

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNİ/YAKIT HÜCRESİ/
ULTRA-KAPASİTÖR HİBRİD GÜÇ ÜRETİM
SİSTEMİNİN DİNAMİK MODELLENMESİ**

Elektrik Müh. Ömer Çağlar ONAR

**F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ.....	1
2. SİSTEM TANIMLAMASI.....	3
2.1 Rüzgar Türbini Dinamik Modeli ve Tasarımı	3
2.2 İndüksiyon Generatörü Dinamik Modeli ve Tasarımı.....	5
2.3 Proton Geçiş Katmanlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Dinamik Modeli ve Tasarımı	7
2.4 Ultra-Kapasitör Bank Dinamik Modeli ve Tasarımı	11
2.5 Elektrolizör Modeli.....	12
2.6 Hidrojen Depolama Sistemi.....	14
2.7 Sistem Baralarına Bağlı Güç Biçimlendirme Birimleri.....	15
2.7.1 Rüzgar türbini çıkışının güç biçimlendirme birimi	16
2.7.2 Ultra-kapasitör bank şarj-deşarj kontrol sistemi.....	18
2.7.3 FC/UC hibrid sisteminin güç çıkışı kontrolü.....	20
2.7.4 Yük tarafı için kullanılan dc/ac dönüştürücüler.....	22
3. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE YORUMLAR	24
4. SONUÇLAR.....	43
KAYNAKLAR.....	44
ÖZGEÇMİŞ.....	46

SİMGE LİSTESİ

A	Türbin süpürme yüzeyi [m^2]
c_p	Türbin performans katsayısı
c_{p_pu}	Türbin performans katsayısının per unit değeri
k_p	$c_{p_pu}=1$ ve $v_{wind_p.u}=1$ p.u. için güç kazancı ($k_p \leq 1$)
P_{m_trb}	Türbin mekanik güç çıkışı [W]
P_{m_bs}	ρ ve A 'nın özel değerleri için nominal gücün birim sistem (p.u.) değeri
β	Türbin bıçakları kanat açıklığı [derece]
λ	Rotor bıçakları tip hızının rüzgar hızına oranını (tip speed ratio)
ρ	Hava yoğunluğu [$kg(m^3)^{-1}$]
v_{rzg}	Rüzgar hızı [$m s^{-1}$]
v_{rzg_bs}	Rüzgar hızının birim sistem (p.u.) değeri (Rüzgar hızı için baz değeri, beklenen rüzgar hızı ortalama değeridir.)
E_s	Statorda faz başına endüklenen gerilim [V]
F	Rotor ve yük viskoz sürtünme katsayıları eşdeğeri [p.u.]
f_n	Nominal frekans [Hz]
H	Rotor ve yük atalet sabitlerinin eşdeğeri [s]
I_s	Stator akımı [A]
n_s	Senkron devir sayısı [devir/dakika]
p	Kutup çifti sayısı
P_e	Elektriksel güç çıkışı [W]
P_{m_gen}	Mekanik güç girişi [W]
R'_s, L'_s	Statora indirgenmiş kombine rotor ve stator resistans ve endüktansları [p.u., p.u.]
S_n	Görünür güç çıkışı [VA]
T_e	Elektromanyetik tork [N m]
T_m	Mekanik mil momenti [N m]
V_s	Faz başına stator uç gerilimi [V]
δ	Güç açısı [derece]
θ_m	Rotor açısal pozisyonu [rad]
ω_m	Rotor açısal hızı [rad/s]
$B_{(I/A)}, C_{(V)}$	PEMFC sisteminin aktivasyon gerilimini simule etme sabitleri [A^{-1}] ve [V]
E	Ani Nernst gerilimi [V]
E_0	Standart yüksüz durum gerilimi [V]
F	Faraday sabiti [$C kmol^{-1}$]
I_{FC}	FC sistem akımı [A]
K_{an}	Anod valf sabiti [$\sqrt{KmolKg} (atm s)^{-1}$]
K_{H_2}	Hidrojen valfi molar sabiti [$kmol (atm s)^{-1}$]
K_{H_2O}	Su valfi molar sabiti [$kmol (atm s)^{-1}$]
K_{O_2}	Oksijen valfi molar sabiti [$kmol (atm s)^{-1}$]
K_r	Modelleme sabiti [$kmol (s A)^{-1}$]
M_{H_2}	Hidrojen molar kütlesi [$kg kmol^{-1}$]
N_0	Staktaki seri yakıt pilleri sayısı
p_{H_2}	Hidrojen kısmi basıncı [atm]
p_{H_2O}	Su kısmi basıncı [atm]
p_{O_2}	Oksijen kısmi basıncı [atm]
q_{O_2}	Giriş molar hidrojen akışı [$kmol s^{-1}$]

$q_{H_2}^{grş}$	Hidrojen giriş akışı [kmol s ⁻¹]
$q_{H_2}^{çkş}$	Hidrojen çıkış akışı [kmol s ⁻¹]
$q_{H_2}^r$	Reaksiyona giren hidrojen akışı [kmol s ⁻¹]
$q_{H_2}^{gereklen}$	Yük değişimini karşılamak için gerekli hidrojen akışı [kmol s ⁻¹]
R_{YH}	Yakıt hücresi için evrensel gaz sabiti [(1 atm) (kmol K) ⁻¹]
$R^{iç}$	FC iç direnci [Ω]
r_{H-O}	Hidrojen-Oksijen akış oranı
T	Mutlak sıcaklık [⁰ K]
U	Kullanım oranı
V_{an}	Anod hacmi [m ³]
$V_{hücre}$	FC sistem dc çıkış gerilimi [V]
τ_{H_2}	Hidrojen zaman sabiti [s]
τ_{O_2}	Oksijen zaman sabiti [s]
τ_{H_2O}	Su zaman sabiti [s]
η_{akt}	Aktivasyon aşım voltajı [V]
η_{omik}	Omik aşım gerilimi [V]
C_{UK}	Kapasitans [F]
$C_{UK-toplam}$	Toplam UC sistem kapasitansı [F]
EPR	Paralel eşdeğer direnç [Ω]
ESR, R	Seri eşdeğer iç direnç [Ω]
E_{UK}	UC bank tarafından salınan veya kazanılan enerji miktarı [Ws]
n_{s-UK}	Seri bağlı kapasitör sayısı
n_{p-UK}	Paralel bağlı kapasitör sayısı
$R_{UK-toplam}$	Toplam UC sistem direnci [Ω]
V_{ilk}	Deşarj başlamadan önceki başlangıç gerilimi [V]
V_{son}	Deşarj bittikten sonraki son gerilim [V]
F	Faraday sabiti [C kmol ⁻¹]
i_e	Elektrolizör akımı [A]
n_c	Seri bağlı elektrolizör hücreleri sayısı
n_F	Faraday verimliliği
n_{H_2}	Saniyede üretilen hidrojen molları sayısı [mol s ⁻¹]
N_{H_2}	Hidrojen tankına saniyede aktarılan hidrojen molları sayısı [kmol s ⁻¹]
P_b	Tank basıncı [Pascal]
P_{bi}	Hidrojen tankının başlangıç basıncı [Pascal]
R_{Tank}	Depolama tankı için evrensel (Rydberg) gaz sabiti [J (kmol °K) ⁻¹]
T_b	İşletme sıcaklığı [⁰ K]
V_b	Tank hacimi [m ³]
z	Basıncın bir fonksiyonu olarak sıkıştırılabilme faktörü

KISALTIMA LİSTESİ

FC	Yakıt hücresi (Fuel Cell)
UC	Ultra-kapasitör (Ultra-capacitor)
PEM	Proton geçiş katmanı (Proton Exchange Membrane)
PEMFC	Proton geçiş katmanlı yakıt hücresi (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
EPR	Eşdeğer paralel direnç (Equivalent Parallel Resistance)
ESR, R	Eşdeğer seri direnç (Equivalent Series Resistance)
PI	Oran-integral kontrol (Proportional Integral)
IGBT	İzole kapılı bipolar transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MOSFET	Metal oksit yarı iletkenli alan etkili transistör (Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor)
PCU	Güç şekillendirme birimi (Power Conditioning Unit)
p.u.	Birim sistem (Per Unit)
PWM	Darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation)
m	Modülasyon indeksi (Modulation index)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Geliştirilen sistemin genel blok diyagramı.....	3
Şekil 2.2 Rüzgar türbininin Simulink modeli.....	5
Şekil 2.3 PEMFC dinamik modeli.....	10
Şekil 2.4 UC biriminin klasik eşdeğer modeli.....	11
Şekil 2.5 Elektrolizör modelinin Simulink diyagramı.....	13
Şekil 2.6 Hidrojen depolama sisteminin Simulink modeli.....	15
Şekil 2.7 Sistem baralarının güç kontrol sistemleri.....	16
Şekil 2.8 Çift köprülü tristör kontrollü doğrultucu.....	17
Şekil 2.9 Doğrultucu, k. sist., filtre elemanları, elektrolizör ve hidrojen depolama modelleri	18
Şekil 2.10 FC ve UC hibrid sistemi.....	19
Şekil 2.11 FC/UC dc barasında kullanılan yüksek çıkışlı dc/dc dönüştürücü.....	21
Şekil 2.12 dc/dc dönüştürücüye ait kontrol sistemi.....	21
Şekil 2.13 dc/ac dönüştürücü modeli.....	22
Şekil 3.1 Rüzgar türbininin $c_p - \lambda$ karakteristiği.....	24
Şekil 3.2 Rüzgar türbini karakteristikleri	25
Şekil 3.3 Kullanıcının toplam yük talebi	29
Şekil 3.4 Sistem simülasyonunda kullanılan rüzgar hızı profili.....	29
Şekil 3.5 Rüzgar türbinine akuple generatörün gücü	30
Şekil 3.6 Elektrolizör gerilimi (rüzgar türbini çıkışının dc bara gerilimi).....	31
Şekil 3.7 PI kontrolör olmadığı durumda elektrolizör gerilimi	32
Şekil 3.7 PI kontrolör olmadığı durumda rüzgar türbini gücü	32
Şekil 3.8 Üretilen hidrojen miktarı	33
Şekil 3.9 FC sistem tarafından yüke aktarılan güç.....	34
Şekil 3.10 FC sistem iç gerilimi	35
Şekil 3.11 FC sistem tarafından tüketilen hidrojen miktarı.....	35
Şekil 3.13 Hidrojen depolama tankı basıncı	37
Şekil 3.14 UC bank tarafından karşılanan güç	37
Şekil 3.15 Yük talebine bağlı olarak değişen UC akımı.....	38
Şekil 3.16 UC bank gerilim değişimi	39
Şekil 3.18 Hibrid sistem tarafından yük tarafına aktarılan güç	41
Şekil 3.19 Hibrid topolojinin güç takip performansı.....	42

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Rüzgar türbini model parametreleri	4
Çizelge 2.2 İndüksiyon generatörü model parametreleri.....	5
Çizelge 2.3 PEMFC model parametreleri.....	7
Çizelge 2.4 Ultra-kapasitör model parametreleri	11
Çizelge 2.5 Elektrolizör model parametreleri.....	13
Çizelge 2.6 Hidrojen depolama sistemi model parametreleri.....	14
Çizelge 2.7 İnverter gerilim denklemi parametreleri.....	22
Çizelge 3.1 İndüksiyon generatörü parametre değerleri.....	25
Çizelge 3.2 Maxwell Boostcap® PC2500 UC karakteristikleri [33]	26
Çizelge 3.3 FC sistem model parametre değerleri.....	27
Çizelge 3.4 Çift köprülü doğrultucu parametre değerleri.....	27
Çizelge 3.5 dc/dc dönüştürücü parametre değerleri	28
Çizelge 3.6 dc/ac dönüştürücü model parametreleri	28
Çizelge 3.7 Transformatör parametreleri.....	28

ÖNSÖZ

Yakın gelecekte fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve Kyoto kriterlerinde belirtildiği gibi karbondioksit emisyonunun da sınır değerlerin altında tutulması hedeflenmektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, enerji üretim sistemleri için rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji teknolojilerinin sürdürülebilir, alternatif ve çevre dostu bir çözüm olması beklenmektedir. Ancak rüzgar ve güneş tabanlı enerji üretim sistemlerinde üretilen enerjinin depo edilmesindeki güçlükler ve bu sistemlerden elde edilebilecek gücün doğa koşullarına bağımlılık göstermesi bu sistemlerin en büyük zaafiyetlerindedir. Rüzgar veya güneş tabanlı enerji üretim sistemleri bir elektrizör ve bir yakıt hücresi ile entegre olarak kullanıldığında depolama problemleri için bir çözüm sunulabilir ve talep ile üretilen enerji miktarları arasındaki fark yakıt hücresi-elektirizör sistemleri ile giderilebilir. Ancak, tek başına bir yakıt hücresi sistemi, özellikle ilk çalışma, ani çok yüksek taleplerin bulunması, geçici (transiyent) olaylar gibi durumlarda yük taleplerini tam olarak karşılamada yetersiz kalmaktadır. Enerji depolama sistemlerinden biri olan ultra-kapasitör sistemlerin de, çok büyük miktarlardaki gücü çok hızlı bir biçimde verebilme kabiliyeti vardır. Bu durumlar göz önüne alındığında, yakıt pili ve ultra-kapasitör sistemlerinin birlikte kullanılarak hibridize edilmesi uygun olacaktır. Bu tür bir hibrid model, yakıt pili güç teknolojisinin maliyetini azaltırken daha iyi bir enerji verimliliği sağlama potansiyeline de sahiptir.

