çıkış gerilimi, darbe genişlik oranı ve çıkış gücü olmak üzere DC–DC yükseltici konvertör nicelikleri verilmiştir. Konvertör çıkış gerilimi 400 V, darbe genişlik oranı 0.235 değerine sahiptir. DC çıkış gücü ise 45.5 kW olarak elde edilmiştir.



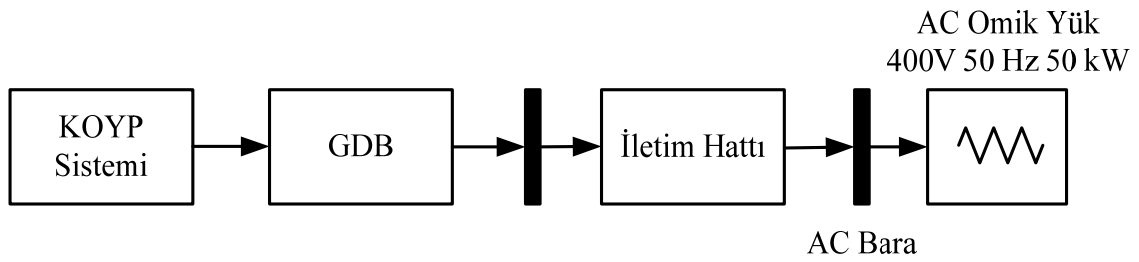
Şekil 5.35 Sonsuz bara bağlı enerji sisteminde AC bara nicelikleri a–İnvertör çıkış gerilimi b–Sinüs ve rms olarak filtre çıkış gerilimi c–Sinüs ve rms olarak sonsuz bara gerilimi d–Fitre ve sonsuz bara frekansı e–Sistem aktif gücü f–Sistem reaktif gücü

Şekil 5.35.a–f’de sonsuz bara bağlı enerji sisteminde; invertör çıkış gerilimi, sinüs ve rms olarak filtre çıkış gerilimi, sinüs ve rms olarak sonsuz bara gerilimi, filtre ve sonsuz bara frekansı, sistem aktif gücü ve sistem reaktif gücü olmak üzere AC bara nicelikleri verilmiştir. Şekil 5.35.a’da girişine gelen 400 V’luk DC gerilimi altı IGBT anahtarın sırasıyla tetiklenmesi sonucu elde edilen 400 V genlikli kare dalga görülmektedir. Şekil 5.35.b’de bu işaretin trafo ve filtreden sonraki hali görülmektedir. Filtre çıkışındaki işaretin tepe değeri 565 V ve etkin değeri de 400 V<sub>rms</sub> olarak elde edilmiştir. Ayrıca filtre yardımıyla AC hat başındaki gerilim üzerindeki istenmeyen dalgalanmalar giderilmiştir. Şekil 5.35.c’de iletim hattı sonundaki sonsuz bara üzerinde ölçülen gerilime ait sinüs ve rms işaretler görülmektedir. Burada da sonsuz bara için olması gereken nominal değerler 565 V tepe ve 400 V<sub>rms</sub> olarak elde edilmiştir. Şekil 5.35.d’de GDB çıkışı ve sonsuz bara frekanslarının 50 Hz olarak elde edildiği görülmektedir. GDB çıkışındaki işaretin frekansı üzerindeki dalgalanma miktarı geçici hal süresi içinde  $\pm\% 1$  ve sürekli hal süresi içinde  $\pm\% 0.0024$ ’tür. Böylelikle invertör denetleyicisi ile istenilen nominal gerilim ve frekans değerleri elde edilmekte ve AC sisteme uygulanmaktadır. Şekil 5.35.e–f’de sırasıyla sonsuz baraya beslenen aktif ve

reaktif güç verilmektedir. İntertöre referans olarak verilen aktif güç değeri 20 kW ve reaktif güç değeri de 0 kVAr'dır. Aktif güç değerinin istenilen değer ulaştığı ve invertör aktif-reaktif güç denetiminin başarıyla yapıldığı şekillerden açıkça görülmektedir. Böylelikle önerilen KOYP modeli için uygun GDB ve denetleyicilerinin tasarlanılmış ve AC testin başarıyla yapılmıştır.

### 5.6.2.2 AC omik yüklü KOYP'li enerji sistemi

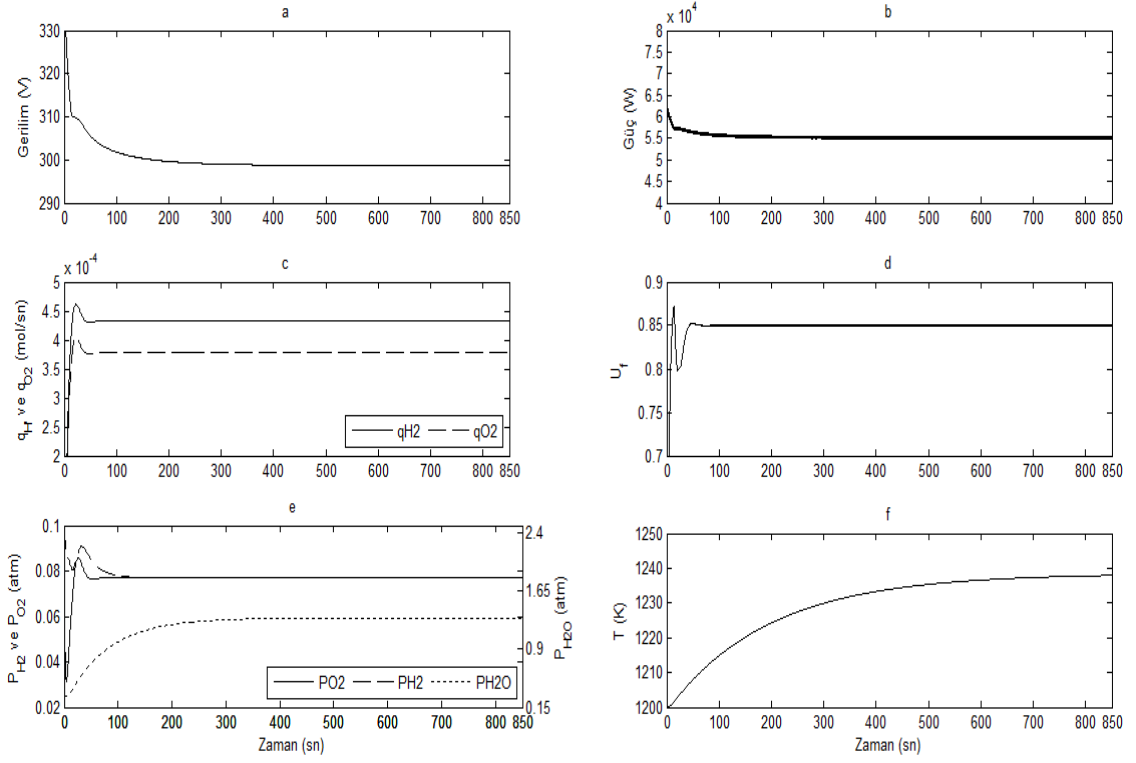
AC olarak test edilmiş KOYP modelinin AC omik yük bağlantısı altındaki davranışını incelemek için trafo, LC filtre ve iletim hattı yapısından sonra 400 V, 50 Hz ve 50 kW parametrelerine sahip omik yük AC baraya bağlanılmıştır. AC omik yüklü sisteme ait blok diyagram Şekil 5.36'da verilmiştir.



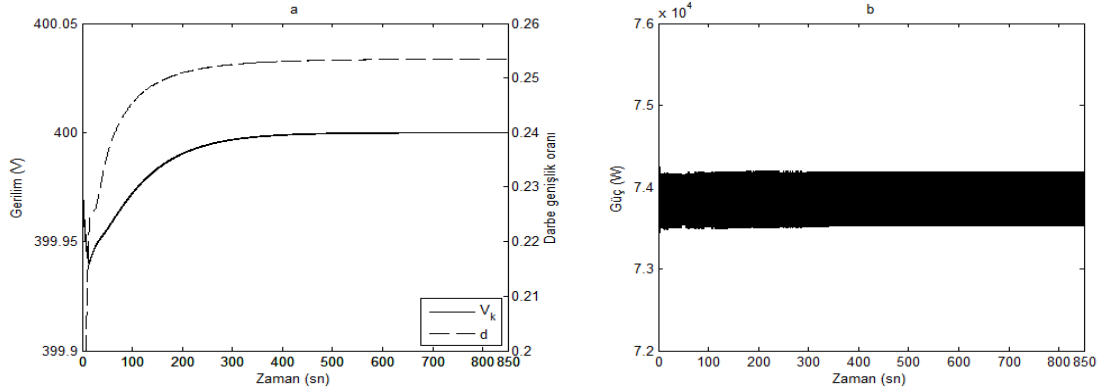
Şekil 5.36 AC omik yüklü sisteme ait blok diyagram

PI denetleyici katsayıları sırasıyla konvertör için  $K_p=1.6$  ve  $K_i=0.02$ , invertör aktif güç denetimi için  $K_p=0.001$  ve  $K_i=5$  ve reaktif güç denetimi için de  $K_p=0.012$  ve  $K_i=0.002$  şeklindedir. Şekil 5.37.a-f'de AC omik yük bağlı enerji sisteminde KOYP için sırasıyla gerilim, güç,  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı, yakıt kullanım faktörü,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  kısmi basınçları ve sıcaklık nicelikleri verilmiştir. Benzetim sonuçları 850 sn süresince elde edilmiştir. KOYP yığın gerilimi 300 V, yığın gücü 55 kW,  $H_2$  akış hızı 0.44 mol/s,  $O_2$  akış hızı 0.38 mol/s, yakıt kullanım faktörü ( $U_f$ ) 0.85,  $H_2O$  kısmi basıncı 1.35 atm,  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basıncı 0.078 atm ve sıcaklık 1239 °K olarak elde edilmiştir.

Şekil 5.38.a-b'de omik yük bağlı enerji sisteminde çıkış gerilimi, darbe genişlik oranı ve çıkış gücü olmak üzere DC-DC yükseltici konvertör nicelikleri verilmiştir. Konvertör çıkış gerilimi 400 V, darbe genişlik oranı 0.254 değerine sahiptir. DC çıkış gücü ise 74 kW olarak elde edilmiştir.



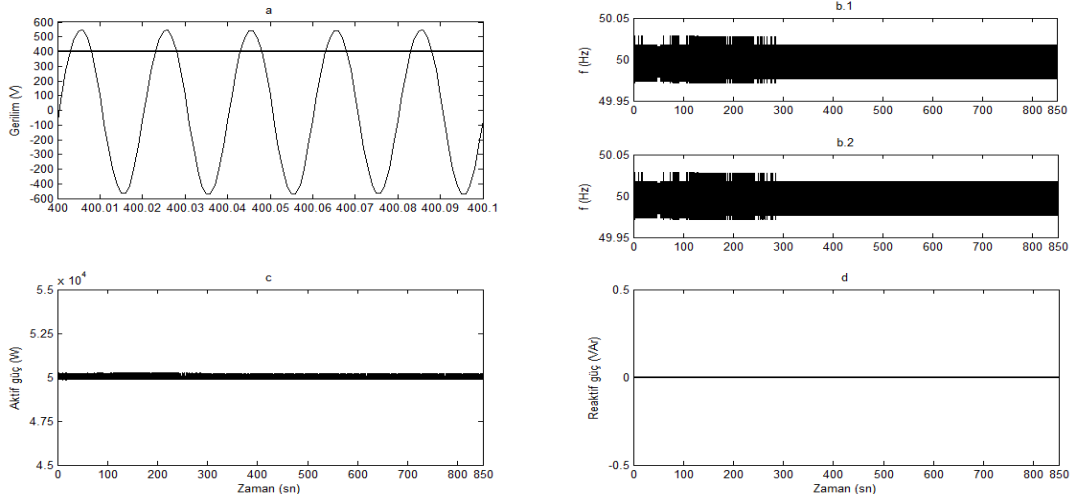
Şekil 5.37 Omik yük bağlı enerji sisteminde KOYP nicelikleri a–Gerilim b–Güç c–H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> akış hızı d–U<sub>f</sub> e–P<sub>H<sub>2</sub>O</sub>, P<sub>H<sub>2</sub></sub> ve P<sub>O<sub>2</sub></sub> f–Sıcaklık



Şekil 5.38 Omik yük bağlı enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç

Şekil 5.39.a–d'de omik yük bağlı enerji sisteminde; sinüs ve rms olarak yük barası gerilimi, GDB ve yük barası frekansı, yük aktif gücü ve yük reaktif gücü olmak üzere AC bara nicelikleri verilmiştir. Şekil 5.39.a'da yük barasındaki gerilimin tepe değeri 565 V ve etkin değeri de 400 V<sub>rms</sub> olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.39.b'ye göre GDB çıkışı ve yük barası frekansları yaklaşık 290 sn sonra sürekli hale geçerek 50 Hz olarak elde edilmiştir. GDB çıkışındaki işaretin frekansı üzerindeki dalgalanma miktarı geçici hal süresi içinde  $\pm\%$  5.8 ve sürekli hal süresi içinde  $\pm\%$  0.37'dir. Böylelikle

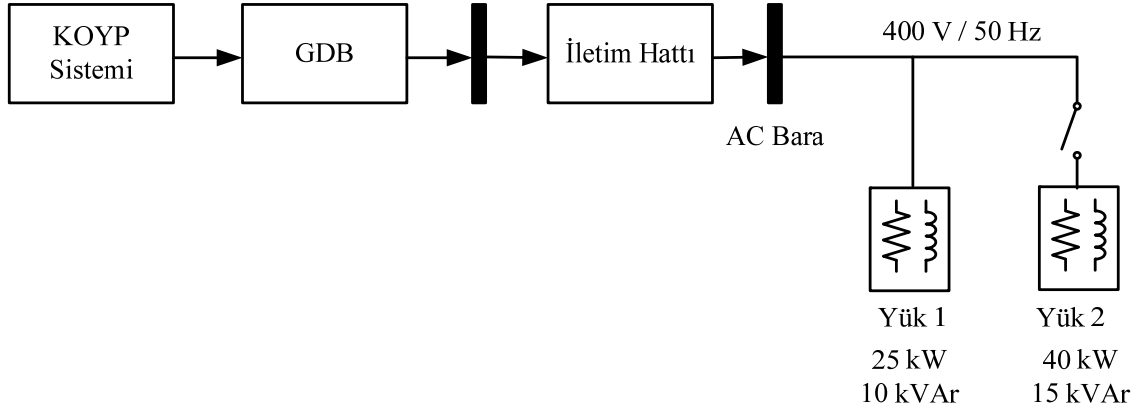
invertör denetleyicisi ile istenilen nominal gerilim ve frekans değerleri elde edilmekte ve AC omik yüke uygulanmaktadır. Şekil 5.39.c ve Şekil 5.39.d'de sırasıyla yük tarafından çekilen aktif ve reaktif güç verilmektedir. Invertöre referans olarak verilen aktif güç değeri 50 kW ve reaktif güç değeri de 0 kVAr'dır. Aktif güç değerinin istenilen değer ulaştığı ve invertör aktif-reaktif güç denetiminin başarıyla yapıldığı şekillerden açıkça görülmektedir.