Bu tezin hazırlanmasında sonsuz destek veren ve yetişmemde büyük emekleri bulunan Sayın Hocam Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na ve University of South Alabama, Department of Electrical and Computer Engineering Bölüm Başkanı ve profesörü Sayın Dr. Mohammad ALAM'a teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Alternatif enerji kaynakları üzerine yakın geçmişte yapılan araştırma ve geliştirmeler, bu kaynakların geleneksel güç üretim sistemlerine katkı yapabilecek anlamda önemli bir potansiyele sahip olduklarını göstermiştir. Değişken doğal şartlara rağmen yük taleplerinin kesintisiz ve sürekli olarak karşılanabilmesi için farklı enerji kaynaklarının ve dönüştürücülerinin birlikte kullanımları, alternatif enerjinin daha yaygın kullanımını sağlayacaktır.

Bu çalışmada; rüzgar türbini, yakıt hücresi ve ultra-kapasitör sistemlerinin sürekli güç üretimi için birlikte kullanımları ele alınmıştır. Rüzgar türbininin çıkış gücü rüzgar hızı ile ilişkili olduğundan, bir yakıt hücresi sistemi ile bir ultra-kapasitör sistemi hibridize edilerek genel sistem performansının bütün şartlar altında sürekliliği sağlanmıştır. Burada, güç dönüştürücüleri ve kontrolcülerini ile birlikte bir rüzgar/yakıt hücresi/ultra-kapasitör sisteminin dinamik modellenmesi, tasarımı ve simülasyonu amaçlanmıştır. Amaçlanan sistemde, rüzgar hızı yeterli ise rüzgar türbini hem yük talebini karşılamakta, hem de elektrolizörü beslemektedir. Rüzgar türbininden alınabilecek mevcut gücün talebin altında kalması durumunda, aradaki güç farkının FC sistem tarafından karşılanması öngörülmekte, FC sistem işletmede iken FC sistemin de maksimum çıkış gücünün üzerindeki kısa süreli yüklenmelerde, UC sisteminin aradaki toplam güç farkını karşılaması sağlanmaktadır. İlave olarak geliştirilen yeni bir topoloji sayesinde, rüzgar hızındaki ani değişimler de tolere edebilmekte ve rüzgar hızındaki değişimlerin türbin çıkış büyüklükleri üzerindeki bozucu ve salınımlı etkileri yük tarafına yansıtılmamaktadır.

Anahtar kelimeler: Dinamik modelleme, rüzgar gücü, yakıt hücreleri, ultra-kapasitör, yenilenebilir enerji, hibrid güç sistemleri

ABSTRACT

Recent research and development of alternative energy sources have shown excellent potential as a form of contribution to conventional power generation systems. In order to meet sustained load demands during varying natural conditions, different energy sources and converters need to be integrated with each other for extended usage of alternative energy.

The paper focuses on the combination of wind, fuel cell (FC) and ultra-capacitor (UC) systems for sustained power generation. As the wind turbine output power varies with the wind speed: an FC system with a UC bank can be integrated with the wind turbine to ensure that the system performs under all conditions. We propose herein a dynamic model, design and simulation of a wind/FC/UC hybrid power generation system with power flow controllers. In the proposed system, when the wind speed is sufficient, the wind turbine can meet the load demand while feeding the electrolyzer. If the available power from the wind turbine can not satisfy the load demand, the FC system can meet the excess power demand, while the UC can meet the load demand above the maximum power available from the FC system for short durations. Furthermore, this system can tolerate the rapid changes in wind speed and suppress the effects of these fluctuations on the equipment side voltage in a novel topology.

Keywords: Dynamic modeling, wind power, fuel cell, ultra-capacitor, renewable energy and hybrid power generation

1. GİRİŞ

Azalan fosil yakıtlara olan ekonomik bağımlılık ve geleneksel enerji üretim sistemlerinin kötü çevresel etkileri, önümüzdeki yıllarda sürdürülebilir bir enerji ekonomisi oluşturabilmek için yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ilginin artmasına neden olmuştur. Rüzgar enerjisi, yakın geçmişte büyük bir genişleme kaydederek dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağı haline gelmiştir [1]. Rüzgar türbinlerinin en büyük dezavantajı, doğal olarak değişken olan rüzgar hızının yük tarafında gerilim ve güç dalgalanmalarına neden olmasıdır. Bu problem, uygun güç dönüştürücüleri ve kontrol stratejileri kullanılarak çözülebilir. Diğer bir önemli problem de, rüzgarın bulunmadığı ancak tüketici talebinin hala devam ettiği durumlarda kullanılmak üzere rüzgar türbinleri tarafından üretilen enerjinin depo edilme problemidir [2]. Bu enerji depolama problemine bir çözüm olarak, rüzgar enerjisi uygun dönüşümler sonucunda hidrojen formunda depolanabilir ve daha sonra FC sistemler kullanılarak tekrar elektrik enerjisine çevrilebilir. Bu tarz bir enerji depolama, geleneksel baterili enerji depolama sistemleri ile karşılaştırıldığında enerji yoğunluğu ve uzun dönem enerji depolama bakımlarından çok önemli üstünlükler arz eder [2, 3]. Bir elektrolizör kullanılarak gerçekleştirilen hidrojen dönüşümü, çok daha yüksek miktarlarda gücün çok daha yüksek enerji yoğunluklarında hem depolanmasına hem de iletimine olanak sağlar [3]. Böylece, hidrojen üretimi rüzgar tabanlı enerji üretiminde ve ithal fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasında önemli bir rol üstlenebilir [4, 5]. [6, 7] nolu referanslarda da belirtildiği gibi, rüzgar enerjili elektroliz, yenilenebilir enerji – hidrojen enerjisi sistemleri için ekonomik olarak gerçekleştirilebilir cazip bir adaydır. Dahası, rüzgar türbinleri ile elektrolizör sistemlerini beraber kullanmak, elektrik ve buna ilave olarak hidrojenin dağılmış üretiminin ucuz maliyetli ve çevre dostu bir şekilde sağlanmasını sağlayacak bir potansiyeline sahiptir [4]. Bu yolla, depolanmış hidrojen, düşük rüzgar hızı durumlarında enerji üretimine katkıda bulunmak için yakıt pili güç santralleri sayesinde elektrik enerjisi elde etmede kullanılabilir.

Yakıt pili güç santralleri, hidrojen ve oksijeni kullanarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Proton geçiş katmanlı yakıt pili güç santralleri (PEMFC), yüksek enerji yoğunlukları ve düşük işletme sıcaklıkları gibi özellikleri sayesinde, yenilenebilir enerjili uygulamalar için diğer yakıt pili tiplerine tercih edilirler. Bununla birlikte, FC güç santrallerine paralel bağlı bir UC sisteminin katkıda bulunması, tepe güç taleplerinin ve geçici olaylar sırasındaki yüklenmelerin karşılanmasında teknik ve ekonomik olarak anlamlı olacaktır.

Ultra-kapasitörler, aşırı yüksek kapasitans değerlerinde (bir kaç Farad'dan bir kaç bin Farad'a

kadar), geleneksel kapasitör tiplerine göre çok yüksek enerji yoğunluklarına sahiptirler [8]. UC bank olmadan FC sistem, kısa süreli tepe yüklenmeler ve geçici olaylar da dahil olmak üzere bütün yüklenmeleri karşılaması istenecek, bu da FC güç santralının boyutlarının ve fiyatının artması ve belki de yük talebinin ani ve geçici durumlarında hızlı cevap verememe ile sonuçlanacaktır.

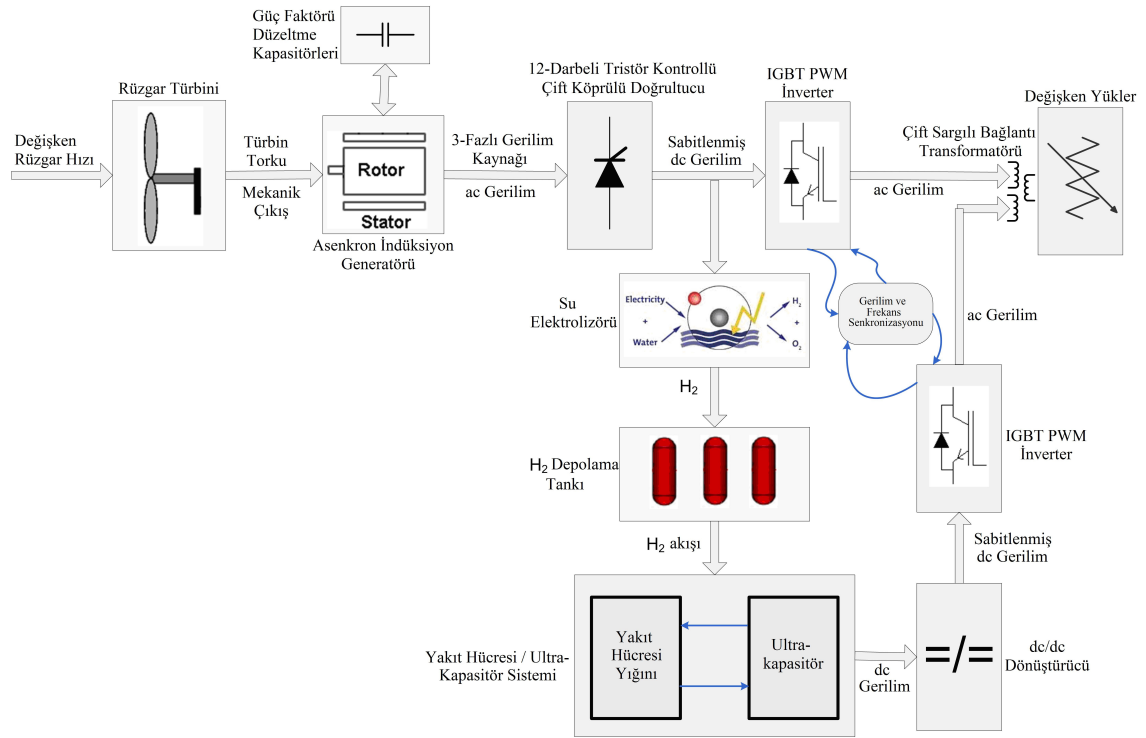
Yenilenebilir hibrid enerji sistemlerinin modellenmesi, FC güç santralleri ve diğer ilgili alanlarda literatüre geçmiş birçok çalışma mevcuttur. Bunlar arasında, Khan ve diğerleri [2, 9] küçük bir rüzgar türbini-yakıt pili sisteminin modelini ve rüzgar türbini -FC hibrid sisteminin yaşam döngüsü analizini sunmuştur. Delfino ve diğerleri [10], şebeke ile bağlantılı bir yakıt pili – rüzgar türbini sistemi incelemiştir. Referans [3]'te, bir rüzgar-yakıt pili sistemi için güç şekillendirme birimi (PCU) rapor edilmiştir. Bechrakis ve diğerleri [11], kendi kendine çalışabilen otonom bir rüzgar-hidrojen sisteminin simülasyonunu ve işletme yatırımını incelemiştir. PEM elektroliz kullanılarak farklı yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretimi, Barbir [12] tarafından yapılan bir çalışmada amaçlanmıştır. Referans [13]'te, bir PEM elektrolizörün ve hidrojen depolama sisteminin dinamik modeli tanıtılmıştır. Dinamik sistemlerin matematiksel olarak modellenmeleri ve simülasyonları, en iyi hibrid sistemin geliştirilebilmesi açısından önemlidir.

Bu çalışmada, rüzgar hızı değişimlerinden etkilenmeyerek yük ihtiyaçlarının sürekli olarak karşılandığı ve kaynakların birbirlerine katkı sağladığı bir rüzgar/yakıt hücresi/ultra-kapasitör hibrid enerji üretim sisteminin ayrıntılı modellenmesi, tasarımı ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Referans [14]'te rapor edilmiş dinamik PEMFC/UC sistemi bu çalışma için modifiye edilerek rüzgar türbini, generatörü, elektrilizör ve hidrojen depolama modelleri ile entegrasyonu sağlanmıştır. Modelleme ve simülasyonlar, MATLAB[®], Simulink[®] ve SimPowersystems[®] yazılım paketleri¹ kullanılarak gerçekleştirilmiş ve amaçlanan sistemin etkinliği doğrulanmıştır.

¹ MATLAB, Simulink ve SimPowerSystems, The MathWorks Inc. firmasının tescilli ürünleridir.

2. SİSTEM TANIMLAMASI

Bu bölümde, rüzgar/yakıt hücresi/ultra-kapasitör hibrid üretim sisteminin dinamik benzetim modeli tanıtılmıştır. Geliştirilen sistem; bir rüzgar türbini, güç faktörü düzeltme kapasitörleri ile birlikte bir indüksiyon generatörü, PI denetimli tetikleme açısına sahip bir ac/dc tristör kontrollü çift köprülü doğrultucu, darbe genişliği PI kontrollü olan yükseltici tip bir dc/dc dönüştürücülü FC/UC sistemi, 5kHz taşıyıcı işaret frekanslı iki adet dc/ac IGBT inverter ve yük tarafında bulunan bir adet iki sargılı bağlantı transformatöründen meydana gelmiştir. Geliştirilen sistemin genel blok diyagramı, Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Geliştirilen sistemin genel blok diyagramı

2.1 Rüzgar Türbini Dinamik Modeli ve Tasarımı

Literatürde, rüzgar türbinleri ve rüzgar türbinleri tarafından tahrik edilen generatörlerle ilgili bir çok çalışma [2, 3, 10, 18] mevcuttur. Bu çalışmada gerçekleştirilen modelde, farklı rüzgar hızlarının bir fonksiyonu olarak rüzgar türbini çıkış gücü temel alınmıştır. Rüzgar türbininin

matematiksel modelinde kullanılan parametreler Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Rüzgar türbini model parametreleri

A	Türbin süpürme yüzeyi [m^2]
c_p	Türbin performans katsayısı
c_{p_pu}	Türbin performans katsayısının birim sistem (p.u.) değeri
k_p	$c_{p_pu}=1$ ve $v_{wind_p.u.} = 1$ p.u. için güç kazancı ($k_p \leq 1$)
P_{m_trb}	Türbin mekanik güç çıkışı [W]
P_{m_pu}	ρ ve A ’nın özel değerleri için nominal gücün p.u. değeri
β	Türbin bıçakları kanat açıklığı [derece]
λ	Rotor bıçakları tip hızının rüzgar hızına oranını (tip speed ratio)
ρ	Hava yoğunluğu [$kg(m^3)^{-1}$]
v_{rzg}	Rüzgar hızı [$m s^{-1}$]
v_{rzg_bs}	Rüzgar hızının birim sistem (p.u.) değeri (Rüzgar hızı için baz değeri, beklenen rüzgar hızı ortalama değeridir.)

Rüzgar türbininin çıkış gücü, Denklem (2.1)’deki [17, 19, 20] gibi ifade edilebilir.

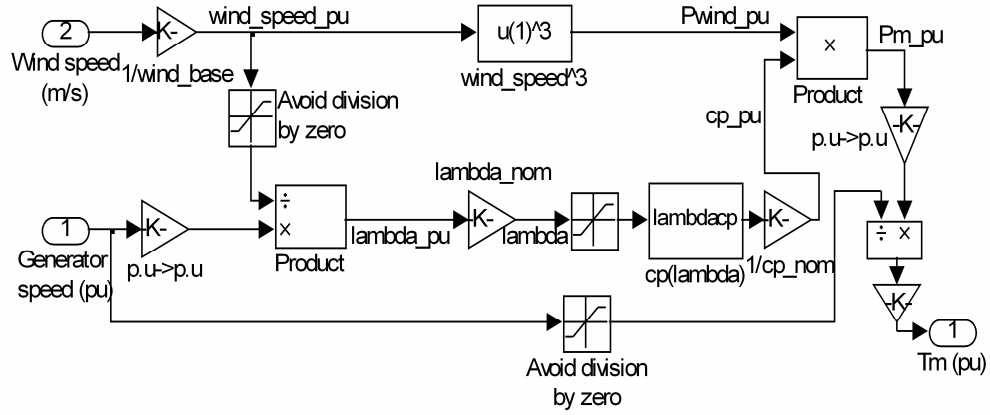
$$P_{m=trb} = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} v_{rzg}^3. \quad (2.1)$$

Denklem (2.1), ρ ve A ’nın spesifik değerleri için basitleştirilebilir ve normalize edilebilir.

Per unit (p.u.) sistemdeki yeni denklem, Denklem (2.2)’deki gibi düzenlenebilir.

$$P_{m_bs} = k_p c_{p_pu} v_{rzg_bs}^3. \quad (2.2)$$

Rüzgar türbininin modifiye edilmiş Simulink modeli, Şekil 2.2’de verilmiştir [17, 19, 20]. Bu modelde girişler generatör dönüş hızı ve rüzgar hızı, çıkış ise indüksiyon generatörünün rotor miline uygulanan mekanik torktur.



Şekil 2.2 Rüzgar türbininin Simulink modeli

2.2 İndüksiyon Generatörü Dinamik Modeli ve Tasarımı

Bu çalışmada, asenkron indüksiyon generatörünün SimPowerSystems içinde bulunan hazır modeli, rüzgar türbini tarafından tahrik edilen bir güç generatörü olarak kullanılmıştır [17]. Bu modelde, asenkron makinenin elektriksel ve mekanik kısımları Referans [21]'deki prosedür takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

İndüksiyon generatörü modelinde kullanılan parametreler, Çizelge 2.2'de listelenmiştir.

Çizelge 2.2 İndüksiyon generatörü model parametreleri

E_s	Statorda faz başına enfüklenen gerilim
F	Rotor ve yük viskoz sürtünme katsayıları eşdeğeri [p.u.]
f_n	Nominal frekans [Hz]
H	Rotor ve yük atalet sabitlerinin eşdeğeri [s]
I_s	Stator akımı [A]
n_s	Senkron devir sayısı [devir/dakika]
P	Kutup çifti sayısı
P_e	Elektriksel güç çıkışı [W]
P_{m-gen}	Mekanik güç girişi [W]

R'_s, L'_s	Statora indirgenmiş kombine rotor ve stator resistans ve endüktansları [p.u., p.u.]
S_n	Görünür güç çıkışı [VA]
T_e	Elektromanyetik tork [N m]
T_m	Mekanik mil momenti [N m]
V_s	Faz başına stator uç gerilimi [V]
δ	Güç açısı [derece]
θ_m	Rotor açısal pozisyonu [rad]
ω_m	Rotor açısal hızı [rad/s]

Bir asenkron makinede, sekron devir sayısı ve rotor açısal hızı,

$$n_s = \frac{60}{p} f_n \quad (2.3)$$

$$\omega_m = \frac{2\pi}{60} n_s \quad (2.4)$$

denklemleri ile ifade edilir.

Rotor milini döndüren mekanik tork,

$$T_m = \frac{P_{m=trb} = P_{m=gen}}{\omega_m} \quad (2.5)$$

denklemleri ile verilen giriş mekanik gücünü sağlar.

Generatörün mekanik kısmına ait durum denklemleri, durumlar rotor açısal hızı ve rotor açısal konumu olacak şekilde Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m), \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_m \quad (2.7)$$

Stator sargılarının uç gerilimleri ve endüklenen gerilimler arasındaki ilişki,

$$V_s = E_s - (R'_s + j2\pi f L'_s) I_s \quad (2.8)$$

olarak verilir.

İndüksiyon generatörünün görünür çıkış gücü,

$$S_n = 3V_s I_s^* \quad (2.9)$$

denklemleri ile tanımlanır.

İndüksiyon makinesinin elektriksel aktif güç çıkışı ise,

$$P_e = 3 \frac{E_s V_s}{\sqrt{R_s'^2 + (2\pi f L_s')^2}} \sin \delta \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu çalışmada, generatörün rotor sargıları kısa devre edilmiştir (sincap kafesli indüksiyon generatörü) ve rotor mili, rüzgar türbininin ürettiği mekanik tork ile tahrik edilmektedir. Bu mekanik tork, rüzgar hızına ve generatör hızlarına bağlıdır. Elektriksel yükler, generatörün elektriksel çıkışı olan stator sargılarına bağlanmıştır.

2.3 Proton Geçiş Katmanlı Yakıt Hücresi (PEMFC) Dinamik Modeli ve Tasarımı

Referans [14] ve [22]'de tanıtılmış PEMFC modeli, bu çalışma için MATLAB ve Simulink kullanılarak modifiye edilmiştir. Model, çıkış gerilimi ile hidrojen, oksijen ve suya ait kısmi basınçlar arasındaki ilişkiye göre bina edilmiştir.

Dinamik modeli oluşturulan PEMFC sisteminde, aşağıdaki parametreler kullanılmıştır.

Çizelge 2.3 PEMFC model parametreleri

$B_{(I/A)}, C_{(V)}$	PEMFC sisteminin aktivasyon gerilimini simule etme sabitleri [A^{-1}] ve [V]
E	Ani Nernst gerilimi [V]
E_0	Standart yüksüz durum gerilimi [V]
F	Faraday sabiti [$C \text{ kmol}^{-1}$]
I_{FC}	FC sistem akımı [A]
K_{an}	Anod valf sabiti [$\sqrt{\text{kmolKg}} (\text{atm s})^{-1}$]
K_{H_2}	Hidrojen valfi molar sabiti [$\text{kmol} (\text{atm s})^{-1}$]
K_{H_2O}	Su valfi molar sabiti [$\text{kmol} (\text{atm s})^{-1}$]
K_{O_2}	Oksijen valfi molar sabiti [$\text{kmol} (\text{atm s})^{-1}$]
K_r	Modelleme sabiti [$\text{kmol} (\text{s A})^{-1}$]

M_{H_2}	Hidrojen molar kütlesi [kg kmol ⁻¹]
N_0	FC yığınındaki seri yakıt pilleri sayısı
p_{H_2}	Hidrojen kısmi basıncı [atm]
p_{H_2O}	Su kısmi basıncı [atm]
p_{O_2}	Oksijen kısmi basıncı [atm]
q_{O_2}	Giriş molar hidrojen akışı [kmol s ⁻¹]
$q_{H_2}^{grş}$	Hidrojen giriş akışı [kmol s ⁻¹]
$q_{H_2}^{çkş}$	Hidrojen çıkış akışı [kmol s ⁻¹]
$q_{H_2}^r$	Reaksiyona giren hidrojen akışı [kmol s ⁻¹]
$q_{H_2}^{gereklen}$	Yük değişimini karşılamak için gerekli hidrojen akışı [kmol s ⁻¹]
R_{YH}	Evrensel gaz sabiti [(1 atm) (kmol K) ⁻¹]
$R^{iç}$	FC iç direnci [Ω]
r_{H-O}	Hidrojen-Oksijen akış oranı
T	Mutlak sıcaklık [⁰ K]
U	Kullanım oranı
V_{an}	Anod hacmi [m ³]
$V_{hücre}$	FC sistem dc çıkış gerilimi [V]
τ_{H_2}	Hidrojen zaman sabiti [s]
τ_{O_2}	Oksijen zaman sabiti [s]
τ_{H_2O}	Su zaman sabiti [s]
η_{akt}	Aktivasyon aşım voltajı [V]
η_{omik}	Omik aşım gerilimi [V]

Herhangi bir gazın (hidrojen) valf üzerinden gerçekleşen molar akışı ile bu gazın kanal içerisindeki kısmi basıncı arasındaki ilişki,

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Hidrojen molar akışı için; hidrojen giriş akışı, hidrojen çıkış akışı ve reaksiyona giren hidrojen akış oranı olmak üzere üç önemli faktör vardır. Bu faktörler arasındaki ilişki,

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{R_{YH} T}{V_{an}} (q_{H_2}^{grş} - q_{H_2}^{çkş} - q_{H_2}^r) \quad (2.12)$$

şeklinde yazılabilir.

Hidrojen akışı ile FC sistem akımı arasındaki temel elektrokimyasal ilişkiye göre, reaksiyona

giren hidrojen akış oranı Denklem (2.13)'teki gibi ifade edilebilir.

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0 I'_{FC}}{2F} = 2K_r I'_{FC} \quad (2.13)$$

Denklem (2.11) ve Denklem (2.13) kullanılarak ve Laplace dönüşümü uygulanarak hidrojen kısmi basıncı frekans domeninde Denklem (2.14)'teki gibi elde edilebilir.

$$P_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{in} - 2K_r I'_{FC}) \quad (2.14)$$

Burada τ_{H_2} , Denklem (2.15)'teki gibi tariflenebilir.

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{K_{H_2} R_{YH} T} \quad (2.15)$$

Su ve oksijen kısmi basınçları da benzer şekilde elde edilebilir. PEMFC'ye ait polarizasyon eğrisi; Nernst gerilimi, aktivasyon aşım gerilimi br omik aşım gerilimlerinin toplamı şeklinde elde edilir. Sabit sıcaklık ve oksijen konsantrasyonu durumlarında FC çıkış gerilimi Denklem (2.16)'teki şekilde elde edilebilir.

$$V_{hücre} = E + \eta_{akt} + \eta_{omik} \quad (2.16)$$

Aktivasyon ve omik düşüm gerilimleri sırasıyla,

$$\eta_{akt} = -B_{(1/A)} \ln(C_{(V)} I'_{FC}) \quad (2.17)$$

$$\eta_{omik} = -R^{is} I'_{FC} \quad (2.18)$$

Nernst ani gerilimi ise Denklem (2.19)'daki gibi elde edilebilir.

$$E = N_0 \left[E_0 + \frac{R_{YH} T}{2F} \log \left(\frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \right] \quad (2.19)$$

PEMFC sistem, yük talebine bağlı miktarlarda hidrojen tüketir. Bu hidrojen “reformer” tarafından PEMFC'nin işletimi için sürekli olarak üretilir. Reformer sisteminin matematiksel modeli Denklem (2.20)'deki gibi oluşturulabilir.

$$\frac{q_{H_2}}{q_{methanol}} = \frac{C_{(V)} V}{\tau_1 \tau_2 s^2 + (\tau_1 + \tau_2) s + 1} \quad (2.20)$$

sağlanır. FC güç çıkışına bağlı olarak hidrojen akış oranını kontrol etmek için, FC çıkış akımı modele tekrar giriş olarak uygulanarak geri beslemeli kontrol stratejisi oluşturulmaktadır.