Şekil 5.39 Omik yük bağlı enerji sisteminde yük barası nicelikleri a–Sinüs ve rms olarak gerilim b.1–GDB frekansı b.2–Yük frekansı c–Aktif güç d–Reaktif güç

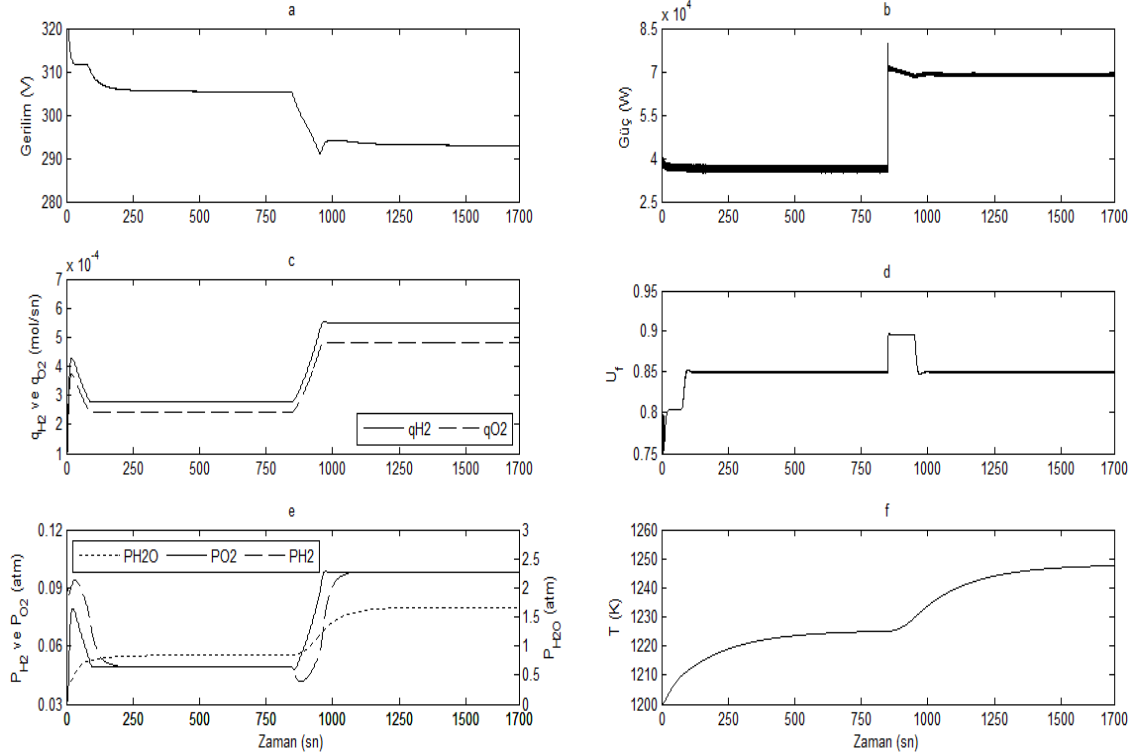
### 5.6.2.3 Anahtarlamalı omik–endüktif yüklü KOYP'li enerji sistemi

Bu uygulamada KOYP modeli ve GDB'nin anahtarlamalı omik–endüktif yük bağlantısı durumundaki davranışı incelenmiştir. İletim hattından sonra ilk 850 sn için 25 kW–10 kVAr ve ikinci 850 sn için 40 kW–15 kVAr güç parametrelerine sahip omik–endüktif yük AC baraya bağlanılmıştır. Zaman anahtarlamalı omik–endüktif yüklü sisteme ait blok diyagram Şekil 5.40'ta verilmiştir.



Şekil 5.40 AC anahtarlama omik- endüktif yüklü sisteme ait blok diyagram

PI denetleyici katsayıları sırasıyla konvertör için  $K_p=1.6$  ve  $K_i=0.02$ , invertör aktif güç denetimi için  $K_p=0.5$  ve  $K_i=300$  ve reaktif güç denetimi için de  $K_p=0.03$  ve  $K_i=0.2$  şeklindedir. Şekil 5.41.a-f'de anahtarlama omik- endüktif yük bağlı enerji sisteminde KOYP için sırasıyla gerilim, güç,  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı, yakıt kullanım faktörü,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  kısmi basınçları ve sıcaklık nicelikleri verilmiştir. Benzetim sonuçları 1700 sn süresince elde edilmiştir.

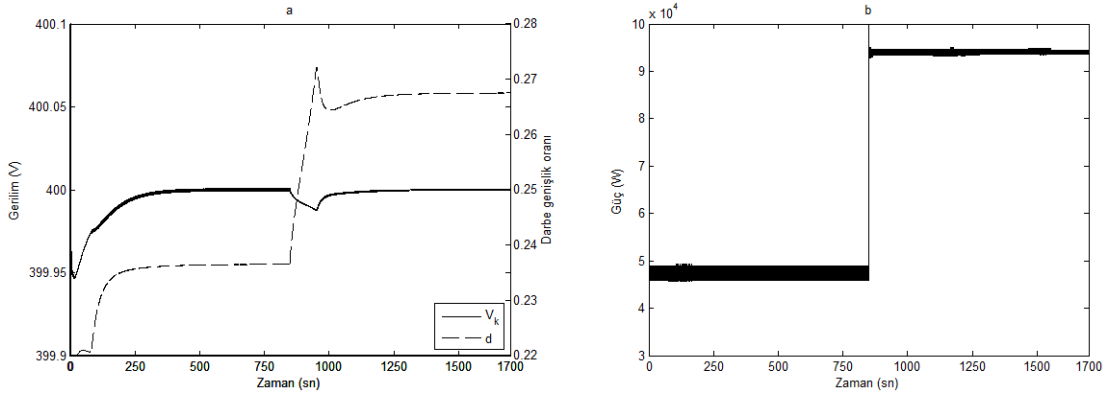


Şekil 5.41 Anahtarlama omik- endüktif yük bağlı enerji sisteminde KOYP nicelikleri  
a- Gerilim b- Güç c-  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı d-  $U_f$  e-  $P_{H_2O}$ ,  $P_{H_2}$  ve  $P_{O_2}$  f- Sıcaklık



İlk yük için elde edilen KOYP yığın gerilimi 306 V, yığın gücü 35 kW, H<sub>2</sub> akış hızı 0.28 mol/s, O<sub>2</sub> akış hızı 0.24 mol/s, yakıt kullanım faktörü ( $U_f$ ) 0.85, H<sub>2</sub>O kısmi basıncı 0.84 atm, H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basıncı 0.049 atm ve sıcaklık 1225 °K'dir. İkinci yük için elde edilen KOYP yığın gerilimi 293 V, yığın gücü 70 kW, H<sub>2</sub> akış hızı 0.55 mol/s, O<sub>2</sub> akış hızı 0.48 mol/s, yakıt kullanım faktörü ( $U_f$ ) 0.85, H<sub>2</sub>O kısmi basıncı 1.65 atm, H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> kısmi basıncı 0.098 atm ve sıcaklık 1248 °K'dir.

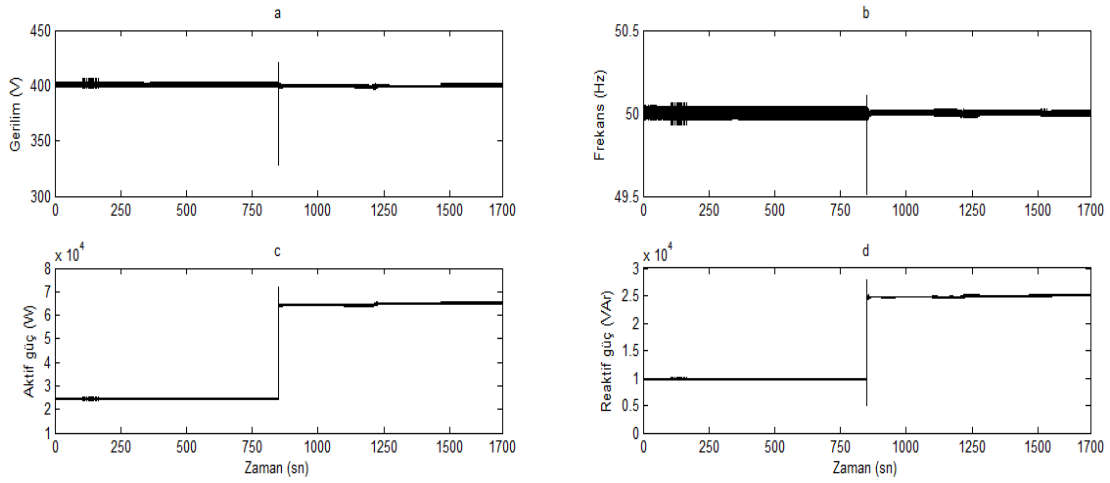
Şekil 5.42.a–b'de anahtarlama omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde çıkış gerilimi, darbe genişlik oranı ve çıkış gücü olmak üzere DC–DC yükseltici konvertör nicelikleri verilmiştir. Konvertör çıkış gerilimi her iki yük seviyesinde 400 V'tur. İlk yük seviyesi için darbe genişlik oranı 0.237, ikinci yük seviyesi için ise 0.268 değerine sahiptir. DC çıkış gücü ilk yük için 47.5 kW ve ikinci yük için 94 kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.42 Anahtarlama omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç

Şekil 5.43.a–d'de anahtarlama omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde; rms olarak yük barası gerilimi, yük barası frekansı, yük aktif gücü ve yük reaktif gücü olmak üzere yük barası nicelikleri verilmiştir. Şekil 5.43.a'da yük barasındaki gerilimin etkin değeri anahtarlama olmasına rağmen nominal değer olan 400 V<sub>rms</sub> olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.43.b'ye göre yük barası frekansı her iki yük seviyesi için 50 Hz olarak elde edilmiştir. Böylelikle invertör denetleyicisi; her iki yük seviyesi için başarılı bir şekilde çalışabilmektedir. Şekil 5.43.c ve Şekil 5.43.d'de sırasıyla yük barası tarafından çekilen aktif ve reaktif güç verilmektedir. İnvörtöre referans olarak verilen aktif güç değeri ilk yük için 25 kW, ikinci yük için 40 kW ve reaktif güç değeri ilk yük için 10 kVar ve ikinci yük için 15 kVar'dır. Aktif ve reaktif güç değerlerinin istenilen

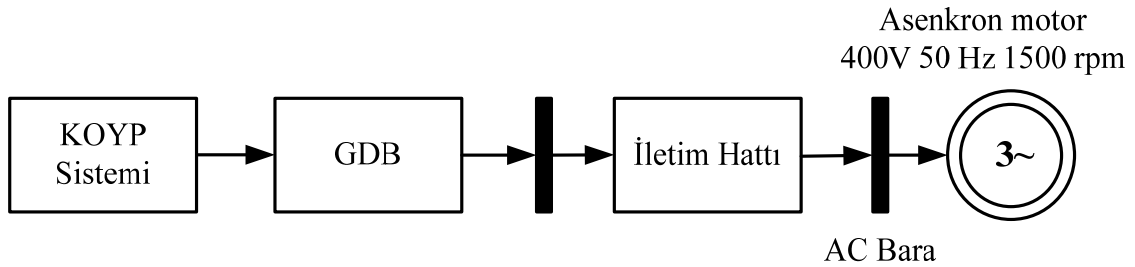
değerlere ulaştığı ve invertör aktif-reaktif güç denetiminin başarıyla yapıldığı şekillerden açıkça görülmektedir.



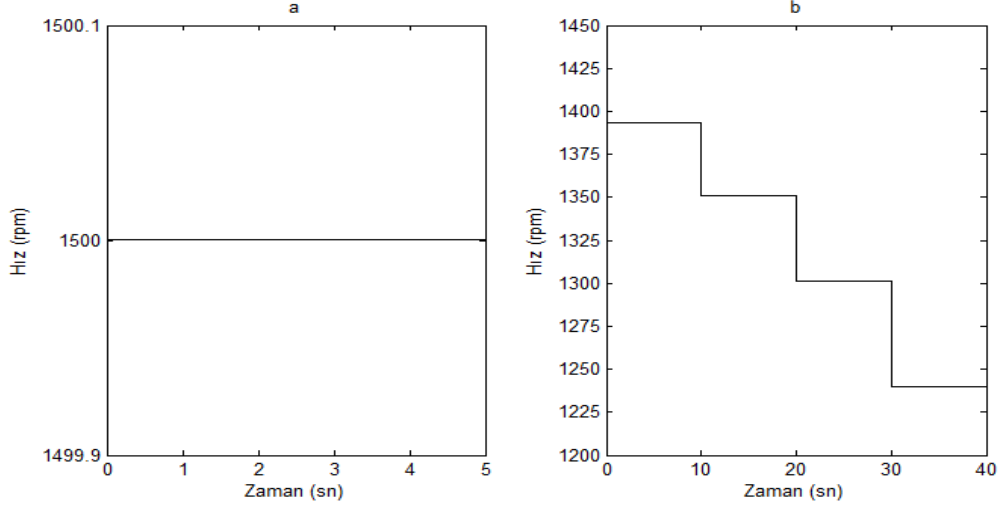
Şekil 5.43 Anahtarlamalı omik- endüktif yük bağlı enerji sisteminde yük barası nicelikleri a-rms olarak gerilim b-Frekans c-Aktif güç d-Reaktif güç

#### 5.6.2.4 Asenkron motor bağlı KOYP'li enerji sistemi

Bu uygulamada KOYP modeli ve GDB'nin asenkron motor bağlantısı durumundaki davranışı incelenmiştir. 400 V-50 Hz-1500 rpm parametrelerine sahip asenkron motor çalışması için kurulan sisteme ait blok diyagram Şekil 5.44'te verilmiştir. İlk olarak Şekil 5.45.a-b'de referans hız değerleri verilmiştir. Tork değerinin sıfır olması durumunda motor boşta çalışmakta ve nominal hız değeri olan 1500 rpm'i göstermesi gerekmektedir. Şekil 5.45.b'ye göre 10 sn aralıklarla asenkron motor hız değeri 1393-1351-1301-1240 rpm olarak değişmektedir. Bu hız değerleri sırasıyla motora referans olarak verilerek AC çıkış nicelikleri elde edilmiştir.

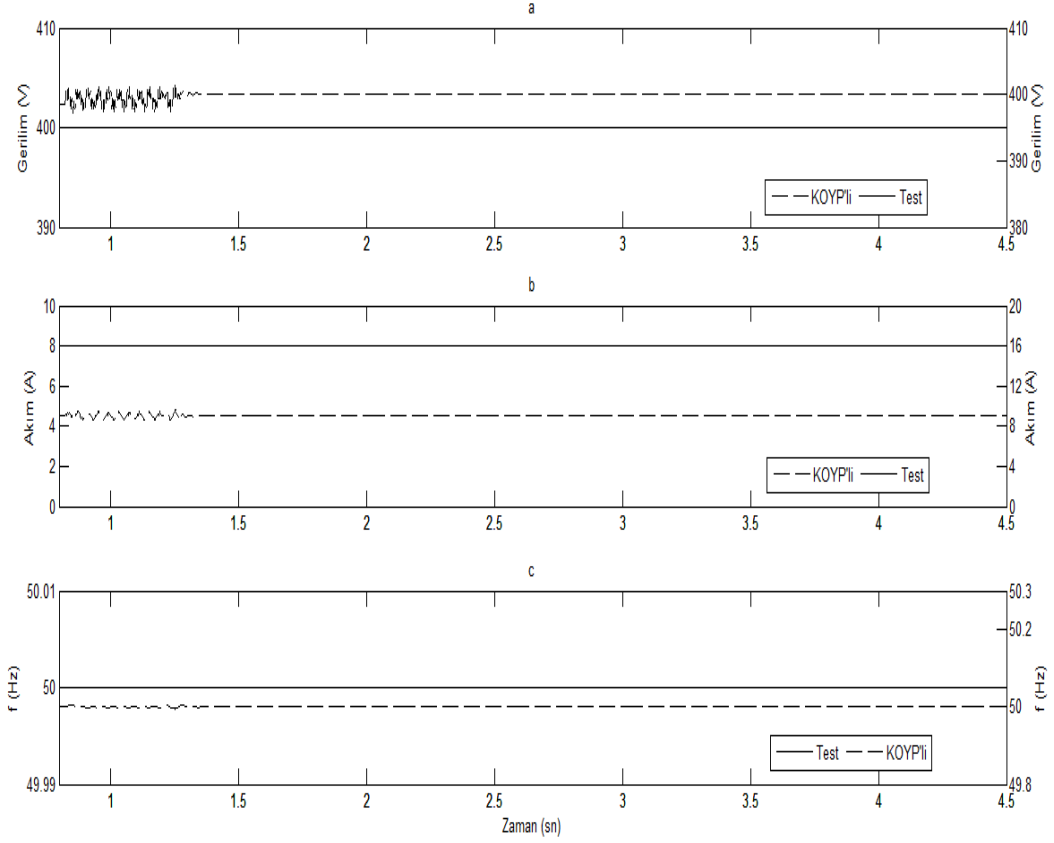


Şekil 5.44 Asenkron motor yüklü sisteme ait blok diyagram



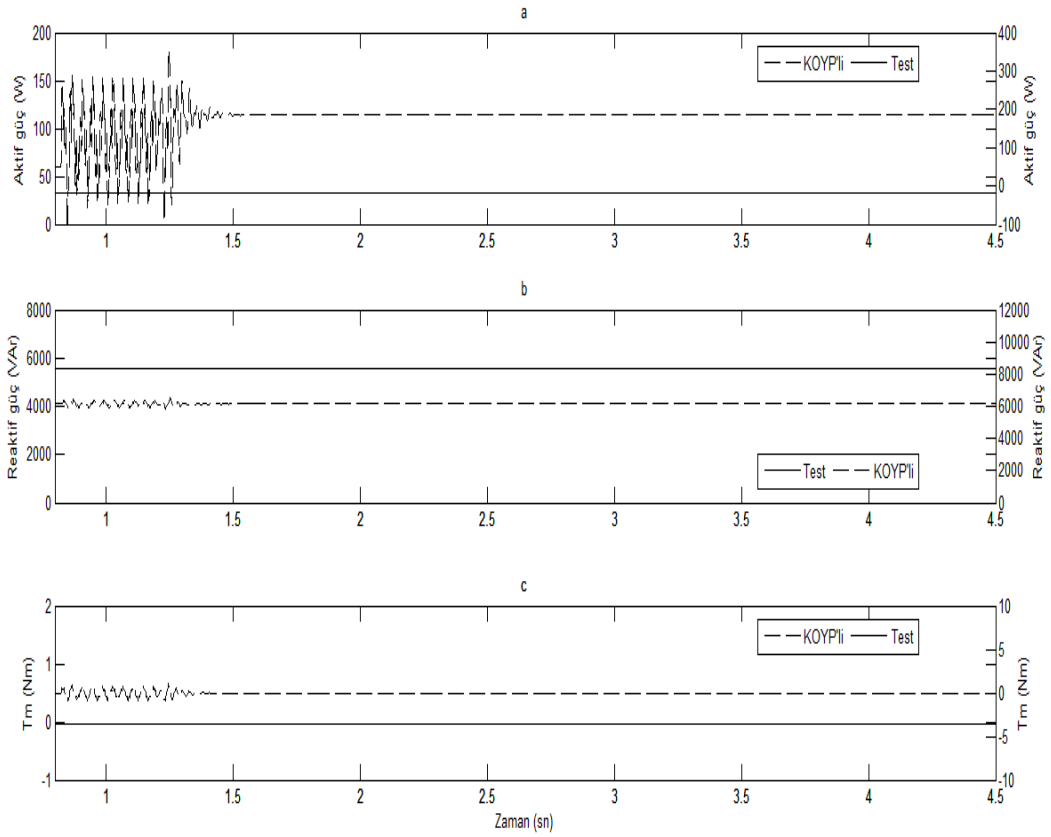
Şekil 5.45 Asenkron motor referans hız değerleri a–Boşta çalışma b–Yükte çalışma

Asenkron motorlu bir sistemde KOYP'li AC güç kaynağının davranışını daha iyi analiz edebilmek için benzetim ortamında ilk olarak bir test sistemi modellenmiştir. Bu modelde geleneksel AC güç kaynağı kullanılarak sonuçlar elde edilmiş ve yakıt pilli sistemden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.46.a–c'de asenkron motorun yük olarak kullanıldığı hem test hem de KOYP'li sistemin 1500 rpm hız referanslı AC motor nicelikleri verilmiştir. İlk şekilde sürekli çizgilerle ifade edilen test sistemine ve kesikli çizgilerle ifade edilen KOYP'li sisteme ait yük gerilimleri görülmektedir. Test sisteminde dalgalanma miktarı düşük olan 400 V'luk gerilim değeri elde edilmiştir. KOYP'li sistemde ise gerilimin sürekli hal değeri yaklaşık 1.3 sn sonra elde edilmeye başlanılmıştır. Bu süre; yakıt pilli ve GDB sistemindeki anahtarlama durumundan kaynaklanmaktadır. Şekil 5.46.b'ye göre test sisteminde boşta çalışan motor için stator akımının 8 A olduğu açıkça görülmektedir. İkinci "y" ekseninde görüldüğü gibi yakıt pilli enerji sisteminde stator akımı değeri %12.5'luk artışla 9 A olarak ölçülmüştür. Şekil 5.46.c'de ise yük barası frekans değerleri verilmektedir. Nominal değer olan 50 Hz değeri her iki sistemde de başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Yakıt pilli sistemde ilk 0.4 sn süresince geçici hal davranışı görülmektedir. Ancak; bu tür bir sistemin cevap hızı açısından bu süre kısa bir süredir.



Şekil 5.46 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Gerilim b–Akım c–Frekans

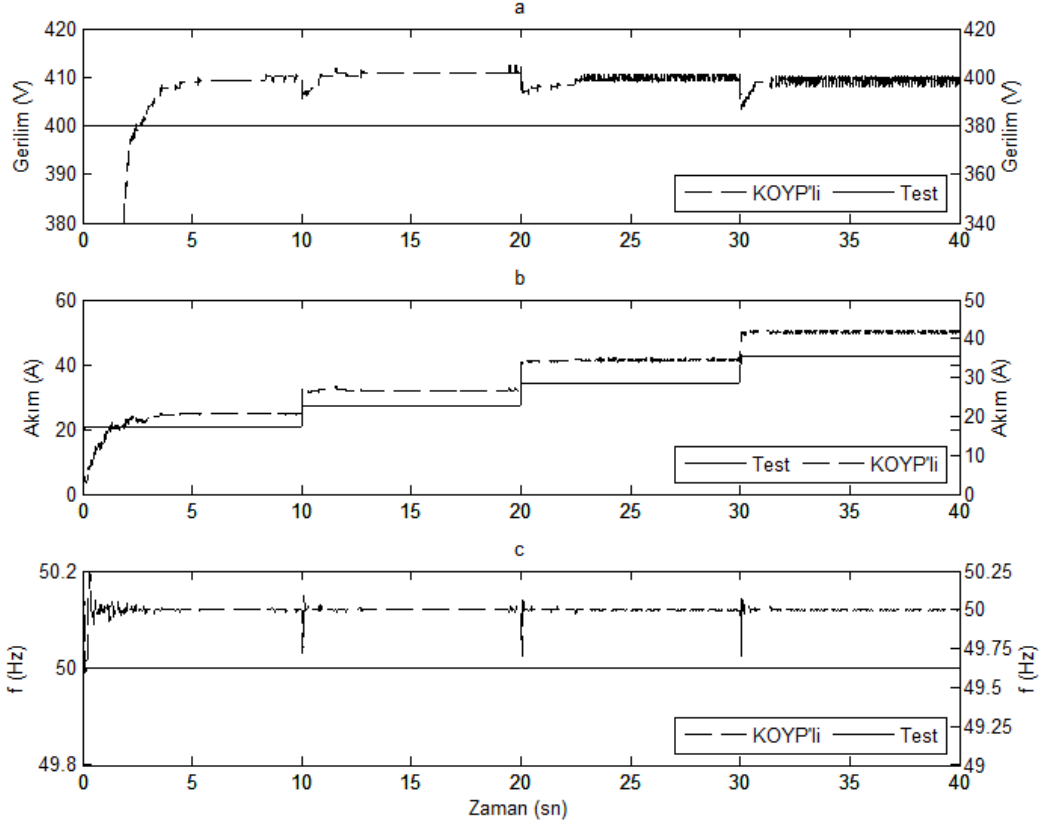
Şekil 5.47.a-c'de boşa çalışan asenkron motorun yük olarak kullanıldığı hem test hem de KOYP'li sistemin AC motor güç ve tork nicelikleri verilmiştir. İlk şekilde sürekli çizgilerle ifade edilen test sistemine ve kesikli çizgilerle ifade edilen KOYP'li sisteme ait yük aktif gücü değerleri görülmektedir. Boşa çalışan AC motorun bu koşullardaki aktif güç değeri sıfıra yakın bir değer olmaktadır. Aktif güç değeri test sisteminde 35 W ve yakıt pilli sistemde 180 W olarak elde edilmiştir. Bu artış stator akımındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Şekil 5.47.b'ye göre test sisteminde boşa çalışan motor için reaktif güç değeri 5.55 kVAr ve yakıt pilli sistemde de 6 kVAr olduğu görülmektedir. Son olarak boşa çalışan asenkron motor tork değerleri Şekil 5.47.c'de verilmektedir. Şekle göre elde edilen tork değeri test sisteminde 0 Nm ve yakıt pilli sistemde 1.3 sn'lik geçici hal süresinden sonra 0 Nm'dir. Böylece; boşa çalışan asenkron motor için nominal hız değerinde 0 Nm tork değeri KOYP'li AC enerji sisteminde de başarılı bir şekilde elde edilmiştir.



Şekil 5.47 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Aktif güç b–Reaktif güç c–Tork

Şekil 5.45.b'de görülen hız değerlerinin asenkron motora referans olarak verilmesi ile test ve KOYP'li sistemdeki AC motor nicelikleri Şekil 5.48.a–c'de verilmiştir. İlk şekilde sürekli çizgilerle ifade edilen test sistemine ve kesikli çizgilerle ifade edilen KOYP'li sisteme ait yük gerilimleri görülmektedir. Test sisteminde olması gereken 400 V'luk gerilim değeri elde edilmiştir. KOYP'li sistemde ise gerilimin ilk yüklenme seviyesi için sürekli hal değeri yaklaşık 4.2 sn sonra elde edilmeye başlanılmıştır. İkinci yüklenme 10. sn'de meydana gelmekte ve yük geriliminin toparlanma süresi 1 sn olarak kaydedilmiştir. Üçüncü ve dördüncü yüklenmeden sonra motor geriliminin nominal değeri sırasıyla 2.2 sn ve 1.4 sn olarak görülmektedir. Bu değerlere göre invertör denetleyicilerinin motor hız değişimlerine cevap zamanlarının kısa olduğu söylenebilir. Şekil 5.48.b'ye göre test sisteminde motor için stator akımının yüklenmelere bağlı olarak 20.5–27–34–42.6 A olduğu görülmektedir. İkinci "y" ekseninde görüldüğü gibi yakıt pilli enerji sisteminde stator akımı değerleri de test sistemi sonuçlarına eşittir. Şekil 5.48.c'de ise her iki sistem için yük barası frekans değerleri verilmektedir. Yakıt pilli sistemde yüklenmelere bağlı olarak ilgili sürelerde frekans sapmaları

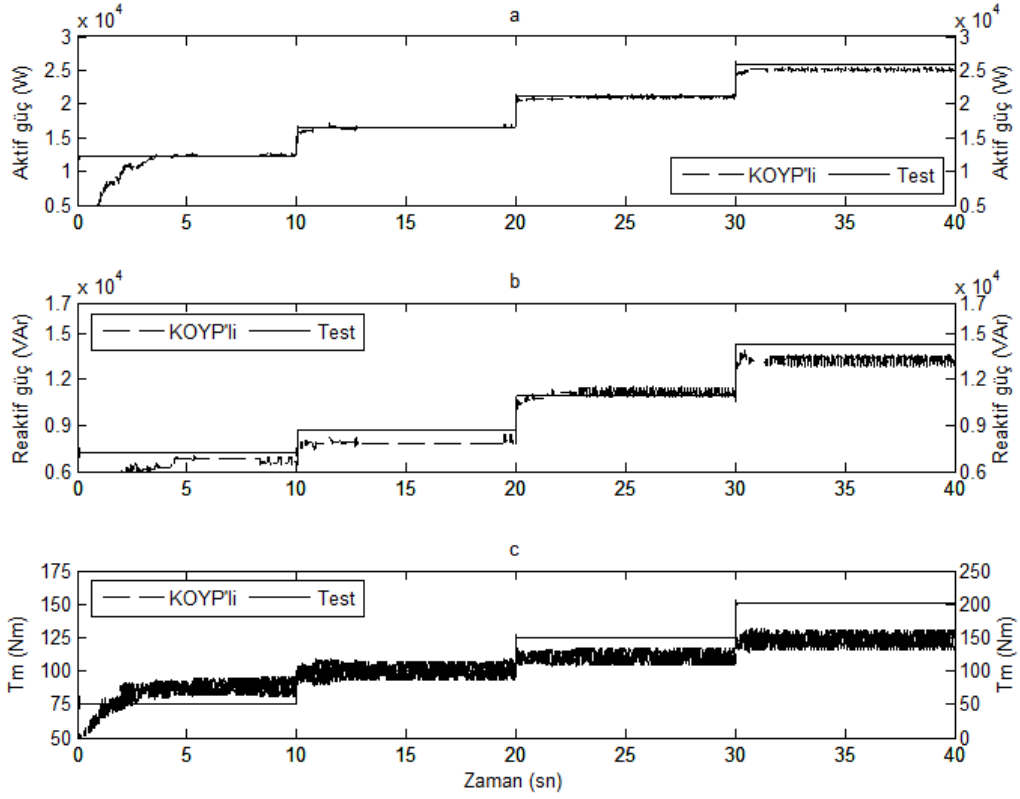
görülmektedir. Ancak bu sapma değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde olup oldukça kısa sürelidir. Dolayısıyla; nominal değer olan 50 Hz değeri her iki sistemde de başarılı bir şekilde elde edilmiştir.