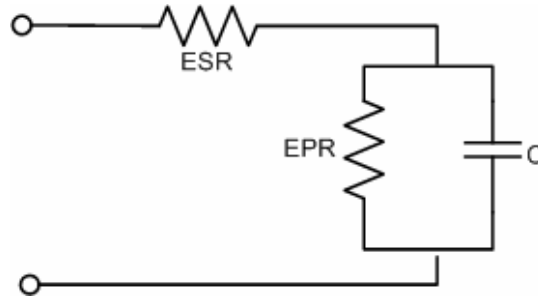
2.4 Ultra-Kapasitör Bank Dinamik Modeli ve Tasarımı

Ultra-kapasitör sisteminde kullanılan model parametreleri Çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Ultra-kapasitör model parametreleri

C_{UK}	Kapasitans [F]
$C_{UK-toplam}$	Toplam UC sistem kapasitansı [F]
EPR	Paralel eşdeğer direnç [Ω]
ESR, R	Seri eşdeğer iç direnç [Ω]
E_{UC}	UC tarafından salınan veya kazanılan enerji miktarı [Ws]
n_{s-UK}	Seri bağlı kapasitör sayısı
n_{p-UK}	Paralel bağlı kapasitör sayısı
$R_{UC-toplam}$	Toplam UC sistem direnci [Ω]
V_{ilk}	Deşarj başlamadan önceki başlangıç gerilimi [V]
V_{son}	Deşarj bittikten sonraki son gerilim [V]

Şekil 2.4’te, bir UC birimine ait klasik eşdeğer devre verilmiştir. Model bir kapasitans (C), şarj ve deşarj durumlarını temsil eden bir seri eşdeğer dirençten (ESR, R) ve kapasitörün kendi deşarj kayıplarını temsil eden paralel bir dirençten (EPR) oluşmuştur [23, 24]. EPR, sızıntı etkilerini modeller ve sadece UC’nin uzun dönem enerji depolama performansı üzerinde etkiye sahiptir [25, 26].



Şekil 2.4 UC biriminin klasik eşdeğer modeli

UC bankından çekilen enerji, doğrudan kapasitansa ve UC’nin uç gerilimine bağlıdır ve enerji

Denklem (2.23)'deki gibi ifade edilebilir [8, 25].

$$E_{UK} = \frac{1}{2} C (V_{ilk}^2 - V_{son}^2) \quad (2.23)$$

Ultra-kapasitör bank belirli bir miktar enerjiyi karşılamak zorunda kaldığında, UC bank uç gerilimi azalır. Denklem (2.23), salınan veya kazanılan enerjiye bağlı gerilim değişiminin denklemdir. UC bank'ın yük tarafına enerji salması durumunda E_{UC} pozitif, enerjinin UC bank tarafından kazanımı durumunda da E_{UC} negatiftir.

Belirli bir yük için etkin spesifik enerji, farklı UC bank konfigürasyonları tarafından karşılanabilir. Pratik uygulamalarda, gerekli miktardaki enerji, kapasitans ve uç gerilim değerlerini elde edebilmek için çoklu UC birimleri ile seri veya paralel bağlantılar yapılabilir. İstenilen uç gerilim değeri, bir bank oluşturulabilmesi için seri bağlanacak gerekli ultra-kapasitör sayısını tayin eder. İstenilen kapasitans değeri, bankta paralel bağlanması gereken ultra-kapasitör sayısını tayin eder. UC sistemin toplam eşdeğer resistansı ve kapasitansı, Denklem (2.24) ve (2.25) kullanılarak hesaplanabilir [24, 25].

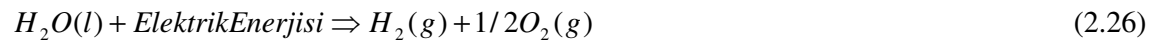
$$R_{UK-toplam} = n_s \frac{ESR}{n_p} \quad (2.24)$$

$$C_{UK-toplam} = n_p \frac{C_{UK}}{n_s} \quad (2.25)$$

UC birimleri, UC banklarını oluşturacak şekilde seri ve paralel bağlantılarla düzenlenebilir ve kısa süreli yük taleplerini karşılamak üzere kullanılabilir [24]. UC sistemin SimPowerSystems'de oluşturulmuş modeli bu çalışmada genel sisteme entegre edilmiştir.

2.5 Elektrolizör Modeli

Su, sulu bir elektrolit tarafından ayrılmış iki elektrot arasından elektrik akımı geçirilerek elementer bileşenlerine ayrılabilir [2, 27, 28]. Su elektrolizinin elektrokimyasal reaksiyonu,



şeklinde ifade edilir.

Elektrolizör modelinde kullanılan parametreler Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Elektrolizörün giriş direnci, Referans [3] ve [29]'da belirtilen Von Hoerner elektrolizörünün gerilim-akım karakteristiğini 39^0 ve 52^0 arasındaki iki sınır sıcaklık değerleri içinde temsil etmek üzere kullanılmıştır. Bu modelde elektrolizör, 45A-50V işletme noktasında çalışmaktadır. Elektrolizörün beslendiği dc bara gerilimi, iki seviyeli bir tristör kontrollü köprü doğrultucu ile 400V olarak sabitlendiği için, sekiz elektrolizör hücresi seri bağlanarak 45A-400V çalışma noktasında hidrojen üretimi gerçekleştirilmiştir.

2.6 Hidrojen Depolama Sistemi

Yakıt hücresi santralinin çıkış gücüne bağlı olarak gereksinim duyulan hidrojen, doğrudan elektrolizör çıkışından PEMFC sisteminin hidrojen girişine transfer edilir.

Farklı hidrojen depolama sistemlerinden birisi de, sıkıştırılmış hidrojen gazını veya sıvı haldeki hidrojeni depolayabilmeye imkan tanıyan fiziksel depolama yöntemidir. Hidrojen depolama modeli, Denklem (2.29) üzerine kurulmuştur ve tanka transfer edilen hidrojen akış oranını kullanarak hidrojen tankının basıncı doğrudan hesaplanabilmektedir. Üretilen hidrojen, dinamikleri Denklem (2.29) ile tanımlanan hidrojen tankında depolanır [13].

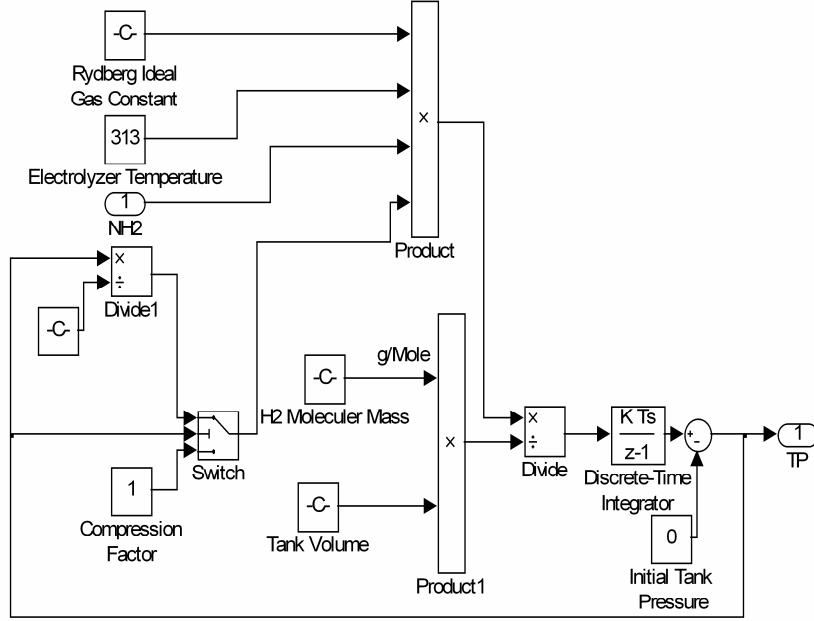
$$P_b - P_{bi} = z \frac{N_{H_2} R_{Tank} T_b}{M_{H_2} V_b} \quad (2.29)$$

Hidrojen depolama sisteminde kullanılan model parametreleri, Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Hidrojen depolama sistemi model parametreleri

N_{H_2}	Hidrojen tankına saniyede aktarılan hidrojen molları sayısı [kmol s^{-1}]
P_b	Tank basıncı [Pascal]
P_{bi}	Hidrojen tankının başlangıç basıncı [Pascal]
R_{Tank}	Evrensel (Rydberg) gaz sabiti [$\text{J (kmol } ^\circ\text{K)}^{-1}$]
T_b	İşletme sıcaklığı [$^\circ\text{K}$]
V_b	Tank hacimi [m^3]
z	Basıncın bir fonksiyonu olarak sıkıştırılabilme faktörü

Bu modelde sıkıştırma dinamikleri veya sıkıştırma enerji gereksinimleri hesaplara dahil edilmemiştir. Pompalar, valfler, fanlar ve sıkıştırma motorları gibi bütün ilave güç gereksinimleri, dinamik modelde ihmal edilmiştir. Hidrojen depolama sisteminin Simulink modeli Şekil 2.6'de gösterilmiştir.

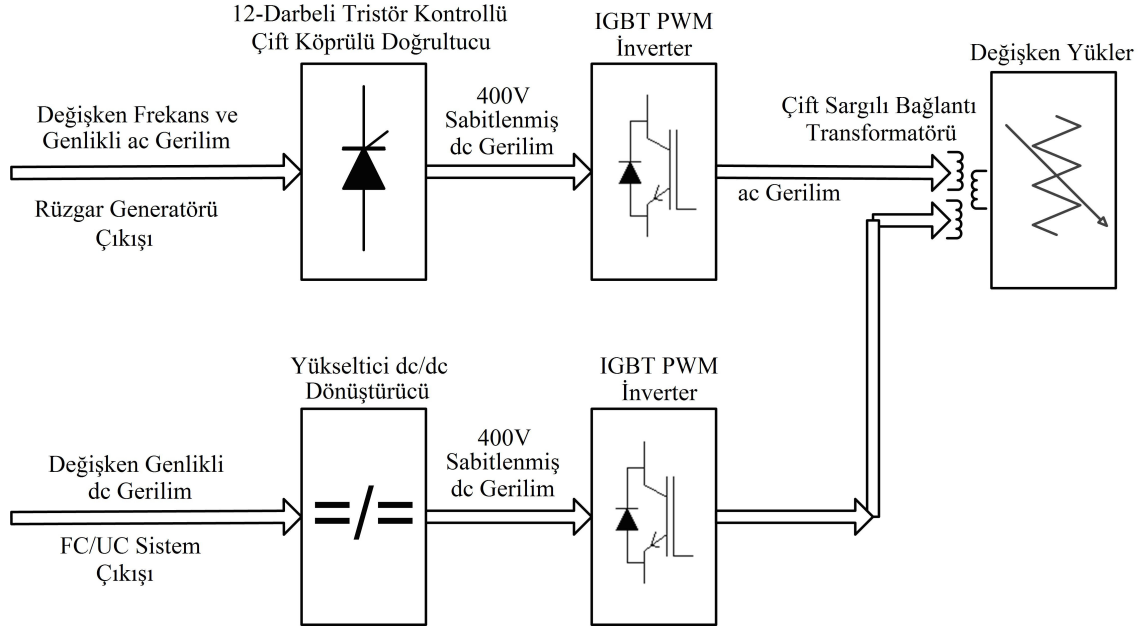


Şekil 2.6 Hidrojen depolama sisteminin Simulink modeli

2.7 Sistem Baralarına Bağlı Güç Biçimlendirme Birimleri

Amaçlanan teknikte kullanılan kontrol stratejisi genel olarak şöyle özetlenebilir: Eğer rüzgar hızı, yük taleplerinin ve elektrolizör güç ihtiyaçlarının karşılanması için yeterliyse, rüzgar türbini, yükleri ve elektrolizörü besler. Yük taleplerinin karşılanamayacağı rüzgar hızı durumlarında ise elektrolizörün ürettiği hidrojen FC sistem tarafından kullanılarak yük taleplerinin sürekli karşılanması sağlanır. FC sistemin de devrede olduğu normal işletmede, FC sistemin karşılanması gereken yük taleplerinin FC maksimum çıkış gücünü aşması durumunda, maksimum gücü aşan miktar UC bank tarafından karşılanır.

Yukarıda bahsedilen güç yönetim stratejisini gerçekleştirmek için uygun güç kontrol sistemleri ilgili noktalarda kullanılmış ve genel sistem bileşenleri entegre edilmiştir. Amaçlanan modelde, güç kontrol sistemi iki adet gerilimi sabitlenmiş dc bara baz alınarak Şekil 2.7'deki gibi gerçekleştirilmiştir.

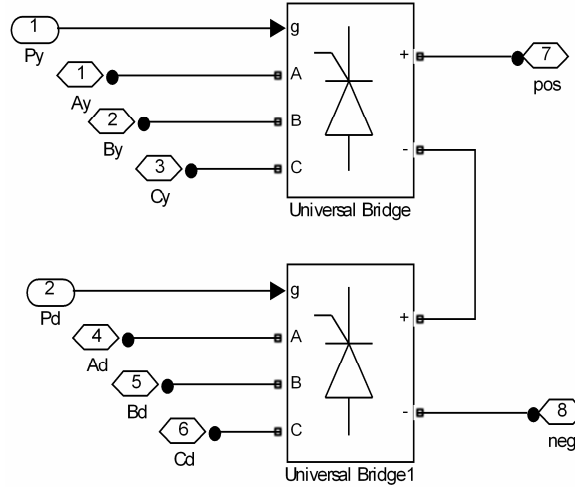


Şekil 2.7 Sistem baralarının güç kontrol sistemleri

2.7.1 Rüzgar türbini çıkışının güç biçimlendirme birimi

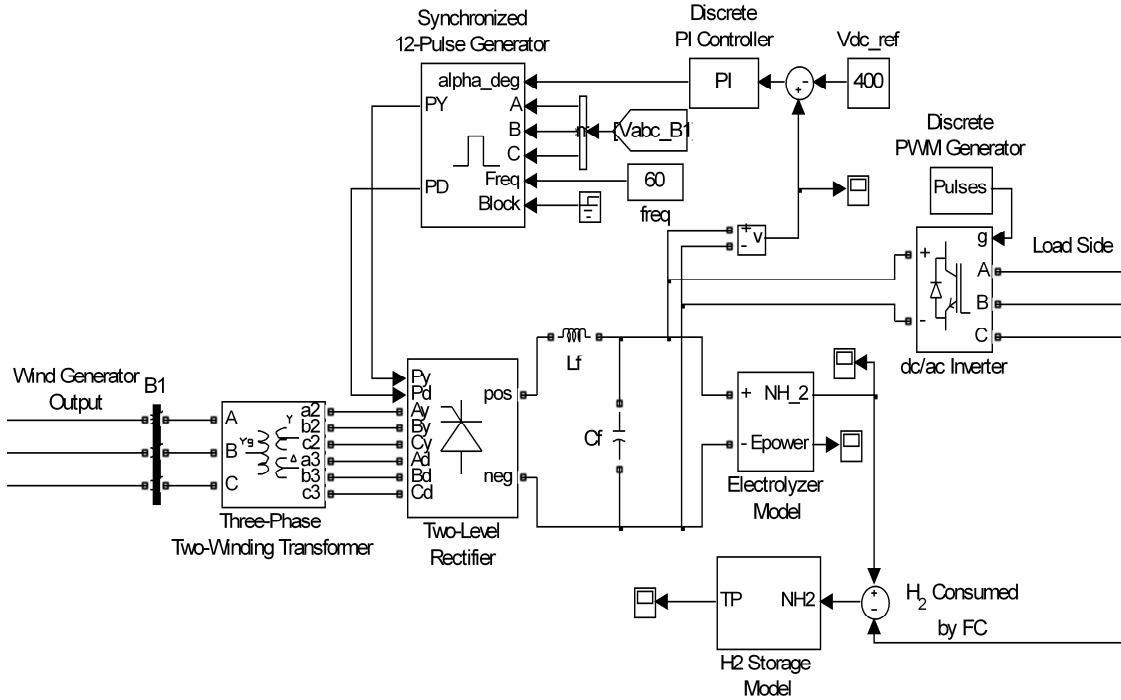
Rüzgar hızındaki dalgalanmalar ve değişiklikler nedeniyle, rüzgar türbinine akuple edilmiş generatörün, çıkış geriliminin frekansında ve genliğinde çeşitli dalgalanmalar gözlenir. Bu dalgalanmaları gidermek için, rüzgar türbini çıkış geriliminin kontrollü bir şekilde doğrultulup tekrar kontrollü bir şekilde evrilmesi fikri düşünülmüştür. Generatör gerilimi, ac barada kullanılan klasik gerilim ve frekans regülatörleri kullanılmadan çift köprülü bir doğrultucu kullanılarak doğrultulmuştur. Daha sonradan ac gerilime dönüştürülen türbin gerilimi doğrultulurken sabitlenmiş, böylece generatör çıkış gerilimindeki frekans ve genlik dalgalanmaları probleminin üstesinden gelinmiştir. Buna ilave olarak, bu sabitlenmiş dc bara eşzamanlı olarak elektrolizör için de kullanılmıştır.

Generatör geriliminin doğrultulmasında kullanılan dönüştürücünün şeması Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Çift köprülü tristör kontrollü doğrultucu

Çift köprülü doğrultucunun cazip bir özelliği, daraltılmış komütasyon periyodları sayesinde yük tarafında daha az harmonik etkilere neden olmasıdır. Diğer bir özellik ise dc çıkış geriliminin 12-darbeli PWM generatör tarafından ayarlanan tetikleme açısı α ile kontrol edilmesidir. Aynı zamanda bu yolla kontrollü ac/dc dönüştürücü, rüzgar türbini çıkış gücünün elektrolizöre aktarılmadan önce yumuşatılması için kullanılmaktadır. Referans [3]'te de belirtildiği üzere, elektrolizör gerilimindeki dalgalanmalar, enerji kayıplarını arttırabilir ve elektroliz sonucunda üretilen hidrojen saf olmama problemlerine neden olabilir. Dahası, hidrojenin verimli bir şekilde üretilmesi ve depolanması, ileri incelemeler isteyen ciddi birer problemdir [9]. Çünkü, rüzgar türbininin çıkış büyüklükleri (gerilim, güç, vs.) rüzgar hızı ile değişirken, ticari olarak mevcut olan elektrolizörler, stabil bir dc gerilime ihtiyaç duyarlar [9].



Şekil 2.9 Çift köprülü doğrultucu, kontrol sistemi, filtre elemanları, elektrolizör ve hidrojen depolama modelleri

Yukarıda belirtilen faktörleri göz önünde bulundurarak, elektrolizör gerilimini sağlamak için yeni bir topoloji kullanılarak bir çift köprülü tristör kontrollü doğrultucu tercih edilmiştir. Dc bara gerilimi kontrol edilebilir olduğundan dolayı, elektrolizör gerilimi 400 V'luk referans gerilimi takip edecek şekilde kontrol edilmiştir. Tetikleme açısı α , ayrık zamanlı (discrete) bir PI kontrolör ile kontrol edilmiştir. Böyle bir hızlı kontrolör, bir gerilim takipçisi olarak türbin kulesinde kullanılan mekanik kanat açıklığı kontrolcülerinden çok daha verimli ve etkindir. Mekanik kanat kontrolörleri çok yavaştır ve atalet ve sürtünme gibi mekanik sınırlayıcı faktörler nedeniyle rüzgar hızındaki ani değişimleri tolere edemezler. Çift köprülü doğrultucu, altı adet gerilim giriş ucunu aralarında uygun faz açıları olacak şekilde sağlamak için üç-fazlı iki-sargılı bir transformatöre ihtiyaç duyar. Rüzgar türbini çıkışının güç biçimlendirme birimleri Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

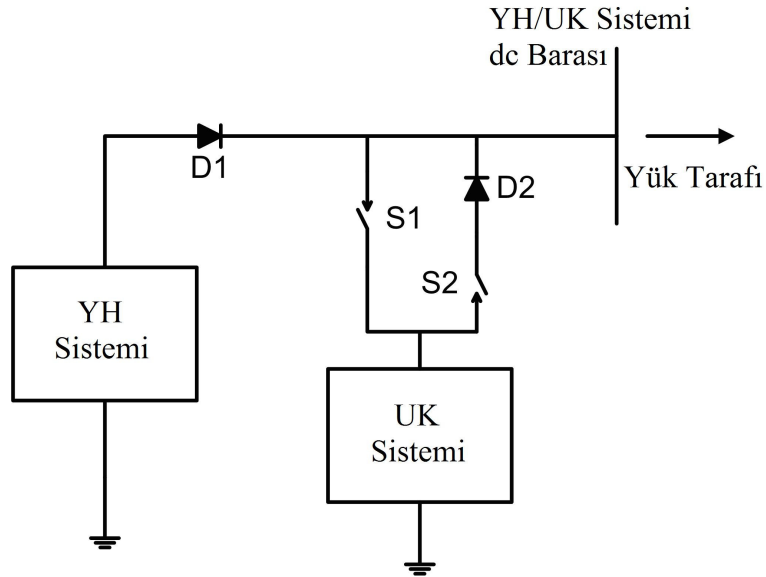
2.7.2 Ultra-kapasitör bank şarj-deşarj kontrol sistemi

Bu alt bölümde, rüzgar türbini ile eşzamanlı işletmede olan FC sistem ile UC bank'ın yük

paylaşımını gerçekleştirebilmek için gerekli olan UC bank şarj-deşarj kontrolü sunulmuştur. Her ne kadar FC sistem sürekli hal işletmesinde iyi bir güç sağlama yeteneğine sahip olsa da, yakıt hücrelerinin ani ve kısa süreli tepe yük talepleri periyotlarındaki cevabı göreceli olarak zayıftır. Bu periyotlarda UC bank, FC sisteme iyi bir yük karşılama performansı sağlamak üzere yardım edebilir [30] ve böylece FC sistemin maliyeti ve boyutları da indirgenebilir.

FC sistem ile UC bank'ın integre edilebilmesi için çok farklı şekillerdeki topolojiler önerilmiştir [24, 25, 30-32]. Örnek olarak, UC sistem entegrasyonu herhangi bir güç dönüştürücüsü kullanılarak seri veya paralel bağlantılar ile sağlanabilir. UC bank'ın yüksek güç sağlama yeteneği ve yüksek güç yoğunluğu sayesinde, UC bank ile FC sistem arasındaki güç dönüştürücüsü elimine edilebilir ve UC bank'tan daha yüksek çıkış alınabilir [24, 30, 31].

Bu çalışmada, UC bankın sadece FC sistem devrede iken genel sisteme katkıda bulunabilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, UC bank ile FC sistemin entegrasyonu Şekil 2.10'da gösterildiği şekilde, iki güç diyotu ve iki yarı-iletken güç anahtarları kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 2.10 FC ve UC hibrid sistemi

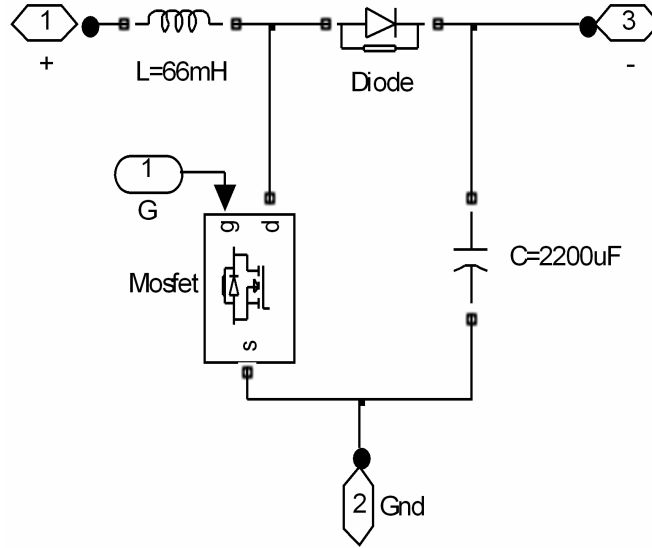
FC sistem ile UC bank arasındaki yük paylaşımı, yük talebine bağlı olarak kontrol anahtarlarının (S1 ve S2) açılıp kapanması ile sağlanır. FC ve UC sistem için ana kontrol algoritması aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Düşük güç talebi durumunda (< 32 kW), FC sistem maksimum gücüne kadar güç üretmekte ve yük talebinin üzerindeki güç UC'yi şarj etmek için kullanılmaktadır. Bu durumda, FC sistem gücü D1 diyotu üzerinden baraya aktarılır ve UC bank şarjı D1 diyotu ve kapalı tutulan S1 anahtarı üzerinden gerçekleşir. UC bankının tam dolu olması durumunda arada gerilim farkı olmayacağından UC sistem şarj için herhangi bir enerji çekmeyecektir. Aynı zamanda S2 anahtarı açık olduğundan UC bank çıkışından yük tarafına da herhangi bir enerji aktarımı söz konusu değildir.
- Yüksek güç talebi durumunda (≥ 32 kW), FC sistem üretebileceği maksimum gücü üretir. Aynı zamanda UC bank, FC sistem tarafından karşılanamayacak miktardaki ilave yük talebini karşılamak amacıyla deşarj olur. Bu durumda, FC sistem gücü dc baraya D1 diyotu üzerinden aktarılır ve UC bank S2 anahtarı ve D2 diyotları üzerinden deşarj olarak ilave yük talebini karşılar. Bu koşullarda, UC banktan FC sisteme tıkama yönünde kutuplanmış D1 diyotu sayesinde herhangi bir ters akım akmaz ve UC sistemin aktaracağı enerjinin tamamının yük tarafına transfer edilmesi garantilenmiş olur. İlave olarak, FC sistemin aşırı yüklenmesini önlemek için deşarj süresi boyunca UC bankın FC sistemden enerji çekmemesi, S1 anahtarının açık tutulmasıyla sağlanabilmektedir.

Burada belirtilen FC ve UC modellerinin kontrol sistemlerini gerçekleştirmek için ideal anahtarlama elemanları, akım ve gerilim sensörleri ile yukarıda belirtilen kontrol algoritması kullanılmıştır.