Şekil 5.48 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Gerilim b–Akım c–Frekans

Şekil 5.49.a–c'de farklı hız değerlerinde çalışan asenkron motorun yük olarak kullanıldığı hem test hem de KOYP'li sistemin AC motor güç ve tork nicelikleri verilmiştir. İlk şekilde sürekli çizgilerle ifade edilen test sistemine ve kesikli çizgilerle ifade edilen KOYP'li sisteme ait yük aktif gücü değerleri görülmektedir. Aktif güç değerleri test sisteminde sırasıyla 12.3–16.5–21.1–25.8 kW olarak elde edilmiştir. Yakıt pilli sistemde aktif güç değerleri ilk üç yüklenme durumu için aynı olup son yüklenmedeki güç değeri 25.2 kW olarak ölçülmüştür. Son yüklenmedeki bu güç değeri nominal değerden % 2.43'lük bir sapma ile elde edilmiştir. Şekil 5.49.b'ye göre test sistemindeki motor için reaktif güç değerleri 7.2–8.7–11–14.3 kVAr ve yakıt pilli sistemde de olması gerekenden 1. 2. ve 4. yüklenmelerde düşük, 3. yüklenmede eşit ve olduğu görülmektedir. Bu duruma göre invertör reaktif güç denetleyicisinin aktif güç denetleyicisi kadar başarılı çalışmadığı söylenebilir. Son olarak zamanla değişen farklı

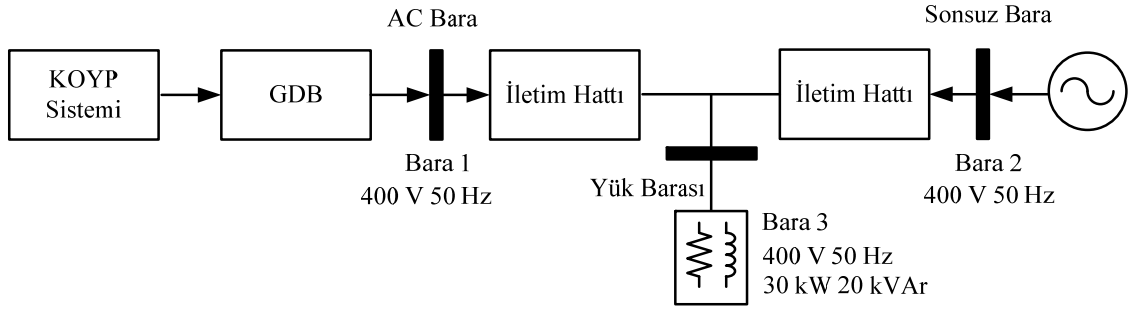
hız değerlerinde çalışan asenkron motor için tork değerleri Şekil 5.49.c'de verilmektedir. Şekle göre elde edilen tork değerleri test sisteminde 75–100–125–150 Nm'dir. İkinci "y" eksenine göre KOYP'li AC enerji sisteminde 3.2 sn sonra olması gereken tork değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.49 Asenkron motorlu test ve KOYP'li sistemin AC motor nicelikleri a–Aktif güç b–Reaktif güç c–Tork

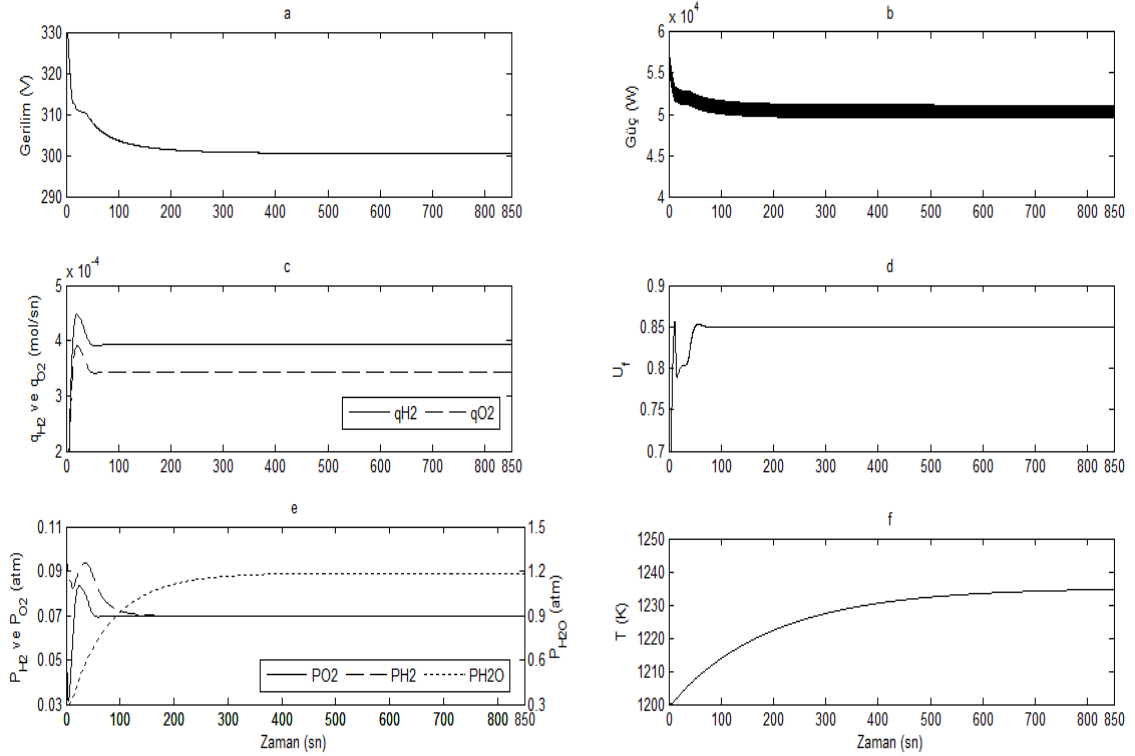
### 5.6.2.5 AC üç baralı KOYP'li enerji sistemi

Bu uygulamada KOYP modeli ve GDB'nin çoklu baralı sistem davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bara–1 olarak KOYP'li AC güç kaynağı, Bara–2 olarak sonsuz bara ve Bara–3 olarak AC omik–endüktif yükün bulunduğu bara belirlenmiştir. GDB ve 3 km'lik iki adet iletim hattı yapısından sonra sonsuz bara bağlantısı gerçekleştirilmiştir. İletim hattı ortasına da 30 kW–20 kVAr güç parametrelerine sahip omik–endüktif yük bağlanılmıştır. Üç baralı omik–endüktif yüklü sisteme ait blok diyagram Şekil 5.50'de verilmiştir.



Şekil 5.50 Üç baralı omik–endüktif yüklü sisteme ait blok diyagram

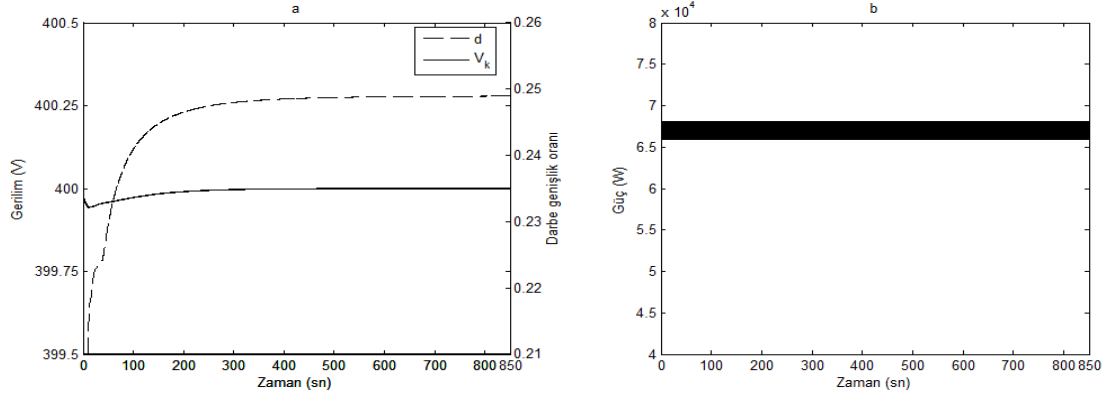
PI denetleyici katsayıları sırasıyla konvertör için  $K_p=1.6$  ve  $K_i=0.02$ , invertör aktif güç denetimi için  $K_p=0.001$  ve  $K_i=5$  ve reaktif güç denetimi için de  $K_p=0.012$  ve  $K_i=0.002$  şeklindedir. Şekil 5.51.a–fde AC anahtarlamalı omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde KOYP için sırasıyla gerilim, güç,  $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı, yakıt kullanım faktörü,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $O_2$  kısmi basınçları ve sıcaklık nicelikleri verilmiştir. Benzetim sonuçları 850 sn süresince elde edilmiştir. KOYP yığın gerilimi 300 V, yığın gücü 50 kW,  $H_2$  akış hızı 0.39 mol/s,  $O_2$  akış hızı 0.34 mol/s, yakıt kullanım faktörü ( $U_f$ ) 0.85,  $H_2O$  kısmi basıncı 1.2 atm,  $H_2$  ve  $O_2$  kısmi basıncı 0.07 atm ve sıcaklık 1235 °K olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.51 Üç baralı AC enerji sisteminde KOYP nicelikleri a–Gerilim b–Güç c– $H_2$  ve  $O_2$  akış hızı d– $U_f$  e– $P_{H_2O}$ ,  $P_{H_2}$  ve  $P_{O_2}$  f–Sıcaklık

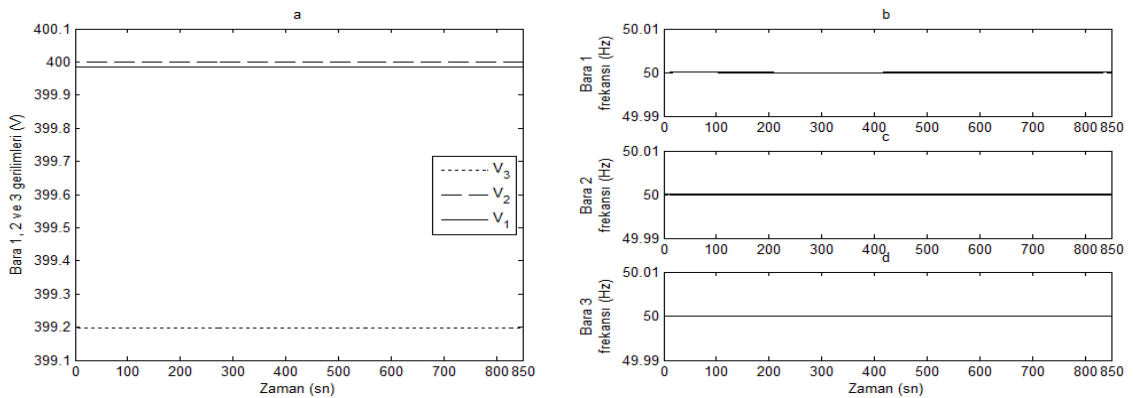


Şekil 5.52.a–b'de omik–endüktif yük bağlı, üç baralı enerji sisteminde çıkış gerilimi, darbe genişlik oranı ve çıkış gücü olmak üzere DC–DC yükseltici konvertör nicelikleri verilmiştir. Konvertör çıkış gerilimi her iki yük seviyesinde 400 V'tur. Darbe genişlik oranı 0.249 ve DC çıkış gücü 67 kW olarak elde edilmiştir.



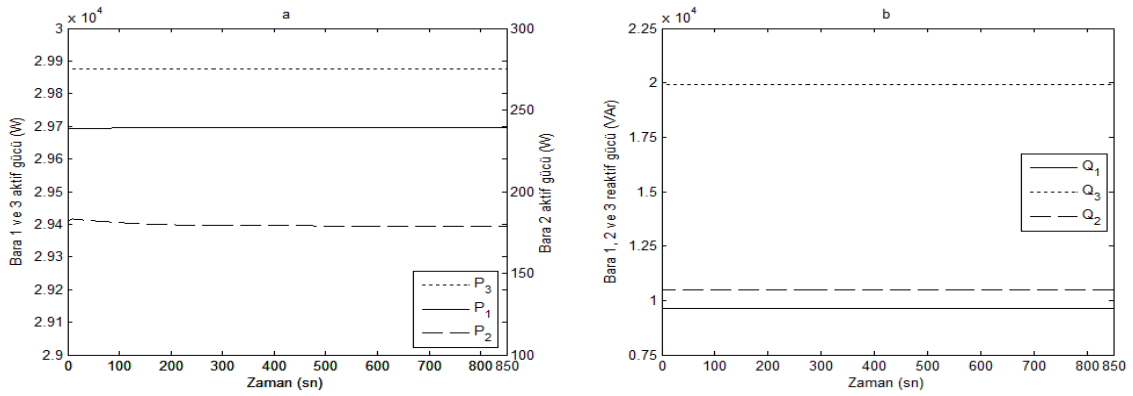
Şekil 5.52 Üç baralı AC enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç

Şekil 5.53.a–b'de omik–endüktif yük bağlı, üç baralı enerji sisteminde; rms olarak bara gerilimleri ve bara frekansları olmak üzere AC sistem nicelikleri verilmiştir. Şekil 5.53.a'da GDB barasındaki, sonsuz baradaki ve yük barasındaki gerilimlerin etkin değerleri sırasıyla 399.99 V, 400 V ve 399.2 V olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.53.b'ye göre üç baranın ayrı ayrı frekans değerleri 50 Hz olarak elde edilmiştir. Senkronizasyon bozulmamış ve sistem nominal koşullarda çalışmaktadır.



Şekil 5.53 Üç baralı AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a–Bara 1, 2 ve 3'ün gerilimi b–Bara 1, 2 ve 3'ün frekansı

Şekil 5.54.a–b'de omik–endüktif yük bağlı, üç baralı enerji sisteminde; bara aktif ve reaktif güçleri verilmektedir. Şekil 5.54.a'da GDB barasından, sonsuz baradan ve yük barasından ölçülen aktif güç değerleri; sırasıyla 29.7 kW, 0.18 kW ve 29.99 kW olarak elde edildiği görülmektedir. Şekil 5.54.b'de üç baradan ayrı ayrı ölçülen reaktif güç değerleri, sırasıyla 9.65 kVAr, 10.4 kVAr ve 20 kVAr'dır. Bu sonuçlara göre; KOYP bağlı AC baradan ve sonsuz baradan üçüncü bara olan yük barasına güç akışı olmaktadır. Yük gücü istenilen değerlere ulaşmış ve çoklu–baralı sistem çalışması gerçekleştirilmiştir.

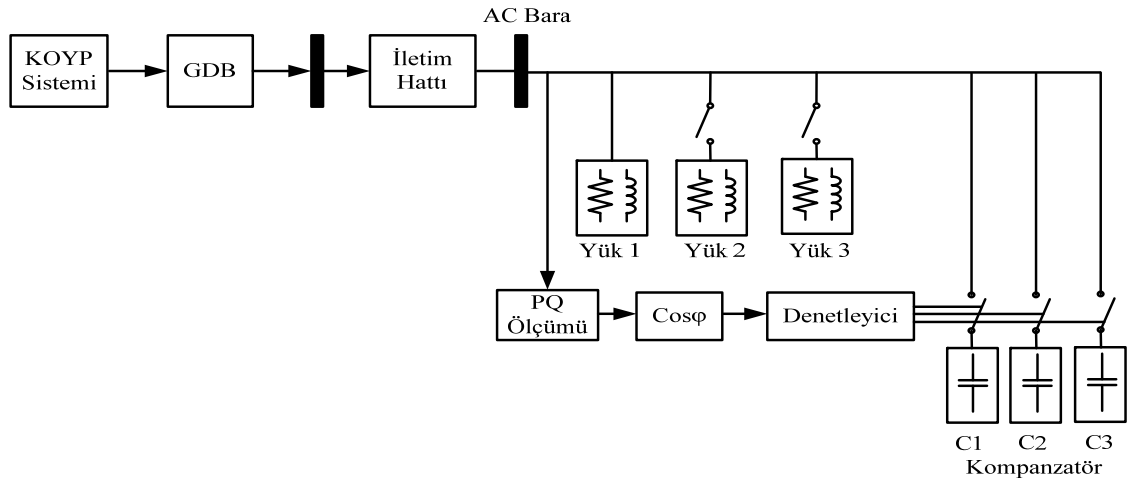


Şekil 5.54 Üç baralı AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a–Bara 1, 2 ve 3'ün aktif gücü b–Bara 1, 2 ve 3'ün reaktif gücü

#### 5.6.2.6 KOYP'li enerji sisteminde geleneksel yöntemle reaktif güç kompanzasyonu

Bu uygulamada KOYP bağlı AC enerji sisteminde röleli reaktif güç kompanzasyonu amaçlanmıştır. Röleli kompanzasyon yapılmış sisteme ait blok diyagram Şekil 5.55'te verilmiştir. GDB ve iletim hattı yapısından sonra üç adet omik–endüktif yük ve kompanzator bloğu AC baraya bağlanılmıştır. AC bara güç değerleri Çizelge 5.2'de verilmektedir. Çizelgeye göre Yük 1; bütün benzetim süresince, Yük 3 ise 14. saniyeden sonraya devreye girmekte ve benzetim süresi bitene kadar devrede kalmaktadır. Yük 2 8. saniyede devreye girmekte ve 20. saniyede devreden çıkmaktadır. Böylelikle sistemde yük değişimi sağlanmaktadır. Bu yapıya göre yük barasına aynı reaktif güç değerlerinde sabit kondansatörlerden oluşan kompanzator de bağlanmaktadır. Güç faktörü temelli denetleyici reaktif güç kontrol rölesi gibi çalışmaktadır. Yüklerin devreye girip çıkmasına göre yük barasından ölçülen aktif ve reaktif güce bağlı olarak güç faktörü ( $\cos \phi$ ) hesaplanılır. Güç faktörünün 1'den küçük olması sistemin endüktif, büyük olması ise kapasitif çalıştığını göstermektedir. Bu değerın 1 olması durumunda

ise aktif güç görünür güce yaklaştırılmakta ve reaktif enerjiden kaynaklanan olumsuzluklar giderilebilmektedir.