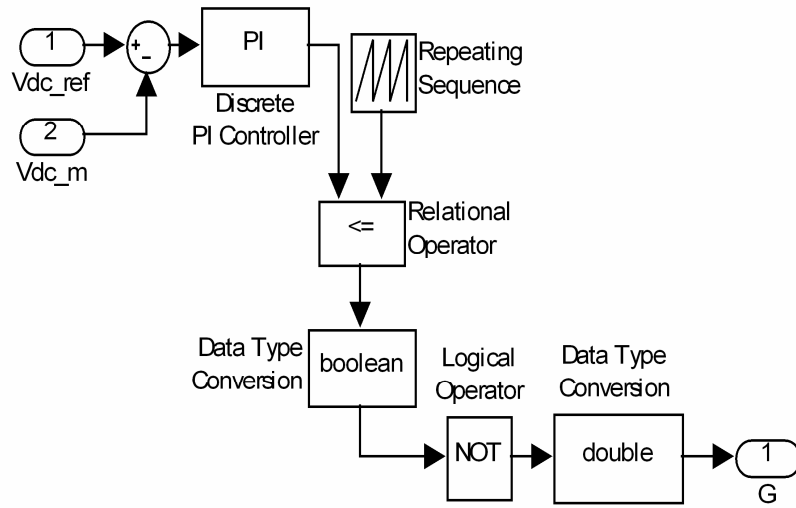
2.7.3 FC/UC hibrid sisteminin güç çıkışı kontrolü

Yük gücündeki artış, model dinamikleri ve FC sistem karakteristiği gereği FC çıkış geriliminde bir azalmaya neden olur. Diğer bir deyişle, FC sistemden çekilen güç ile çıkış gerilimi arasında nonlinear bir ters orantı mevcuttur. Bu nedenle, yükseltici tip bir dc/dc dönüştürücü FC/UC hibrid sistemin çıkışına bağlanarak sistemin ikinci dc barasının da 400 V değerinde sabit kalması sağlanmıştır. Kullanılan dc/dc dönüştürücü topolojisi Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11 FC/UC dc barasında kullanılan yüksek çıkışlı dc/dc dönüştürücü

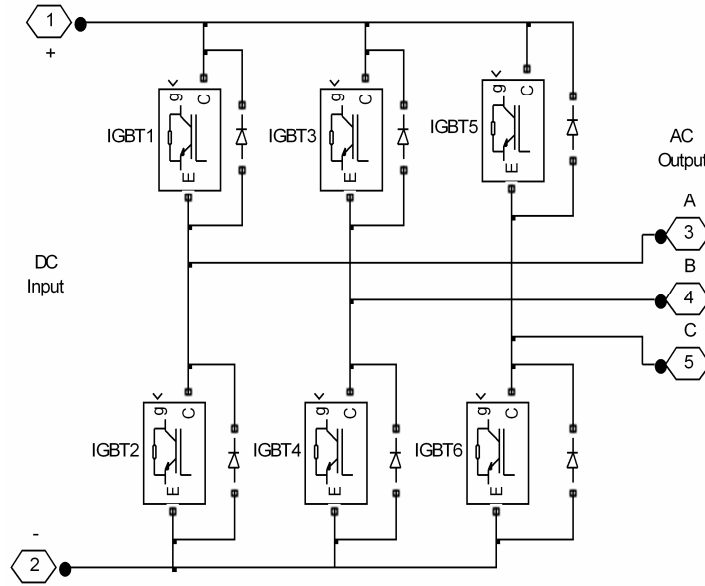
Dönüştürücüde MOSFET'in kapı sinyali, yük tarafı gerilimine bağlı olarak farklı genişliklerdeki darbeler üretebilen bir ayırık zamanlı PI kontrolör kullanılarak elde edilmiştir. PI kontrollü gerilim takip sisteminin blok diyagramı Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 dc/dc dönüştürücüye ait kontrol sistemi

2.7.4 Yük tarafı için kullanılan dc/ac dönüştürücüler

Yukarıda bahsedilen gerilimi sabitlenmiş iki dc bara, Şekil 2.7’de gösterildiği gibi IGBT PWM inverterler kullanılarak ac baralara dönüştürülürler. Bu inverterlerin her ikisi de sabit dc girişlere sahip olduklarından, her ikisi de aynı özelliklerdeki (genlik, faz ve frekans) üç-fazlı ac gerilimi üretmek üzere kullanılırlar. Bu kontrol, inverter elemanları için kapı sinyallerini üreten uygun bir PWM generatör ile sağlanmıştır. Üç-fazlı IGBT inverter devresi, Şekil 2.13’te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 dc/ac dönüştürücü modeli

İnverterin gerilim denklemi parametreleri, Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7 İnverter gerilim denklemi parametreleri

m	Modülasyon indeksi
V_{dc}	İnverterin dc giriş gerilimi [V]
V_{l-l}	İnverterin fazlararası ac çıkış gerilimi [V]

PWM inverterlerde, ac çıkış geriliminin genliği, dc giriş geriliminin ve modülasyon indeksinin bir fonksiyonudur. Böyle bir inverterin fazlararası çıkış gerilimi,

$$V_{l-l} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} mV_{dc} \quad (2.30)$$

şeklinde ifade edilebilir.

3. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE YORUMLAR

Rüzgar/FC/UC hibrid sistemi ve sisteme ait güç kontrol üniteleri sırasıyla, Şekil 2.1 ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu kısımda öncelikle rüzgar türbini, indüksiyon generatörü, FC sistem, UC bank ve diğer güç şekillendirme birimleriyle ilgili açıklamalar verilmiştir.

Rüzgar türbini dinamikleri için, türbin karakteristiklerini ifade eden $c_p(\lambda, \beta)$ fonksiyonunun modelinde kullanılacak kendine özgü (generic turbine equation) bir denklem, Referans [19]’dan alınarak aşağıdaki gibi türetilmiştir.

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3.1)$$

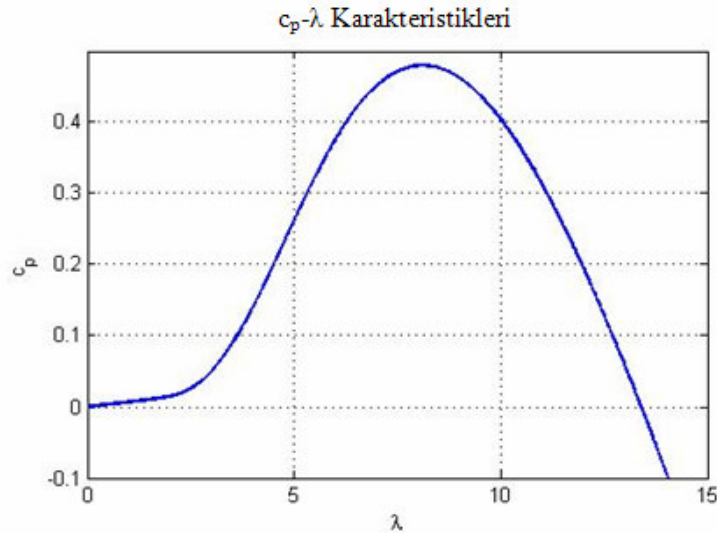
Burada λ_i ,

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.2)$$

bağıntısı ile tanımlanmıştır.

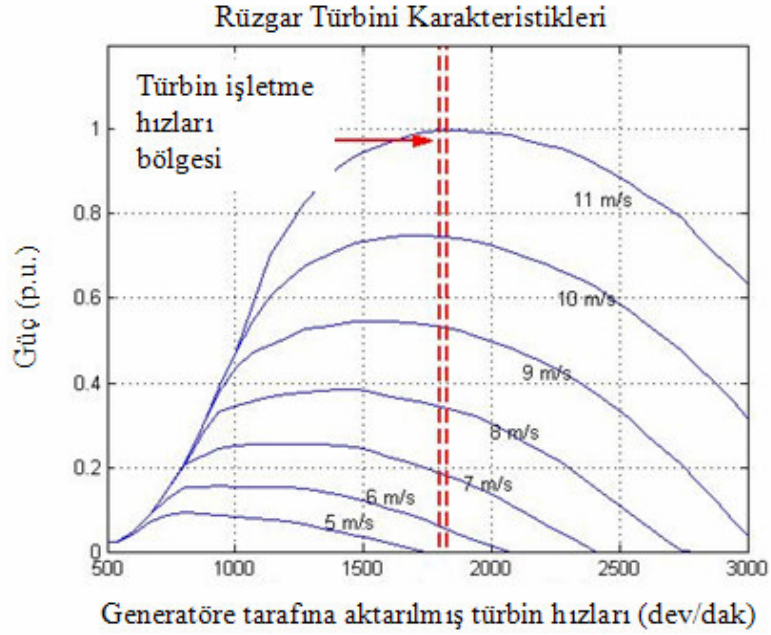
Burada kullanılan katsayıların değerleri, $c_1=0.5176$, $c_2=116$, $c_3=0.4$, $c_4=5$, $c_5=21$ ve $c_6=0.0068$ şeklindedir. c_p 'nin maksimum değerine ($c_{p(max)}=0.48$) $\beta = 0^0$ ve $\lambda = 8.1$ değerleri için ulaşılır.

λ 'nın bu özel değeri, nominal değer olarak tanımlanmıştır. $\beta = 0^0$ için türbinin $\lambda - c_p$ karakteristikleri, Şekil 3.1’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.1 Rüzgar türbininin $c_p - \lambda$ karakteristiği

Farklı rüzgar hızı değerlerine göre generatör hızı (devir/dakika) ve generatör gücü (p.u.) karakteristikleri, Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Rüzgar türbini karakteristikleri

İndüksiyon generatörü parametre değerleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Burada değeri p.u. birimiyle verilen büyüklükler için baz değerler, generatörün nominal güç ve gerilim değerleridir.

Çizelge 3.1 İndüksiyon generatörü parametre değerleri

Nominal güç ($P_{mechanic}$)	200 [HP]
Nominal gerilim (faz-faz)	460 [V]
Nominal frekans	60 [Hz]
Nominal devir sayısı	1785 [dev/dak]
Rotor tipi	Sincap kafesli
Stator rezistansı	0.01282 [p.u.]
Stator endüktansı	0.05051 [p.u.]
Rotor rezistansı	0.00702 [p.u.]
Rotor endüktansı	0.05051 [p.u.]
Atalet sabiti	0.3096 [s]
Sürtünme faktörü	0.0114 [p.u.]
Çift kutup sayısı	2

PEMFC sistemi, UC bank ile Şekil 2.10'da verilen konfigürasyon ile paralel olarak bağlıdır. D1 ve D2 diyotları üzerindeki gerilim düşümü, 0.8 V olarak, S1 ve S2 anahtarlarının iç dirençleri ise 0.001 Ω olarak kabul edilmiştir. Bu çalışmada benzetimi yapılan model için Maxwell Boostcap[®] PC2500 UC birimine ait parametreler kullanılmış ve UC biriminin karakteristikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Maxwell Boostcap[®] PC2500 UC karakteristikleri [33]

UC Parametreleri	Değer
Kapasitans	2700 \pm 20% [F]
İç direnç (dc)	0.001 \pm 25% [Ω]
Sızıntı akımı	0.006 [A], 72 hours, 25°C
İşletme sıcaklığı	-40°C to 65°C
Nominal akım	100 [A]
Gerilim	2.5 [V]
Hacim	0.6 [l]
Ağırlık	0.725 [kg]

Herbir UC birimi 2.5 V nominal gerilimde ve 2700 F kapasitesindedir. FC sistemden 400 V dc çıkış geldiği kabul edilerek, 400 V değerine ulaşacak şekilde 160 adet UC birimi seri bağlanarak (dizi başına 16.875 F) bir UC dizisi (string) elde edilmiştir. Enerji, 16.875 F değerindeki kapasitansta 400 V'ta saklanmaktadır. UC bankının simülasyon başlangıcındaki ilk gerilim değeri ise 363.5 V değerine ayarlanmıştır. UC boyutu ve bağlantı özellikleri farklı uygulamalardaki güç kapasitelerine uyacak şekilde değiştirilebilir.

Çizelge 3.3 FC sistem model parametre değerleri

Aktivasyon akım sabiti ($B_{(I/A)}$)	0.04777 [A^{-1}]
Aktivasyon gerilim sabiti ($C_{(V)}$)	0.0136 [V]
Dönüşüm faktörü (CV)	2
Faraday sabiti (F)	96484600 [C kmol ⁻¹]
Hidrojen zaman sabiti (τ_{H_2})	3.37 [s]
Hidrojen valf sabiti (K_{H_2})	4.22×10 ⁻⁵ [kmol (s atm) ⁻¹]
Hidrojen-Oksijen akış oranı ($r_{H,O}$)	1.168
K_r sabiti = $N_o/4F$	1.8449×10 ⁻⁶ [kmol (s A) ⁻¹]
Metan referans sinyali ($Q_{methref}$)	0.000015 [kmol s ⁻¹]
Yüksüz gerilim (E_o)	0.6 [V]
Hücre sayısı (N_o)	712
Oksijen zaman sabiti (τ_{O_2})	6.74 [s]
Oksijen valf sabiti (k_{O_2})	2.11 × 10 ⁻⁵ [kmol (s atm) ⁻¹]
FC iç direnci ($R_{iç}$)	0.00303 [Ω]
FC mutlak sıcaklığı (T)	343 [K]
Evrensel gaz sabiti (R_{YH})	8314.47 [J (kmol K) ⁻¹]
Kullanım oranı (U)	0.8
Su zaman sabiti (τ_{H_2O})	18.418 [s]
Su valf sabiti (K_{H_2O})	7.716 × 10 ⁻⁶ [kmol (s atm) ⁻¹]

PEMFC sistemin model parametreleri Çizelge 3.3'te verilmiştir ve FC sistemin simülasyon başlangıcındaki aktif güç çıkışı 2kW olarak kabul edilmiştir.

Çift köprülü doğrultucu modelinde kullanılan parametrelerin değerleri, Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Çift köprülü doğrultucu parametre değerleri

Bir tristörün bastırma direnci	2 [k Ω]
Bir tristörün bastırma kapasitansı	0.1 [μ F]
Bir tristörün iç direnci	1 [m Ω]
Senkronize 12-pulse generatorün darbe genişliği	80 [derece]
Filtre endüktansı	66 [mH]
Filtre kapasitansı	3300 [μ F]
PI gerilim kontrol sisteminin oransal kazancı	2
PI gerilim kontrol sisteminin integral kazancı	20
Referans gerilim	400 [V]

FC/UC sistemlerinin çıkışında bulunan yükseltici tip dc/dc dönüştürücünün parametrelerinin değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 dc/dc dönüştürücü parametre değerleri

Dönüştürücü endüktansı	66 [mH]
Dönüştürücü kapasitansı	2200 [μ F]
Yarı-iletken tipi	MOSFET
Ortalama anahtarlama frekansı	1000 [Hz]
PI gerilim kontrol sisteminin oransal kazancı	0.0001
PI gerilim kontrol sisteminin integral kazancı	0.01
Referans gerilim	400 [V]

dc/ac inverterler, Çizelge 3.6’da verilmiş olan parametrelere sahiptir.

Çizelge 3.6 dc/ac dönüştürücü model parametreleri

Yarı-iletken tipi	IGBT-DIODE
Bastırma direnci	2 [k Ω]
Bastırma kapasitansı	0.1 [μ F]
İç direnç	1 [m Ω]
Taşıyıcı sinyal frekansı	5 [kHz]
Modülasyon indeksi	0.98
Çıkış gerilimi frekansı	60 [Hz]

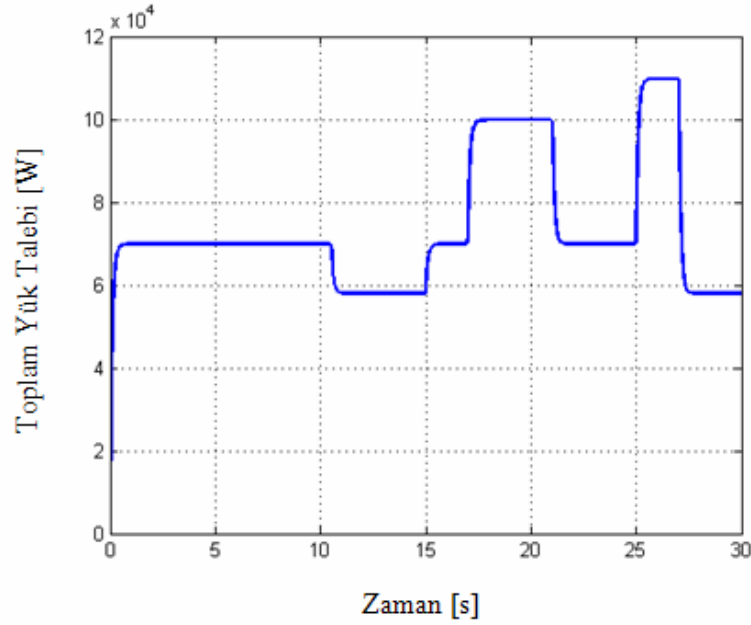
Bu inverterler, 0.98 modülasyon indeksi ile 60 Hz frekansındaki üç-fazlı ac çıkış gerilimini üretmek üzere kontrol edilmektedirler. Böylece, her ikisinin de giriş gerilimi 400 V olan inverterler, Denklem (2.18)’e göre fazlararası değeri 240V olan gerilim üreteceklerdir. Son olarak Çizelge 3.7’de çift köprülü doğrultucunun girişinde kullanılan transformatörün parametrelerinin değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.7 Transformatör parametreleri

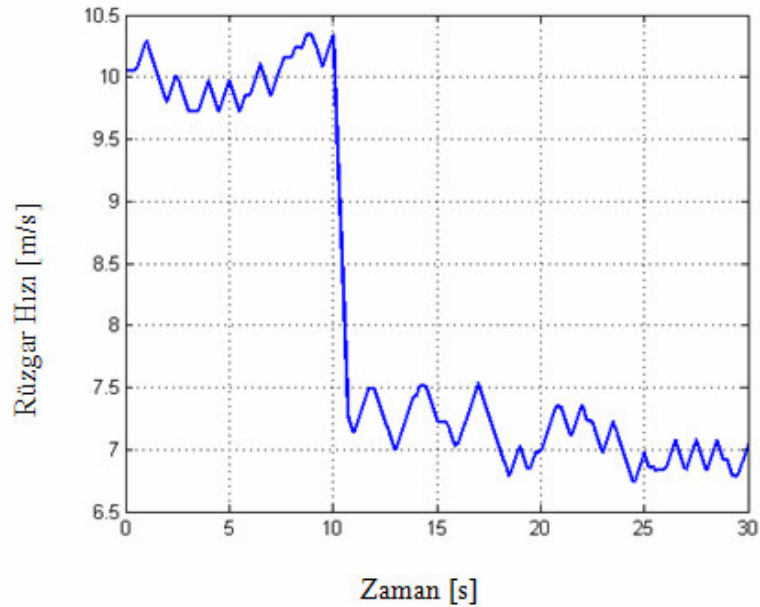
Nominal güç	120 [kW]
Nominal frekans	60 [Hz]
Giriş sargıları parametreleri (Yg) [V1 R1 L1]	460 [V], 0.00025 [p.u.], 0 [p.u.]
Çıkış sargıları parametreleri (Y) [V2 R2 L2]	230 [V], 0.00025 [p.u.], 0.0024 [p.u.]
Çıkış sargıları parametreleri (Delta) [V3 R3 L3]	230 [V], 0.00025 [p.u.], 0.0024 [p.u.]
Mıknatıslama (magnetizing) direnci	650 [Ω]
Mıknatıslama reaktansı	650 [Ω]

Bu çalışmada, Bölüm 1 ve Bölüm 2’de bileşenleri ayrı ayrı tanımlanan rüzgar/FC/UC sistem yük taleplerini karşılamak için kullanılmıştır. Yük talebinin rüzgar türbininden alınabilecek

maksimum gücün üzerinde olması halinde FC sistemi, ihtiyaç duyulan ilave gücü karşılar. UC bank da, kısa süreli bir güç kaynağı gibi çalışarak FC sistemin de karşılayamadığı ilave yükleri karşılar. Rüzgar türbini, FC sistemi ve UC bank; yukarıda bahsedilen hibrid topolojide Şekil 3.3'te gösterilen yük talebi profilini karşılamak için tasarımı yapılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir.

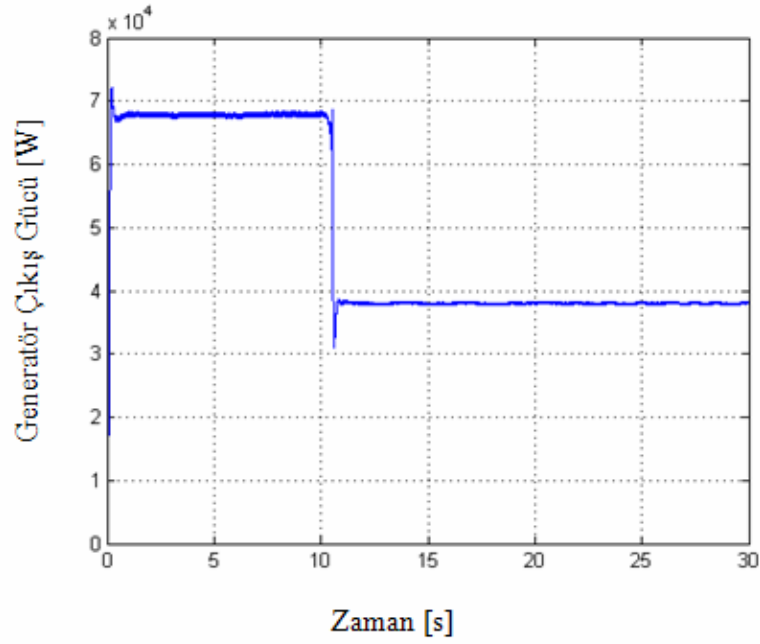


Şekil 3.3 Kullanıcının toplam yük talebi

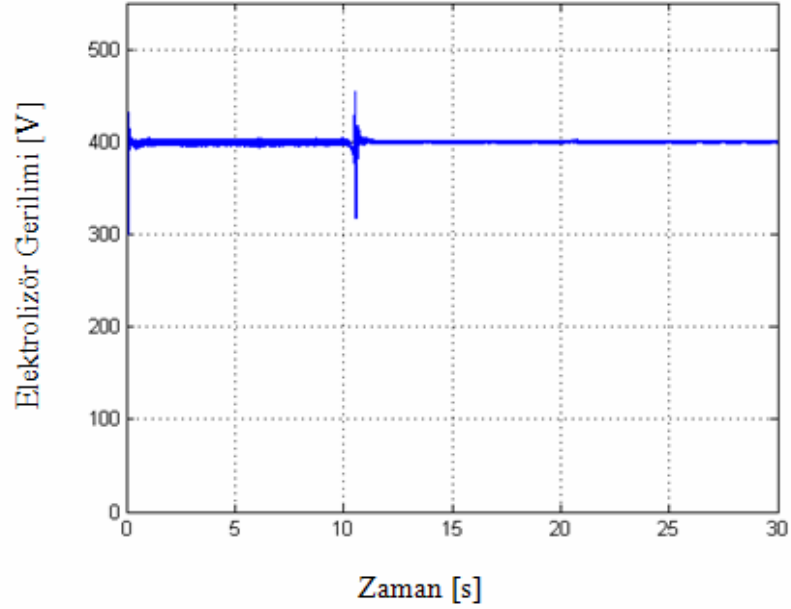


Şekil 3.4 Sistem simülasyonunda kullanılan rüzgar hızı profili

Sistemin dinamik davranışını gözlemek için Şekil 3.4'te verilen rüzgar profili kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan dinamik modelin simülasyonu, modelin yüksek nonlineer ve sıkı yapısı nedeniyle 1 GB RAM ve 1.6 GHz hızındaki işlemciye sahip bir bilgisayarda bile 1 saati bulmaktadır. Bu nedenle, rüzgar hızında yaklaşık 10. saniye civarlarında bir düşüş gösteren 30 saniyelik bir rüzgar hızı profili kullanılmıştır. Rüzgar hızındaki bu ani düşüş, rüzgar türbinine bağlı indüksiyon generatörünün ürettiği güçte ve elektrolizör geriliminde sırasıyla Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gözlenen etkilere neden olmuştur.

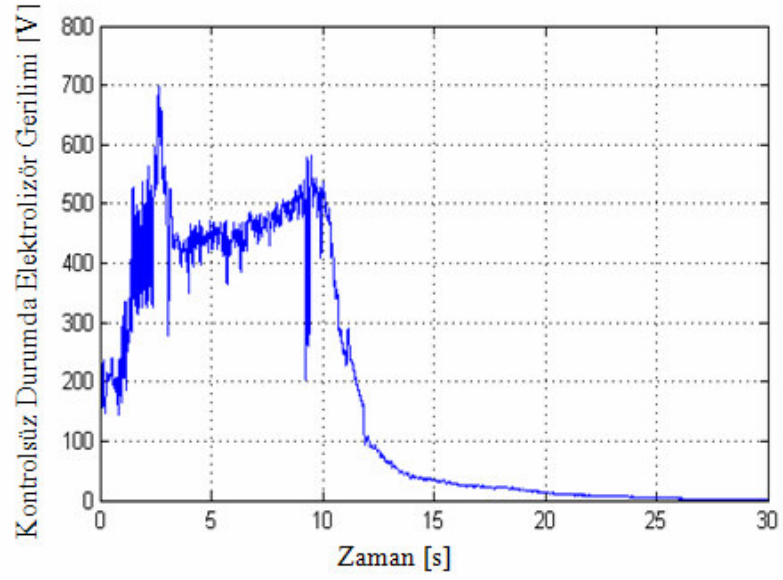


Şekil 3.5 Rüzgar türbinine akuple generatörün gücü

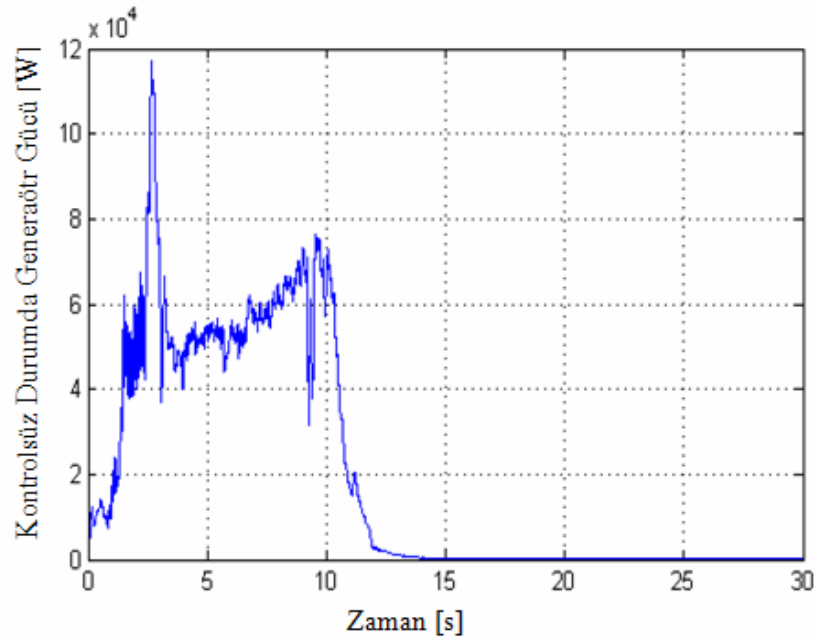


Şekil 3.6 Elektrolizör gerilimi (rüzgar türbini çıkışının dc bara gerilimi)

Şekil 3.5 rüzgar hızının düşmesiyle birlikte türbinden alınan güçte bir azalma gözlenmektedir. Her ne kadar rüzgar türbininden alınan güç azaldıysa da, çift köprülü doğrultucunun çift PI kontrollü tetikleme açısı sayesinde dc bara yani elektrolizör gerilimi, Şekil 3.6'da da gösterildiği gibi 400 V değerinde korunmuştur. Yük paylaşım stratejisi ve doğrultucunun tetikleme açısını kontrol eden PI kontrolörün kullanılmadığı durumda dc bara gerilimi ve rüzgar türbininden alınabilecek güç, sırasıyla Şekil 3.7 ve 3.8'de gösterildiği şekilde çöküntüye uğrayacaktı.