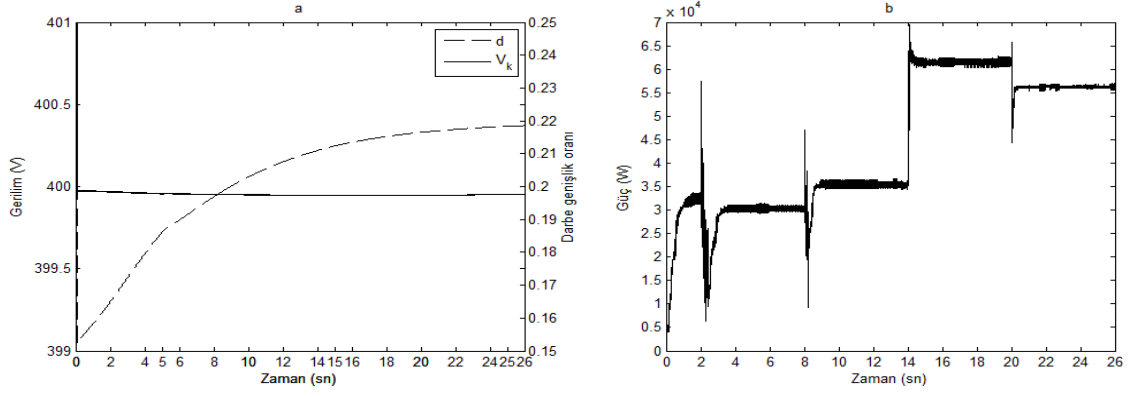


Şekil 5.55 Röleli kompanzasyon yapılmış sisteme ait blok diyagram

Çizelge 5.2 AC bara güç değerleri

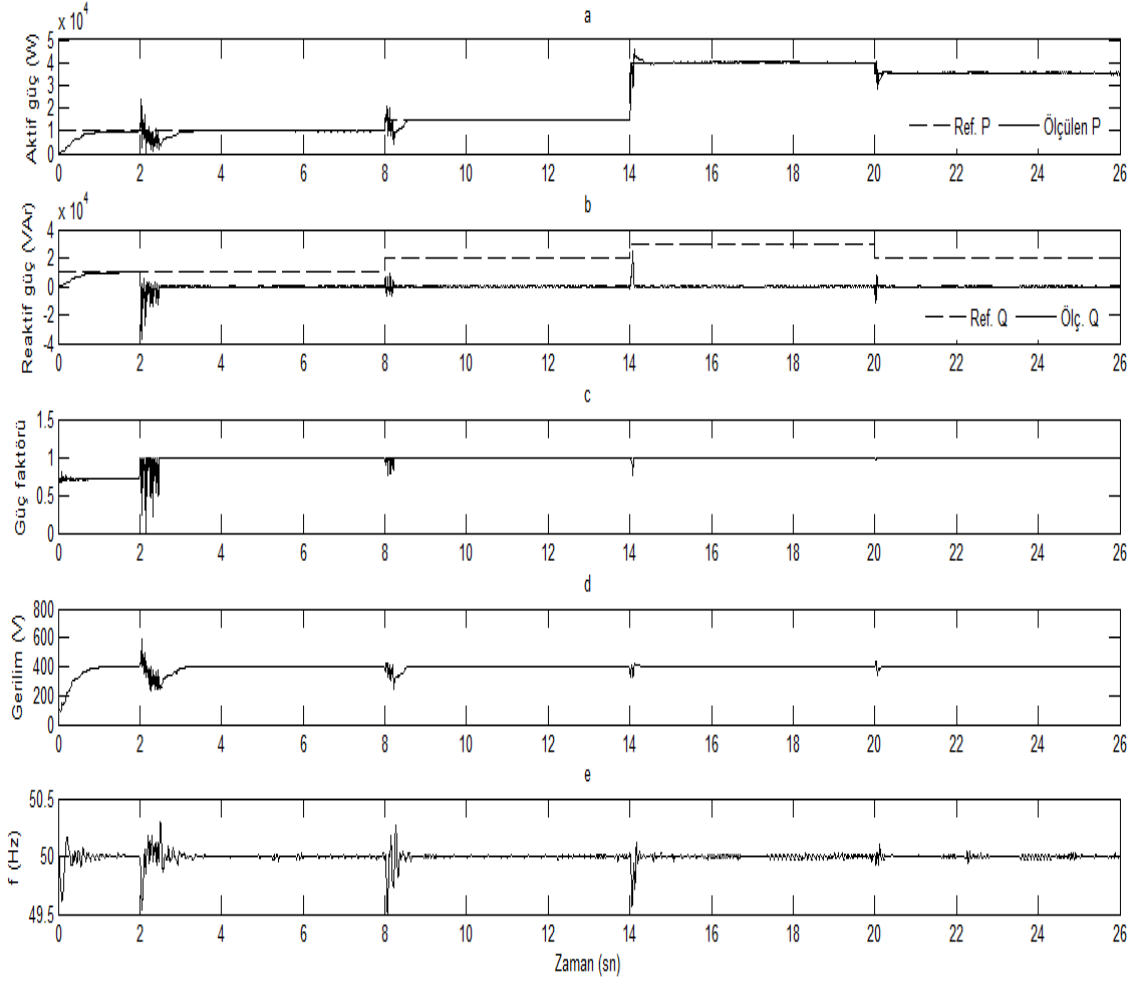
Yükler	Aktif güç (kW)	Reaktif güç (kVAr)	Zaman (sn)
Yük 1	10	10	0–26
Yük 2	5	10	8–20
Yük 3	25	10	14–26

PI denetleyici katsayıları sırasıyla konvertör için  $K_p=1.6$  ve  $K_i=0.02$ , invertör aktif güç denetimi için  $K_p=0.05$  ve  $K_i=20$  ve reaktif güç denetimi için de  $K_p=0.01$  ve  $K_i=0.01$  şeklindedir. Şekil 5.56.a–b'de reaktif güç kontrol rölesi temelli kompanzasyonu yapılmış enerji sisteminde DC–DC yükseltici konvertör nicelikleri verilmiştir. Benzetim sonuçları 26 sn süresince elde edilmiştir. Şekil 5.56.a'ya göre konvertör çıkış gerilimi 400 V ve darbe genişlik oranı da 0.219 olarak elde edilmiştir. Konvertör çıkış gücü ise ilk 2 sn süresince 32.5 kW, 2–8 sn süresince 30 kW, 8–14 sn süresince 35 kW, 14–20 sn süresince 61.5 kW ve 20–26 sn süresince de 56 kW olarak görülmektedir.



Şekil 5.56 Röleli kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde DC–DC konvertör nicelikleri a–Gerilim ve darbe genişlik oranı b–Güç

Şekil 5.57.a–d'de kompanzasyon yapılmış enerji sisteminde; yük barası aktif gücü, reaktif gücü, güç faktörü ve gerilimi olmak üzere yük barası nicelikleri verilmiştir. Şekil 5.57'ya göre ilk 2 sn kompanzasyon yapılmamış sistem sonuçları verilmektedir. Şekil 5.57.a'da Çizelge 5.2'de verilen referans güç değerlerinin başarılı bir şekilde elde edildiği görülmektedir. İlk 8 sn süresince 10 kW'lık yük devrededir. 8. sn'de 5 kW'lık yükün devreye girmesiyle bara aktif gücü 14. sn'ye kadar 15 kW, 14. sn'de 25 kW'lık yükün devreye girmesiyle toplam aktif güç 40 kW olmaktadır. Yük 2'nin 20. sn'de devreden çıkmasıyla yük barası toplam aktif gücü 35 kW olmaktadır. Şekil 5.57.b'ye göre yük barasından ölçülen reaktif güç ilk 2 sn kompanzasyon yapılmadığı için yük aktif gücüne eşit olan 10 kVAr değerini göstermektedir. Bu süreden sonra kompanzator devreye girdiğinden dolayı ölçülen reaktif güç değeri 0'dır. Böylelikle sistem aktif gücü görünür güce eşitlenmiş ve Şekil 5.57.c'de de görüldüğü gibi güç faktörü 1 olarak elde edilmiştir. Anahtarlama sırasında meydana gelen dalgalanmalar kısa sürede giderilmektedir. Ayrıca kompanzasyon yapılmayan 2 sn'lik süre içerisinde güç faktörü 0.71 değerindedir. Son olarak yük barasındaki gerilimin etkin değeri anahtarlama olmasına rağmen nominal değer olan 400 V ve frekans değeri 50 Hz olarak elde edildiği görülmektedir. Bir alternatif akım iletim sisteminin kalitesi; güç faktörünün 1'e yakın olması, harmonik miktarının en aza indirilmesi, gerilim ve frekansın kararlılığı, faz gerilimi ve akımlarının dengeli olması ile anlaşılmaktadır. Aktif ve reaktif güç değerlerinin istenilen değerlere ulaştığı, invertör aktif–reaktif güç denetiminin ve reaktif güç kompanzasyonunun başarıyla yapıldığı şekillerden açıkça görülmektedir.



Şekil 5.57 Röleli kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a– Aktif güç b–Reaktif güç c–Güç faktörü d–Gerilim e-Frekans

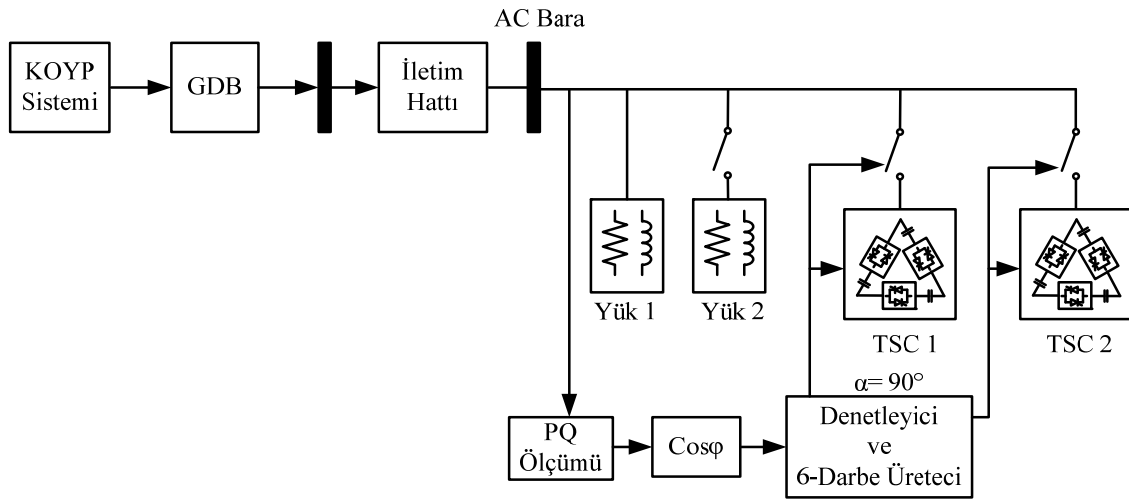
### 5.6.2.7 KOYP'li enerji sisteminde TAK ile reaktif güç kompanzasyonu

Esnek AC İletim Sistemleri; şebekenin yüksek gerilim kısmı ile güç elektroniği elemanlarını ve yöntemlerini birleştiren elektronik reaktif güç denetleyici yapılarıdır. EACİS teknolojisi 1980'lerde Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü'nde (Electric Power Research Institute) gerçekleştirilen yeni bir yapıdır. Güç elektroniğinin yüksek akım ve gerilim ile ilgilenen kısmında meydana gelen hızlı ve önemli gelişmelerden yararlanan yöntemleri göz önünde bulunduran EACİS'ler; şebekenin yüksek gerilim kısmındaki geçici ve sürekli durumların her ikisinde de güç akışı denetimini arttırmayı amaçlamaktadır [84].

Tristör anahtarlama kapasitör modern kompanzasyon tekniklerinin yük barasına paralel olarak bağlanan çeşitlerinden birisidir. Şekil 5.58'de verilen TAK yapısı; alternatif akım kıyıcı ile buna seri bağlı bir kapasitörden meydana gelmektedir. Birden fazla TAK yapısı (güçleri birbirlerine yaklaşık eşit seçilerek) aynı yük barasına paralel olarak bağlanmaktadır. Reaktif güç üretimi arttıkça tristörler tetiklenerek ihtiyaç duyulan sayıda TAK devreye alınabilmektedir. Üç fazlı sistemlerde TAK birimleri üçgen ( $\Delta$ ) veya yıldız (Y) olarak bağlanabilmektedirler. Fakat üçgen bağlantı en uygun seçim olmaktadır [85]. Çünkü kompanzasyon gücünün ve kapasitans değerinin aynı olduğu koşullarda yıldız bağlı devredeki tristörler içinden geçen akım değeri, üçgen bağlı devredeki tristörler içinden akan akım değerinin  $\sqrt{3}$  katıdır. Ayrıca yıldız bağlı devrede kapasitör anahtarılandığı zaman nötr hattı akımının genlik değeri oldukça büyük bir değere ulaşmaktadır. Nötr hattı bu değerdeki bir akımı taşıyamadığı durumda da çok büyük bir gerilim meydana gelecektir. Bu koşullarda diğer kapasitör bankaları uzun bir süre anahtarlama yapabilir [86].

TAK yapısındaki kondansatör üzerine uygulanan gerilim tepe değerine ulaştığında veya bu değere yakın noktada iken tristör tetiklenmektedir. Böylece kapasitör akımının en düşük olduğu anda tristör iletme sokulmuş olmaktadır. Bu şekilde bir tetikleme yöntemi kullanılarak açma–kapama anlarında oluşan geçici olaylar ve aşırı gerilimler önlenmiş olmaktadır [86–89]. TAK'ler Aç–Kapa denetimi ile çalışmakta ve sadece gerilim tepe değerlerine karşılık gelen  $90^\circ$ 'de tetiklenmektedirler. Bu anahtarlama seviyesi her fazın sıfır geçişlerinden sonra gelen ilk tepe değerlerine karşılık gelmektedir. TAK'lerin kullanım amacı geleneksel sistemde kontaktörlerin yerine elektronik anahtarlar olan tristörlerin kullanılmasıyla sistemde istenmeyen harmoniklerin üretimini engellemektir. TAK'ler harmonik üretmedikleri gibi filtreye ihtiyaç olmadan harmonik sönümlemesi de yapabilmektedirler. Ayrıca geleneksel yöntemde anahtarlama sırasında meydana gelen arklar; mekanik anahtarların ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir. Böyle bir durum TAK'lerde bulunmamaktadır ve TAK mevcut enerji sistemine uyumlu olarak çalışabilmektedirler. Sistemden yük çıkarılması durumunda denetleyici sistemin kapasitif çalıştığını algılayacak ve tetik bilgisini kesecektir. Ancak tristörler bir kere tetiklendikten sonra kesime gidebilmeleri için tetikleme işaretinin kesilmesi yeterli olmamaktadır. Bu sebeple; TAK'li kompanzatörün seri anahtarlama yöntemiyle anot–katot akımı kesilmelidir. Bölüm 5.6.2.6'dan farklı olarak bu sistemdeki denetleyici aynı zamanda tristör anot–katot akımının kesilmesini

de denetleyecektir. Bu uygulamada KOYP bağı AC enerji sisteminde tristörlü reaktif güç kompanzasyonu amaçlanmıştır. Üzerinde çalışılan devreye ait blok diyagram Şekil 5.58'de gösterilmiştir. GDB ve iletim hattı yapısından sonra iki adet üçgen bağlı seri omik–endüktif yük ve TAK'li kompanzator bloğu AC baraya bağlanılmıştır. AC bara güç değerleri Çizelge 5.3'te verilmektedir. Çizelgeye göre Yük 1; bütün benzetim süresince, Yük 2; 10. saniyede devreye girmekte ve 15. saniyede devreden çıkmaktadır. Böylelikle sistemde yük değişimi sağlanmaktadır. Bu yapıya göre yük barasına aynı reaktif güç değerlerinde tristör anahtarlamalı kondansatörlerden oluşan kompanzator de bağlanmaktadır. Güç faktörü temelli denetleyici altı–darbe üretici ile tristörlerin için tetikleme işaretini oluşturmaktadır.



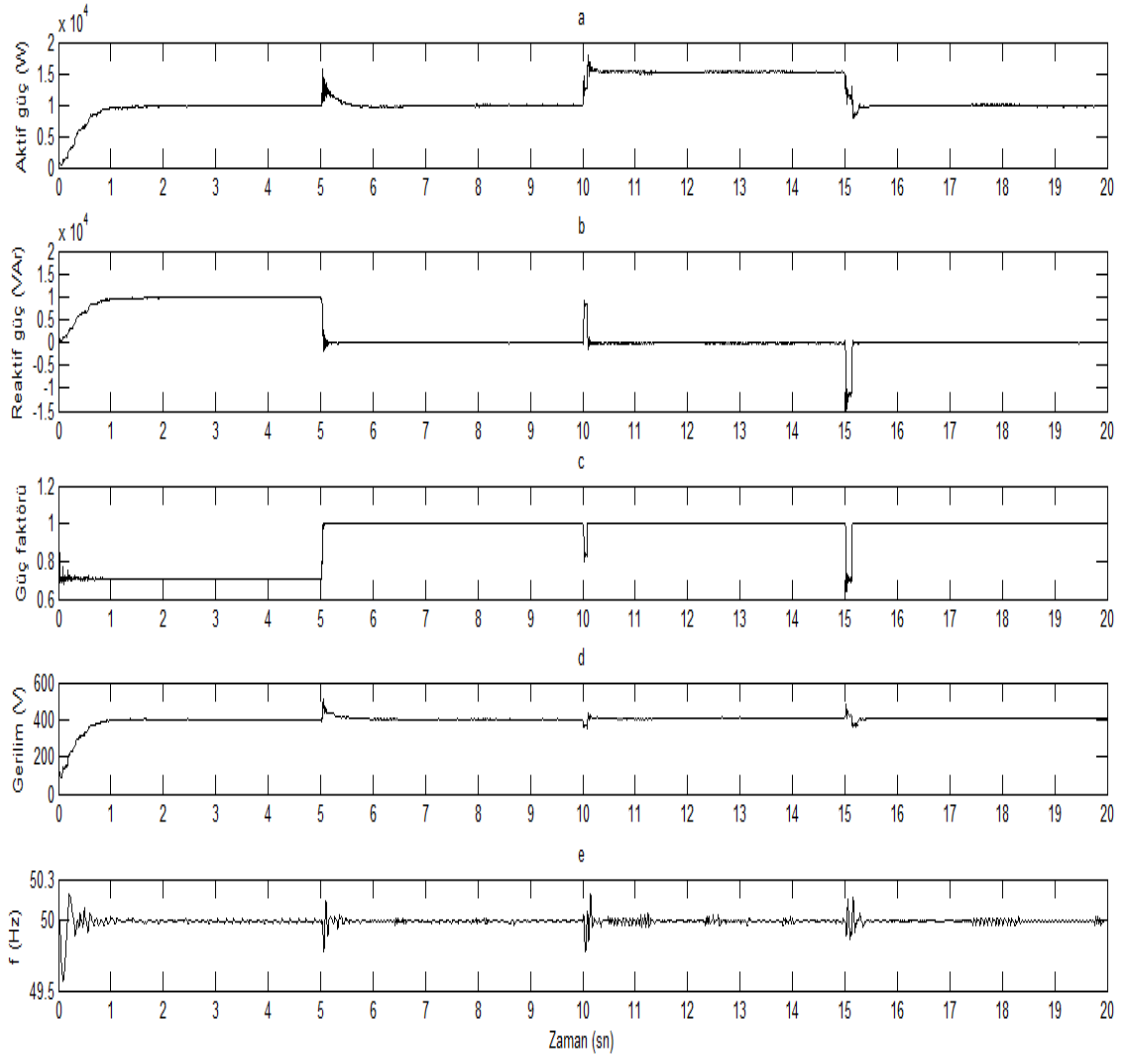
Şekil 5.58 TAK'li kompanzasyon yapılmış sisteme ait blok diyagram

Çizelge 5.3 AC bara güç değerleri

Yükler	Aktif güç (kW)	Reaktif güç (kVAr)	Zaman (sn)
Yük 1	10	10	0–20
Yük 2	5	10	10–15

PI denetleyici katsayıları; invertör aktif güç denetimi için  $K_p=0.05$  ve  $K_i=20$  ve reaktif güç denetimi için de  $K_p=0.01$  ve  $K_i=0.01$  şeklindedir. Benzetim sonuçları 20 sn süresince elde edilmiştir. Şekil 5.59.a–d'de TAK ile kompanzasyon yapılmış enerji sisteminde; yük barası aktif gücü, reaktif gücü, güç faktörü, gerilimi ve frekansı olmak üzere yük barası nicelikleri verilmiştir. Şekil 5.59.a'ya göre ilk 5 sn kompanzasyon yapılmamış sistem sonuçları verilmektedir. Şekil 5.59.a'da Çizelge 5.3'te verilen

referans aktif güç değerlerinin elde edildiği görülmektedir. İlk 10 sn süresince 10 kW'lık yük devrededir. 10. sn'de 5 kW'lık yükün devreye girmesiyle bara aktif gücü 15. sn'ye kadar 15 kW, Yük 2'nin 15. sn'de devreden çıkmasıyla yük barası toplam aktif gücü 10 kW olmaktadır.

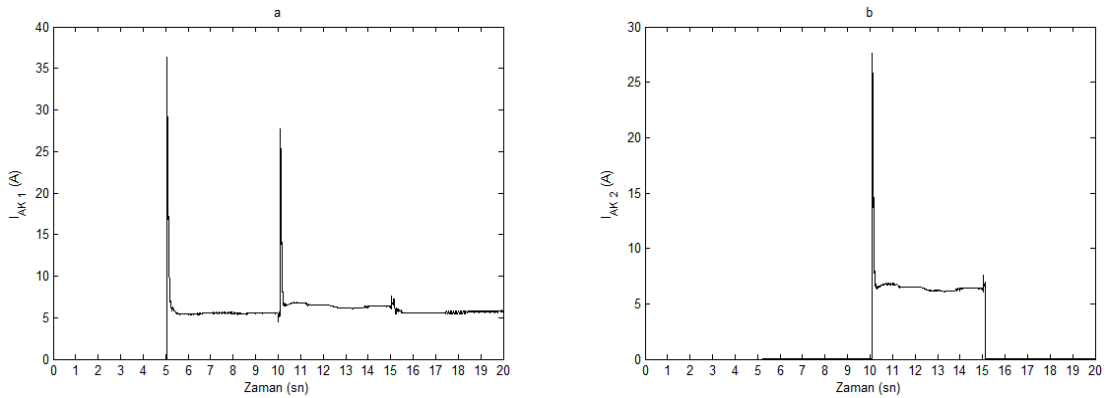


Şekil 5.59 TAK'li kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde AC bara nicelikleri a– Aktif güç b–Reaktif güç c–Güç faktörü d–Gerilim e-Frekans

Şekil 5.59.b'ye göre yük barasından ölçülen reaktif güç ilk 5 sn kompanzasyon yapılmadığı için yük reaktif gücüne eşit olan 10 kVar değerini göstermektedir. Bu süreden sonra kompanzasyon devreye girdiğinden dolayı ölçülen reaktif güç değeri 0'dır. Böylelikle sistem aktif gücü görünür güce yaklaştırılmış ve Şekil 5.59.c'de de görüldüğü gibi güç faktörü 1 olarak elde edilmiştir. Anahtarlama sırasında meydana gelen dalgalanmalar kısa sürede giderilmektedir. Ayrıca kompanzasyon yapılmayan 5 sn'lik



süre içerisinde güç faktörü 0.71 değerindedir. Son olarak yük barasındaki gerilimin etkin değeri anahtarlama olmasına rağmen nominal değer olan 400 V ve frekans değeri 50 Hz olarak elde edildiği görülmektedir. Aktif ve reaktif güç değerlerinin istenilen değerlere ulaştığı, invertör aktif–reaktif güç denetiminin ve TAK ile reaktif güç kompanzasyonunun başarıyla yapıldığı şekillerden açıkça görülmektedir. Şekil 5.60.a–b'de ise sırasıyla TAK 1 ve TAK 2 yapısında bulunan tristörlerin biri üzerinden geçen akım dalga formları görülmektedir. Yük 1 benzetim süresince devrede bulunduğundan dolayı onu kompanze edecek olan TAK 1 tristörü de sürekli iletimde kalmaktadır. İlk 5 sn kompanzasyon yapılmayan süre olduğu için burada tristör açık devredir. Benzer şekilde Şekil 5.60.b'de de TAK 2 yapısındaki tristör akımına göre 10. sn'de ikinci yük devreye girmesiyle birlikte güç faktöründeki düşüş algılanmakta ve TAK 2 devreye girmektedir. Bu durumda TAK 2 tristörü kısa devre olmakta ve üzerinden akım geçirmektedir. 15. sn'de ise ikinci yükün devreden çıkmasıyla birlikte sistem kapasitif duruma geçmekte ve denetleyici vasıtasıyla ikinci kompanzator de devreden çıkarılmaktadır. Bu aşamadan sonra tristör açık devre olmakta üzerinden akım geçmemektedir. Böylece; hem TAK'lerin hem de devre kesicilerin denetimi gerçekleştirilmiş olmaktadır.

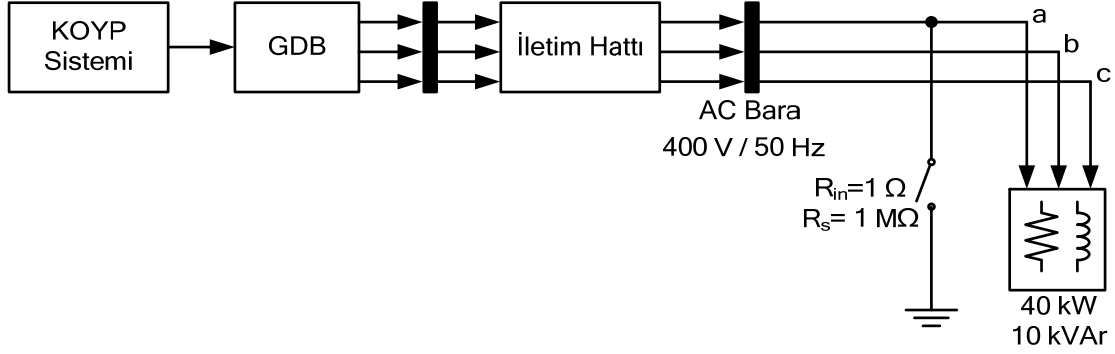


Şekil 5.60 TAK'li kompanzasyon yapılmış AC enerji sisteminde TAK nicelikleri a–TAK 1'deki tristör akımı b–TAK 2'deki tristör akımı

### 5.6.2.8 KOYP'li enerji sisteminde arıza durumunun incelenmesi

Bu uygulamada KOYP modeli ve GDB'nin yük barasında meydana gelebilecek tek faz–toprak arızası durumundaki davranışı incelenmiştir. İletim hattından sonra 40 kW–10 kVAr güç parametrelerine sahip omik–endüktif yük AC baraya bağlanılmıştır. Arıza

durumunun incelendiği sisteme ait blok diyagram Şekil 5.61'de verilmiştir. Bu şekle göre; arıza için kullanılan anahtarın iç direnci ve söndürme direnci parametrelerine sahip olduğu görülmektedir.

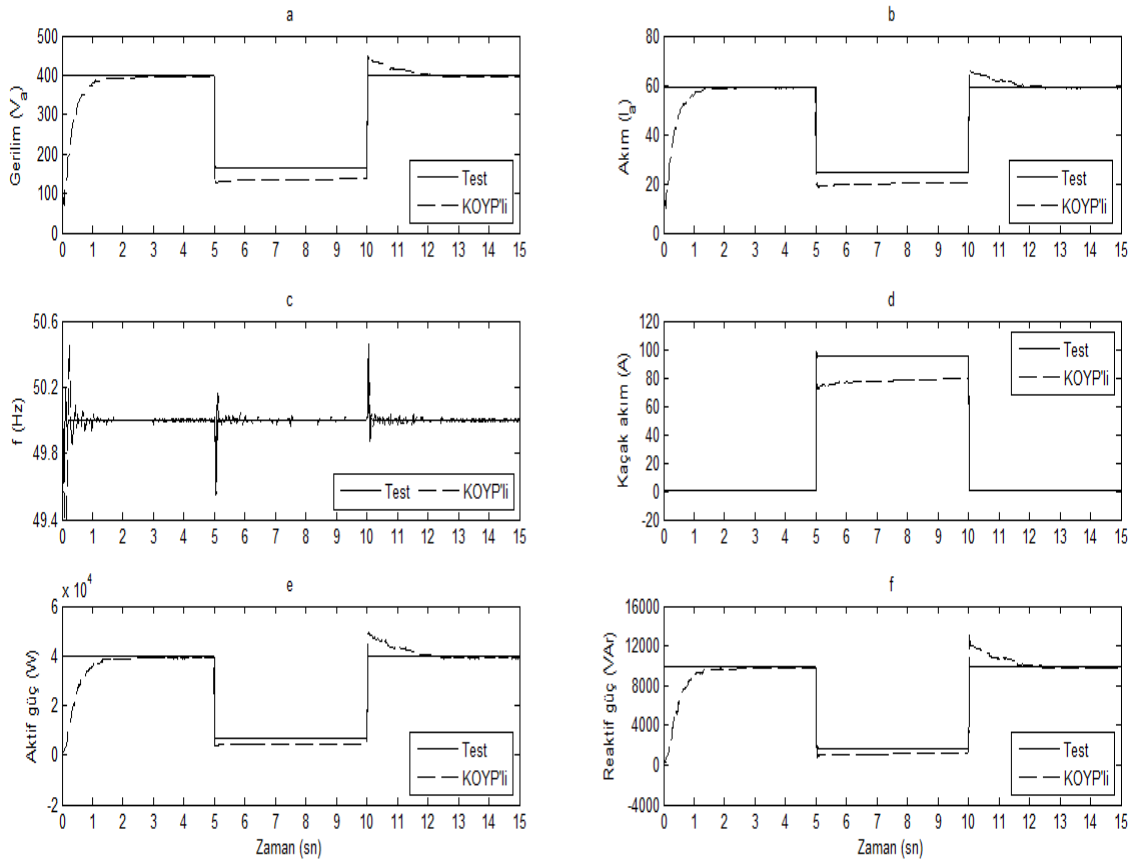


Şekil 5.61 Arıza durumunun incelendiği sisteme ait blok diyagram

Arıza durumunda KOYP'li AC güç kaynağının davranışını daha iyi görebilmek için benzetim ortamında ilk olarak bir test sistemi modellenmiştir. Bu modelde ideal AC güç kaynağı kullanılarak sonuçlar elde edilmiş ve yakıt pilli sistemden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. PI denetleyici katsayıları sırasıyla konvertör için  $K_p=1.6$  ve  $K_i=0.02$ , invertör aktif güç denetimi için  $K_p=0.01$  ve  $K_i=5$  ve reaktif güç denetimi için de  $K_p=0.012$  ve  $K_i=0.002$  şeklindedir. Şekil 5.62.a–f'de omik–endüktif yük bağlı enerji sisteminde arıza durumunda; rms olarak yük barası gerilimi, yük akımı, yük barası frekansı, arıza durumundaki kaçak akım, yük aktif gücü ve yük reaktif gücü olmak üzere yük barası nicelikleri verilmiştir. Benzetim sonuçları 15 sn süresince elde edilmiştir. İlk 5 sn süresince sistem normal çalışma, 5–10 sn aralığında "a" fazında meydana gelen tek faz–toprak arızalı çalışma ve son olarak 10–15 sn aralığında arızanın giderildiği normal çalışma koşullarındadır.

Şekil 5.62.a'da sürekli çizgilerle ifade edilen test sistemine ve kesikli çizgilerle ifade edilen KOYP'li sisteme ait yük gerilimleri görülmektedir. Hem test sisteminde hem de KOYP'li sistemde normal çalışma koşullarında nominal gerilim değeri olan 400 V yüke sağlanabilmiştir. Arızanın meydana gelmesiyle birlikte yük barasındaki "a" fazına ait gerilim değeri test sisteminde 163 V ve yakıt pilli sistemde 135 V olarak elde edilmiştir. Şekil 5.62.b'ye göre test ve KOYP'li sistemde arıza olmadığı sürece "a" fazı akımının 60 A olduğu açıkça görülmektedir. Arıza esnasında ise test sisteminde 24 A ve yakıt pilli sistemde 20 A'lık akım ölçülmüştür. Şekil 5.62.c'de ise yük barası frekans değerleri

verilmektedir. Nominal değer olan 50 Hz değeri her iki sistemde de başarılı bir şekilde elde edilmiş olup arıza durumunun frekans değerini etkilemediği görülmektedir. Sadece arızanın meydana gelmesi ve ortadan kalkması sırasında anlık salınımlar meydana gelmiştir. Şekil 5.62.d'de 10. sn'de "a" fazında faz–toprak arızası meydana gelmesinden sonra toprağa akan kaçak akım değeri test sisteminde 95 A ve KOYP'li sistemde 78 A olarak görülmektedir. Şekil 5.62.e ve Şekil 5.62.f'de sırasıyla yük barası tarafından çekilen aktif ve reaktif güç dalga formları verilmektedir. Normal çalışma koşullarında aktif güç değerleri hem test hem de yakıt pilli sistemde nominal değer olan 40 kW olarak elde edilmiştir. Arıza esnasında ise güç değeri düşerek test sisteminde 6.5 kW ve yakıt pilli sistemde 4.5 kW olmaktadır.



Şekil 5.62 AC enerji sisteminde tek faz–toprak arıza durumundaki yük barası nicelikleri  
a–Gerilim b–Akım c–Frekans d–Kaçak akım e–Aktif güç f–Reaktif güç

Son olarak Şekil 5.62.f'ye göre test ve yakıt pilli sistemde yük için reaktif güç değerleri arıza haricinde nominal değer olan 10 kVAr olduğu görülmektedir. Arıza esnasında ise test sisteminde 1.6 kVAr ve KOYP'li sistemde 1.1 kVAr olarak ölçülmüştür. Aktif ve reaktif güç değerlerinin istenilen değerlere ulaştığı ve invertör aktif–reaktif güç

denetiminin başarıyla yapıldığı şekillerden açıkça görülmektedir. Bu sonuçlara göre yakıt pilli enerji sisteminde 10. sn'de arızanın ortadan kalkmasıyla birlikte AC baranelikleri sürekli hale 2 sn sonra ulaşabilmektedir. Enerji sistemi için bu toparlanma süresi sistemdeki denetleyiciler de göz önünde bulundurulduğunda oldukça kısa bir süreçtir. Ayrıca test sistemi ile KOYP'li enerji sistemindeki ölçülen değerler arasındaki fark değerleri herhangi bir koruma cihazının çalışma sınırları arasında kalacak şekildedir. Ayrıca hem yakıt pili hem de invertör temelli bir güç kaynağından beslenen bir sistem için elde edilen sonuçların klasik sistemdeki sonuçlardan çok uzak olmaması ve aynı eğilimi göstermesi modelin şebeke bağlantılı çalışmalarını başarılı kılmaktadır.

## BÖLÜM VI

### SONUÇLAR

Doktora tezi kapsamında elde edilen kaynak araştırmasının bir kısmı “Dağıtılmış Enerji Sistemlerine Genel bir Bakış ve Türkiye’deki Potansiyel Durumu” başlıklı makale olarak EMO Bilim dergisinde yayınlanılmıştır [90]. Tez kapsamında ilk olarak 100 kW’lık KOYP için literatürde bulunan matematiksel modeller ve parametrelerden yola çıkılarak tüm gerilim kayıplarını ve ikinci derecen transfer fonksiyonuna sahip yakıt dönüştürücü birimini içeren termal dinamiklere sahip yeni bir model elde edilmiştir. Yakıt pili sistemi çıkışındaki DC işareti daha yüksek bir gerilim seviyesine yükseltmek, invertör için sabit giriş gerilimi sağlamak ve yakıt pili sistemi ile invertör arasında yalıtımı sağlamak için DC-DC yükseltici konvertör hem matematiksel hem de elektriksel devre olarak temel topolojiye göre modellenmiştir. Son olarak AC yükler için gerekli olan AC işareti elde etmek için de altı IGBT anahtarlı invertör elektriksel devre olarak tasarlanmıştır. Bu iki güç elektroniği yapısı, trafo ve filtre güç düzenleyici birimini oluşturmaktadır. KOYP sistemindeki yakıt dönüştürücü birimi ve güç düzenleme biriminin denetimi için I ve PI denetleyicileri kullanılmıştır. Konvertör çıkışı 400 V<sub>DC</sub> ve invertör çıkışı da 400 V<sub>AC</sub>-50 Hz parametrelerine sahiptir. İnvörtörün denetimi Park dönüşümü temelli aktif-reaktif güç yönetimi sağlanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmaların tümü şebeke bağlantılı durum için yapılmıştır. GDB ve şebeke arasında senkronizasyonun sağlanması için faz kilitlemeli döngü kullanılmıştır. Katı Oksit Yakıt Pili sisteminin enerji sistemleri uygulamaları Matlab/Simulink ortamında incelenmiştir.

Elde edilen dinamik modeli yakıt kullanım faktörü sınırlamasız ve sınırlamalı olarak incelenmiştir.  $U_f$  sınırlamasız modeli test etmek amacıyla ilk olarak zaman anahtarlama DC yükü takip edebilme yeteneği incelenmiştir. Daha sonra, bu yakıt pili sisteminin AC testi için elektriksel devre olarak modellenen GDB ile sonsuz baralı bir enerji sisteminin bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Yük akımındaki artış KOYP'nin çıkış geriliminde düşüşe neden olmaktadır.
- Yakıt pili yığın gerilimi hariç diğer nicelikler yük gücü ile orantılı olarak değişmektedir.

- Yığın sıcaklığının yük gücü değişimlerini takip edebilmesiyle Ref. [58]'de tasarlanan termal dinamik biriminin yeni geliştirilen KOYP sistemine başarılı bir şekilde uyarlandığı söylenebilir.
- AC bara sonuçlarına göre de yakıt pili sistemi için temel bir güç düzenleme birimi modellenmiş olmaktadır.

Son olarak  $U_f$  sınırlamalı yakıt pili modeli AC bara üzerinden omik bir yüke bağlanılmış ve sonuçlara göre şebeke senkronizasyonun sağlanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar SCI-Expanded'da taranan Int. Journal of Energy Research dergisinde yayınlanmak üzere kabul edilmiştir [91].

İkinci olarak diğer tüm AC bara uygulamaları için kullanılacak  $U_f$  sınırlamalı KOYP modelinin DC testi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar için DC yük tipi olarak adım, rampa, karma ve zaman anahtarlamalı yükler kullanılmıştır. Bu benzetim sonuçlarına göre;

- Yakıt pili dinamik sistemi nicelikleri yük gücü değişimlerini takip edebilmektedir.
- Özellikle rampa tipi yükte adım tipi yüke göre yakıt kullanım faktörünün geçici hal süresinin daha az olduğu görülmüştür.
- Böylelikle KOYP temelli DC güç kaynağı başarılı bir şekilde modellenmiştir.

Son elde edilen model için yapılacak AC uygulamalarda matematiksel konvertör kullanılmıştır. Çünkü; yakıt pili güç kaynağı 400 V'luk DC güç kaynağı olarak konvertör ile birlikte düşünülmüştür. Yakıt pili matematiksel modele sahip olduğu ve iki birim arasında herhangi bir dönüştürme bloğu kullanılmasına gerek olmadan bu yapıyı elde edebilmek için matematiksel konvertör ile çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca; elektriksel devre şeklindeki konvertör benzetim sürelerini oldukça fazla arttırmaktadır. Bu DC-DC yükseltici konvertörün hem adım hem de karma yük tipinde çıkış nicelikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Konvertör için tasarlanılan PI denetleyici yardımıyla darbe genişlik oranı değiştirilerek sabit 400 V'luk DC gerilim elde edilmiştir.

$U_f$  sınırlamalı KOYP modelinin AC testi için iletim hattı üzerinden sisteme sonsuz bara bağlanmış ve şebeke senkronizasyonun sağlandığı ve nominal gerilim değerlerinin elde edildiği gösterilmiştir. Daha sonra KOYP'li enerji sistemi farklı tipteki yüklerle bağlanarak AC çalışma koşulları incelenmiştir. Yük tipi olarak omik, anahtarlamalı omik-endüktif ve asenkron motor kullanılmıştır ve sonuç olarak;

- Yük çalışmalarında enerji sistemi için aktif-reaktif güç yönetimi de başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- Yakıt pili içeren bir AC enerji kaynağının üç fazlı şebeke üzerinden yüklerle bağlanması ile geleneksel enerji sistemine benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Bir sonraki çalışmada KOYP'li AC kaynak barası, sonsuz bara ve yük barası olmak üzere üç baralı enerji sistemi modellenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre;

- Çoklu-bara sistemlerinde yük akışı sağlanabilmiştir.

GDB ve iletim hattı yapısından sonra üç adet omik–endüktif yük ve kompanzatör bloğu AC baraya bağlanılarak KOYP bağlı AC enerji sisteminde röleli reaktif güç kompanzasyonu yapılmıştır. Güç faktörü temelli denetleyici reaktif güç kontrol rölesi gibi çalışmaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre;

- Kompanzasyon ile güç faktörü "1" olarak elde edilmiştir.
- Anahtarlama sırasında meydana gelen dalgalanmalar kısa sürede giderilmiştir.

Ayrıca aynı sistem için modern kompanzasyon tekniği olan Esnek AC İletim Sistemlerinden tristör anahtarlamalı kapasitörlü sistem de incelenmiştir. Anahtarlamalı kompanzatörler geleneksel kompanzasyonda kullanılan kontaktörlerin yerine tristörleri kullanmaktadır. Bu da kontaktörlerin açılıp kapanması sırasında oluşan ark olaylarını engellemektedir. Böylece kullanılan malzeme yapısında da tahribat olmamaktadır. Bu çalışmanın sonuçlarına dayanarak;

- Aç-Kapa denetimli kompanzatörlerin yakıt pilli enerji sistemlerinde de başarılı bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

- Ayrıca normal AC sistemlerinde yük barası gerilimi temelli çalışan TAK'lerin yakıt pili içeren invertörlü sistemlerde güç faktörü temelli çalışması önerilmektedir.

Son olarak; KOYP modeli ve GDB'nin yük barasında meydana gelebilecek tek faz-toprak arızası durumundaki davranışı incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarına göre;

- Yakıt pilli enerji sisteminde arızanın ortadan kalkmasıyla birlikte AC bara nicelikleri sürekli hale kısa bir süre sonra ulaşabilmektedirler.
- Ayrıca hem yakıt pili hem de invertör temelli bir güç kaynağından beslenen bir sistem için elde edilen sonuçların geleneksel sistemdeki sonuçlardan çok uzak olmaması ve aynı eğilimi göstermesi modelin şebeke bağlantılı çalışmalarını başarılı kılmaktadır.

KOYP ve GDB için Bölüm I'de yapılan önerilerden bir kısmı tez kapsamında gerçekleştirilmiştir. İleride yapılacak çalışmalar olarak; farklı elektronik anahtarlar içeren GDB tasarlanabilir. Elde edilen yakıt pili modeli başka dağıtılmış güç üreteçleri hibrit olarak araştırılabilir. GDB'nin YSA, bulanık mantık vb. adaptif yöntemler ile denetimi gerçekleştirilebilir.

Ülkemizde çok fazla uygulama alanı bulamayan KOYP sistemlerinin bu çalışma ile yakıt pili konusunda çalışma yapacak olanlara ve elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım alanlarında çalışmalarda bulunanlara katkıda bulunacağını umuyoruz.



## KAYNAKLAR

- [1] Gençođlu, M. T. ve Cebeci, M., Türkiye'nin enerji kaynakları arasında güneş enerjisinin yeri ve önemi, Türkiye Sekizinci Enerji Kongresi, Ankara, 2, 63–73, 8-12 Mayıs, 2000.
- [2] Ramakumar, R. and Chiradeja, P., Distributed generation and renewable energy systems, 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. IECEC'02, Washington DC, July 29–31, 2002.
- [3] Dicorato, M., Forte, G. and Trovato, M., Environmental–constrained energy planning using energy–efficiency and distributed–generation facilities, *Renewable Energy*, 33, 6, 1297–1313, June 2008.
- [4] Oates, C. D. M. et al, Power conditioning for solid oxide fuel cell, Int. Conf. on Power Electronics, Machines and Drives, UK, 12–17, April 16–18, 2002.
- [5] Lee, D. J. and Wang, L., Control of autonomous solid oxide fuel cells subject to sudden load variations, IEEE Transmission and Distribution Conf. and Exposition, Chicago, USA, 1–5, April 21–24, 2008.
- [6] Miao, Z. et al., Study of fuel cell power plant in power distribution system–part I: dynamic model, IEEE Power Engineering Society General Meeting, USA, 2, 2220–2225, June 6–10, 2004.
- [7] Sakhare, A. R. et al., Control of stand alone solid oxide fuel cell using fuzzy logic, 35<sup>th</sup> Southeastern Symp. on System Theory, Morgantown, USA, 473–476, March 16–18, 2003.
- [8] Sedghisigarchi, K. and Feliachi, A., Impact of fuel cells on load–frequency control in power distribution systems, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 21–1, 250–256, March 2006.
- [9] Lee, J. et al., A 10–kW SOFC Low–voltage battery hybrid power conditioning system for residential use, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 21–2, 575–585, June 2006.
- [10] Fleming, E. M. and Hiskens, I. A., Dynamics of a microgrid supplied by solid oxide fuel cells, IREP Symposium of Bulk Power System Dynamics and Control–VII. Revitalizing Operational Reliability Charleston, USA, 1-10, August 19–24, 2007.
- [11] Wang, C. and Nehrir, M. H., Short–time overloading capability and distributed generation applications of solid oxide fuel cells, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 22–4, 898–906, December 2007.

- [12] Auld, A. E. et al., Applications of one-cycle control to improve the interconnection of a solid oxide fuel cell and electric power system with a dynamic load, *Journal of Power Sources*, 179, 155–163, 2008.
- [13] Jurado, F. et al., Effect of a SOFC plant on distribution system stability, *Journal of Power Sources*, 170–179, 2004.
- [14] Jurado, F. et al., Modeling fuel cell plants on distribution system using identification algorithms, *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conf, MELECON'04*, Dubrovnik, Croatia, 1003–1006, May 12–15, 2004.
- [15] Jurado, F. and Valverde, M., Genetic fuzzy control applied to the inverter of solid oxide fuel cell for power quality improvement, *Electric Power System Research*, 93–105, 2005.
- [16] Sedghisigarchi, K. and Feliachi, A., Dynamic and transient analysis of power distribution system with fuel cells–Part II: Control and stability enhancement, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19, 429–433, 2004.
- [17] Steward, E. M., Tumilty, R., Fletcher, J., Lutz, A., Ault, G. and McDonald, J., Analysis of a distributed grid-connected fuel cell during fault conditions, *IEEE Transactions on Power Systems*, 25, 497–505, 2010.
- [18] Sedghisigarchi, K. and Feliachi, A., Control of grid-connected fuel cell power plant for transient stability enhancement, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, USA*, 1, 383–388, January 27–31, 2003.
- [19] Jurado, F. et al., Neural network control of grid-connected fuel cell plants for enhancement of power quality, *Bologna PowerTech Conf.*, Bologna Italy, June 23–26, 2003.
- [20] Hajizadeh, A. and Golkar, M. A., Fuzzy neural control of a hybrid fuel cell/battery distributed power generation system, *IET Renewable Power Generation*, 3, 402–414, 2009.
- [21] Park, S. Y. et al., A wide-range active and reactive power flow controller for a solid oxide fuel cell power conditioning system, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23–6, November 2008.
- [22] Colson, C.M. et al., Modeling a large-scale utility-interconnected solid oxide fuel cell power plant, *40th North American Power Symp. NAPS'08*, 1–5, Canada, 2008.
- [23] Uzunoglu, M. and Onar, O. C., Static VAR compensator based reactive power management for SOFC power plants, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 2367–2378, 2008.

- [24] Li, J. et al., Nonlinear identification of a DIR–SOFC stack using wavelet networks, *Journal of Power Sources*, 179, 673–682, 2008.
- [25] Sedghisigarchi, K. and Feliachi, A., Dynamic and transient analysis of power distribution system with fuel cells–Part I: Fuel cell dynamic model, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19, 423–428, 2004.
- [26] Baş, M. E., Katı oksit yakıt pilleri, Bitirme Tezi, Uludağ Üniv. Makine Müh. Blm., Bursa, 2005, <http://www.turkcadcam.net/rapor/yakit-pilleri/index.html>, 01.04.2007.
- [27] [http://www.normenerji.com.tr/yakit\\_hucre.asp](http://www.normenerji.com.tr/yakit_hucre.asp), 11.04.2007.
- [28] Gelen, A., Yakıt pilleri ve yakıt pilleri için güç sistemleri tasarımı, Doktora Programı Dönem Ödevi, Selçuk Üniv. FBE, Konya, 2007.
- [29] Thomas, S. and Zalowitz, M., Fuel cells–green power, [www.lanl.gov/orgs/mpa/mpa11/Green%20Power.pdf](http://www.lanl.gov/orgs/mpa/mpa11/Green%20Power.pdf), 09.05.2007.
- [30] Cook, B., Introduction to fuel cells and hydrogen technology, *Engineering Science and Education Journal*, 11–6, 205–216, 2002.
- [31] Booth, D., Understanding Fuel Cells, *Home Power*, 37–40, 1993.
- [32] EG&G Technical Services, Inc. Science Applications Int. Corp., *Fuel Cell Handbook*, 2002.
- [33] Gomatam, P. and Jewell, W., Fuel parameter and quality constraints for fuel cell DGs, *Proc. of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Dallas, USA, 1, 409–412, September 7–12, 2003.
- [34] Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F., Yakıt pilleri ve uygulamaları, *3E Electrotech Dergisi*, 100, 2002.
- [35] Barbir, F., *PEM Fuel Cells Theory and Practice*, Elsevier Academic Press, ISBN–10: 0–12–078142–5, 2005.
- [36] Rayment, C. and Sherwin, S., *Introduction to FC Technology*, University of Notre Dame, 2003.
- [37] Sayın, C. ve Çanakçı, M., Otomotiv dünyasında ideal enerji kaynağı: Yakıt pilleri, *MakineTek Dergisi*, 78, 2004.
- [38] Türker, B., İnan, A. ve Trabulus, S., Yakıt pili çeşitleri, *3E Electrotech Dergisi*, 126, 2004.
- [39] Kadirgan, F., Hidrojenli yakıt hücreleri teknolojilerinde son gelişmeler, *3E Electrotech Dergisi*, 104, 2003.
- [40] T–Raissi, A. et. al., Current technology of fuel cell systems, *Intersociety Energy Conversion Engineering Conf.*, USA, 1953–1957, 1997.

- [41] Ellis, M. W. et al., Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for 21st century, Proc. of the IEEE, 89, 12, 1808-1818, December 2001.
- [42] Yu, X. et al., Fuel cell power conditioning for electric power application: a summary, IET Electric Power Applications, 1–5, 643–656, 2007.
- [43] Laughton, M. A., Fuel cells, Engineering Science and Education Journal, 7–15, February 2002.
- [44] Ni, M. et al., Importance of pressure gradient in solid oxide fuel cell electrodes for modeling study, Journal of Power Sources, 183, 668–673, 2008.
- [45] Mueller, F. et al., Novel solid oxide fuel cell system controller for rapid load following, Journal of Power Sources, 172, 308–323, 2007.
- [46] Zhang, T. et al., Fuzzy Dynamic Modeling and Predictive Load Following Control of A Solid Oxide Fuel Cell Power System, IEEE Transmission and Distribution Conf. and Exposition, Chicago, USA, 231–237, April 21–24, 2008.
- [47] Qi, Y. et al., Nonlinear state space modeling and simulation of a SOFC fuel cell, Proc. of the American Control Conf., Minnesota, USA, 2534–2538, June 14–16, 2006.
- [48] Spakovsky, M. U. et al., Investigation of system and component performance and interaction issues for solid oxide fuel cell based auxiliary power units responding to changes in application load, The 29th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'03, USA, 1574–1579, November 2–6, 2003.
- [49] Sammes, N. M. and Boersma, R., Small-scale fuel cells for residential applications, Journal of Power Sources, 98–110, 2000.
- [50] Sedghisigarchi, K. and Feliachi, A., Control of grid-connected fuel cell power plant for transient stability enhancement, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, USA, 1, 383–388, January 27–31, 2003.
- [51] Tanrioven, M. and Alam, M. S., Modeling, control and power quality evaluation of a pem fuel cell based power supply for residential use, 39<sup>th</sup> IEEE Annual Meeting Industrial Applications Conf., Seattle, USA, 4, 2808–2814, October 3–7, 2004.
- [52] O'Hayre, R., Cha, S. W., Colella, W. and Prinz, F. B., Fuel Cell Fundamentals, John Wiley&Sons, ISBN–10=0–471–74148–5, USA, 2006.
- [53] Zhu, Y. and Tomsovic, K., Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells, Electric Power System Research, 62, 1–11, 2002.

- [54] Li, Y. H., Rajakaruna, S. and Choi, S. S., Control of a solid oxide fuel cell power plant in a grid-connected system, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22–2, 405–413, June 2007.
- [55] Kirubakaran, A., Nema, R. K. and Jain, S. K., Distributed generation by solid oxide fuel cell: a review, *IEEE Int. Conf. Power System Technology and Power India Conference, POWERCON'08, New Delhi, India, 1-7, October 12-15, 2008*.
- [56] Padulles, J. et al., An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation, *Journal of Power Sources*, 495–500, 2000.
- [57] Li, Y. H., Choi, S. S. and Rajakaruna, S., An analysis of the control and operation of a Solid Oxide Fuel Cell power plant in an isolated system", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 20–2, 381–387, 2005.
- [58] Goel, A., Mishra, S. and Jha, A. N., Power flow control of a solid oxide fuel cell for grid connected operation, *Int. Conf. on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES'06, New Delhi, India, 1–5, 2006*.
- [59] Wang, C. and Nehrir, M. H., A physically based dynamic model for solid oxide fuel cells, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22–4, 887–897, December 2007.
- [60] Soliman, M. et al., SOFC emulation using computer controlled dc motor/generator set, *38th North American Power Symposium, NAPS'06, 179–185, USA, September 17–19, 2006*.
- [61] Entchev, E. and Yang, L., Application of adaptive neuro-fuzzy inference system techniques and artificial neural networks to predict solid oxide fuel cell performance in residential microgeneration installation, *Journal of Power Sources*, 170, 122–129, 2007.
- [62] Wu, X. J. et al., Predictive control of SOFC based on a ga-rbf neural network model, *Journal of Power Sources*, 179, 232–239, 2008.
- [63] Huoa, H. B. et al., Nonlinear model predictive control of SOFC based on a hammerstein model, *Journal of Power Sources*, 185, 338–344, 2008.
- [64] Huoa, H. B. et al., nonlinear dynamic modeling for a SOFC stack by using a hammerstein model, *Journal of Power Sources*, 175, 441–446, 2008.
- [65] Wu, X. J., Zhu, X. J., Cao, G. Y. and Tu, H. Y., Dynamic modeling of SOFC based on a T–S fuzzy model, *Simulation Modeling Practice and Theory*, 16, 494–504, 2008.
- [66] Yang, J., Li, X., Mou, H. G. and Jian, L., Control oriented thermal management of solid oxide fuel cells on a modified Takagi–Sugeno fuzzy model, *Journal of Power Sources*, 188, 475–482, 2009.

- [67] Ozpineci, B. et al., Integrating multiple solid oxide fuel cell modules, The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'03, USA, 1568–1573, November 2–6, 2003.
- [68] Audring, D. et al., Impact on power system by fuel cells supplying residential buildings, IEEE Proc. of Power Tech Conf., Porto, Portugal, 4, 2001.
- [69] Acharya, K. et al., System–Interaction Analysis of solid–oxide fuel cell (SOFC) power–conditioning system, Proc. of IEEE Industrial Application Society Conf., USA, 2026–2032, October 2003.
- [70] Mazumder, S. K. et al., Load–transient mitigation techniques for solid–oxide fuel cell (SOFC) power–conditioning system, Proc. of the IEEE Int. Telecommunications Energy Conf. ,INTELEC'04, Chicago, USA, 174–181, September 19–23, 2004.
- [71] Mazumder, S. K. et al., Solid oxide fuel cell performance and durability: resolution of the effects of power–conditioning systems and application loads, IEEE Transactions on Power Electronics, 19–5, 1263–1278, September 2004.
- [72] Campbell, A. B. et al., Solid oxide fuel cell power system, The 29<sup>th</sup>. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'03, USA, 2, 1580–1584, November 2–6, 2003.
- [73] Miao, Z. et al., Study of fuel cell power plant in power distribution system–part II: stability control, IEEE Power Engineering Society General Meeting, USA, 2, 2226–2231, June 6–10, 2004.
- [74] Li, Y. H. et al., Control of a solid oxide fuel cell power plant in a grid–connected system, IEEE Transactions on Energy Conversion, 22–2, 405–413, June 2007.
- [75] Auld, A. E. et al., Load–following active power filter for a solid oxide fuel cell supported load, Journal of Power Sources, 195, 1905–1913, 2010.
- [76] Jurado, F. and Valverde, M., Fuzzy logic inverter flux control of fuel cell plants in distributed generation, 11<sup>th</sup>. Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power, USA, 35–40, September 12–15, 2004.
- [77] Wang, C. and Nehrir, M. H., Distributed generation applications of fuel cells, Power Systems Conf., PS'06, South Carolina, USA, 244–248, March 14–17, 2006.
- [78] Kalsi, S. S., Fuel cell plant concept with dynamic characteristics of a rotating generator, IEEE Power System Conf. and Exposition, PSCE'06, Atlanta, Georgia, 810–813, 2006.

- [79] Moon, S. R. et. al., Impact of SOFC fuel cell source impedance on low frequency AC ripple, 37<sup>th</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conf., PESC'06, Jeju, South Korea, 1–6, June 18–22, 2006.
- [80] Ren, J. et. al., Modelling a reversible solid oxide fuel cell to be used as a storage device within AC power networks, 5th IET Int. Conf. on Power Electronics Machines and Drivers, UK, April 19-21, 2010.
- [81] El-Sharkh, M. Y. et. al., A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential application, Journal of Power Sources, 199–204, 2004.
- [82] Achenbach, E., Response of a solid oxide fuel cell to load change, Journal of Power Sources, 57, 1–2, 105–109, 1995
- [83] Andersson, G., Dynamics and control of electric power systems, Lecture notes, Zürich, March 2003.
- [84] Hingorani, N. G. and Gyugyi, L., Understanding FACTS: Concepts and technology: Flexible AC Transmission Systems”, IEEE Press, New York, 1999.
- [85] Ledwich, G. F., Hosseini, S. H. and Shannon, G. F., Voltage balancing using switched capacitors, Electric Power Systems Research, 24, 2, 85–90, August 1992.
- [86] Hong, F., Zhuang-zhi, L., Bao-kui, S. and Li-qiang, Y., A study on new connection types of the main circuits for low voltage dynamic reactive power compensation device and its synchronous trigger circuits, Int. Conf. on Power System Technology, Kunming, China, 4, 2516–2521, October 13–17, 2002.
- [87] Arifoğlu, U., Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Alfa Yayınevi, İstanbul, 2002.
- [88] Li, Z. and Qun-Zhan, L., Application of TSC in reactive compensation in traction substations, IEEE Int. Workshop on Autonomous Decentralized Systems, Chengdu, China, 149–153, 2000.
- [89] Johnson, B. K., Simulation of TSC and TSSC, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, USA, 637–638, 2001.
- [90] Gelen, A. ve Yalcinoz, T., Dağıtılmış enerji sistemlerine (DES) genel bir bakış ve Türkiye'deki potansiyel durumu, KTMMOB EMO Bilim Dergisi, 9, 24, 55-66, Mayıs 2009.
- [91] Gelen, A. and Yalcinoz, T., A dynamic model for solid oxide fuel cell system and analyzing of its performance for DC and AC operation conditions, Int. Journal of Energy Resource, Accepted for publication, 2012.

## ÖZGEÇMİŞ

Ayetül Gelen 02.08.1982 tarihinde Kahramanmaraş'ta doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Hatay'ın Erzin ilçesinde tamamladı. 1999 yılında girdiği Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden Haziran 2003'te mezun oldu. Aynı yıl Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2004-2010 yılları arasında Niğde Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi ve 2010-2012 yılları arasında Melikşah Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Proje Asistanı olarak çalıştı. Temmuz 2006'da yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2006 yılında Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine başlamıştır. Yaşam Boyu Öğrenim/Erasmus (LLP/Erasmus) Programı çerçevesinde Doktora programının 2009-2010 Bahar yarıyılında Timisoara Politeknik Üniversitesi (Politehnica University of Timisoara), Elektrik ve Güç Mühendisliği Fakültesi'nde (Faculty of Electrical and Power Engineering) eğitim almıştır. SCI'da taranan farklı dergilerde hakemlik yapmaktadır. TÜBİTAK destekli kariyer projelerinde bursiyer olarak çalışmıştır. Uluslararası ve ulusal alanda yayınları bulunmaktadır. Bilim dalındaki ilgi alanı; güç sistemleri analizi, modellemesi ve kontrol yapıları, yakıt pilleri ve mühendislik eğitimidir.