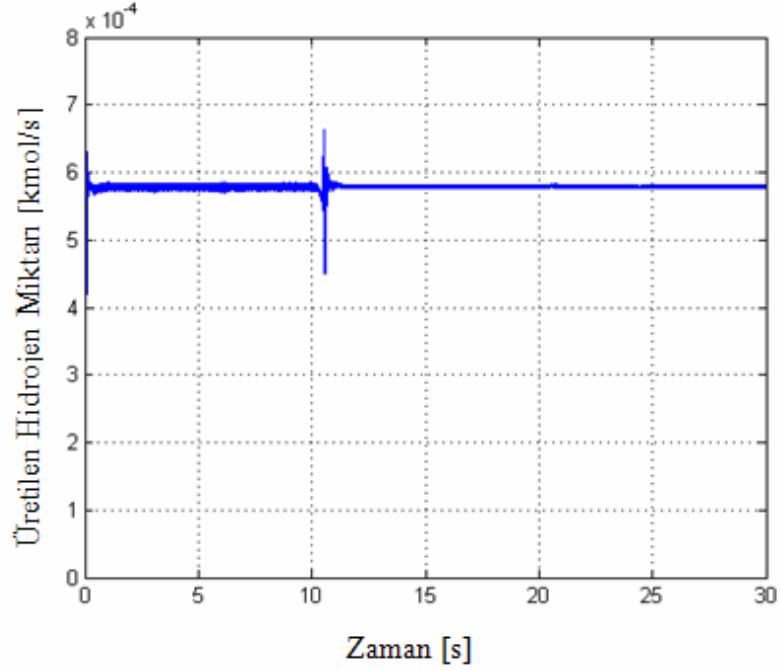


Şekil 3.7 PI kontrolör olmadığı durumda elektrolizör gerilimi



Şekil 3.7 PI kontrolör olmadığı durumda rüzgar türbini gücü

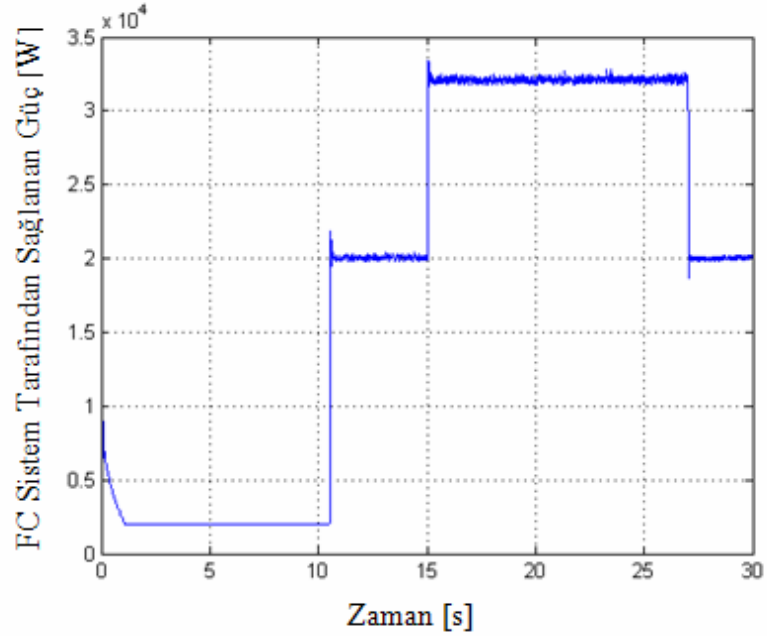
Elektrolizör gücüne bağlı olarak üretilen hidrojen mollerinin sayısı Şekil 3.8'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.8 Üretilen hidrojen miktarı

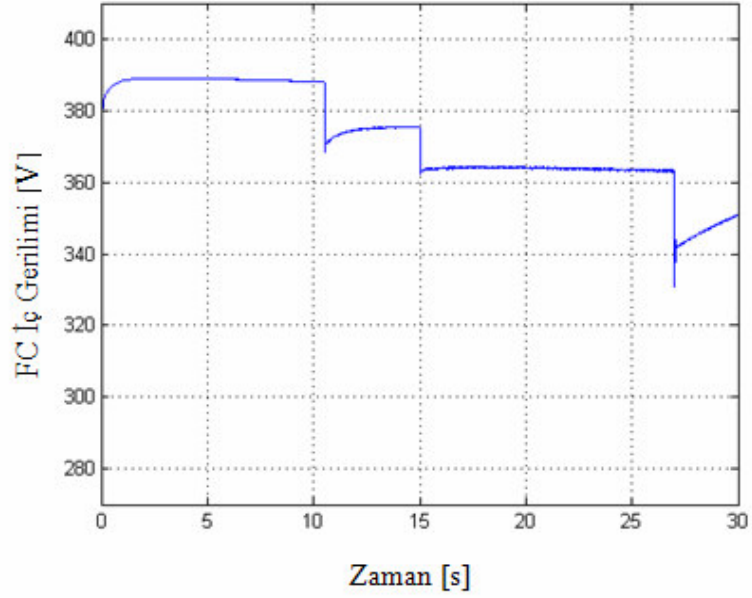
Hem yüke aktarılan hem de elektrolizöre aktarılan rüzgar türbini çıkış gücü, Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Her ne kadar türbin çıkış gücü azalmış olsa da, elektrolizörün nominal gücü olan 18 kW, halen elektrolizöre transfer edilebilmektedir. Türbin çıkış gücü simülasyon boyunca 18 kW değerinin altına düşmediği için, elektrolizörün de hidrojen üretim oranı Şekil 3.8'deki gibi aynı kalmıştır.

Yakıt hücreli elektrik santralleri, kapalı durumdan güç üretebileceği duruma gelene kadar uzun bir sürenin geçmesine ihtiyaç duyulmaktadırlar. Bu nedenle bu çalışmada, FC sistemden çekilen minimum güç ve başlangıç gücü 2 kW olarak ayarlanmış böylece, FC sistemin daha büyük miktarlardaki gücü üretebilmek üzere hazır durumda olması sağlanmıştır. Rüzgar türbininden sağlanan güç azaldıktan sonra, yük talebi ile rüzgar türbini gücü arasındaki fark FC sistem tarafından karşılanmaya başlamıştır. FC sistem tarafından karşılanan yük talebi miktarı, Şekil 3.9'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.9 FC sistem tarafından yüke aktarılan güç

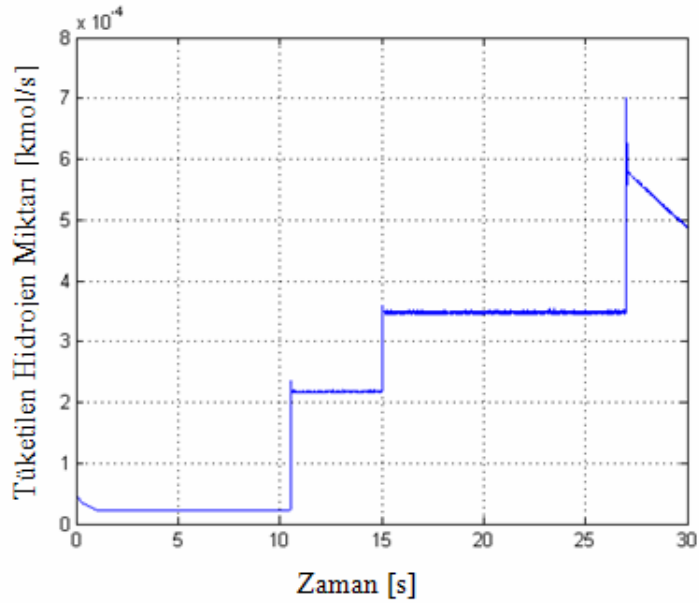
Şekil 3.3'te verilen yük profiline göre, 15. saniyeden itibaren gözlenen yük artışı FC sistem tarafından karşılanmaktadır. Yani hem rüzgar hızındaki düşüşten sonra yük talebi ile rüzgar gücü arasındaki farkı hem de yük talebindeki yeni artışı, yakıt hücresi sistemi karşılamaktadır. 15. saniyedeki yük artışı ile birlikte, FC sistem üretebileceği maksimum güce ulaşmış bulunmaktadır. FC sistem tarafından sağlanan güçteki değişim, FC sistemin karakteristiğine uygun olarak FC sistemin iç geriliminde Şekil 3.10'da gözlenen etkilere neden olmaktadır. Şekil 3.9 ve 3.10'dan da anlaşılabilceği gibi, FC sistemin çıkış gücü arttıkça FC sistemin iç gerilimi azalmaktadır. Güç ve gerilim arasında elde edilen bu ilişki de FC sistem modelinin yakıt pili karakteristiklerine uygun olarak doğru ve güvenilir bir şekilde çalıştığını teyit etmektedir.



Şekil 3.10 FC sistem iç gerilimi

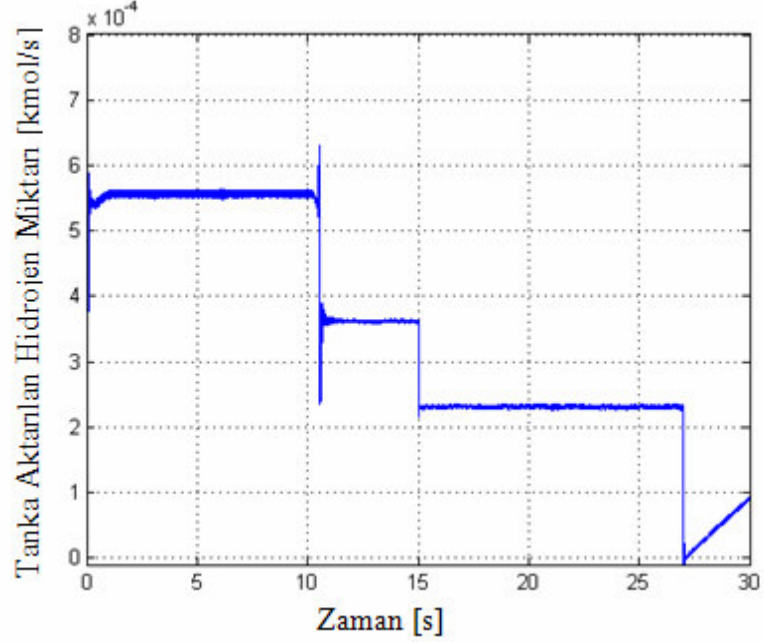
FC sistem geriliminin yük değişimlerine verdiği geçici cevap, Şekil 3.10'da verilen FC sistemin sağladığı yük gücüne göre değişmektedir.

FC sistem tarafından tüketilen hidrojen miktarı, FC sistemden çekilen güç ile orantılı olarak artar. FC sisteme doğru olan birim zamandaki hidrojen akış oranı, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



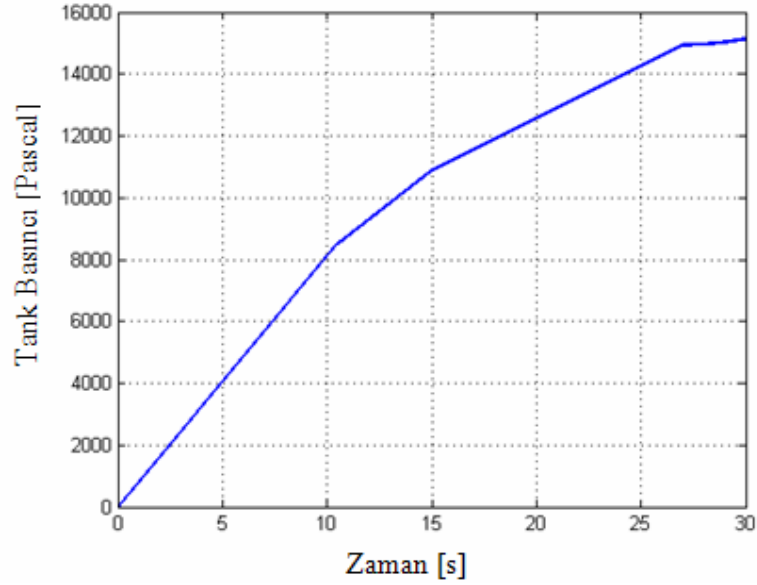
Şekil 3.11 FC sistem tarafından tüketilen hidrojen miktarı

Depolama tankına aktarılan hidrojenin akış oranı, Şekil 3.12’de verilmiştir. Depolanan hidrojenin miktarı elektrolizör tarafından üretilen hidrojen ile FC sistem tarafından tüketilen hidrojen miktarının arasındaki farka bağlıdır.



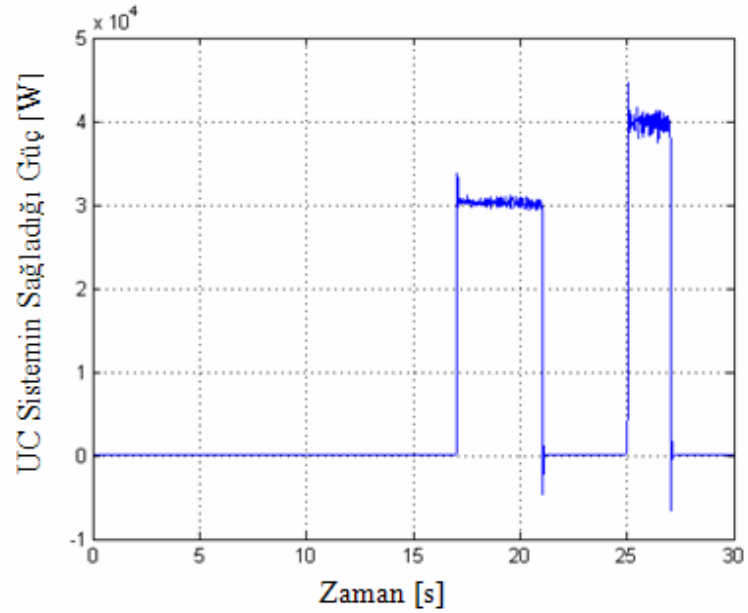
Şekil 3.12 Depolama için birim zamanda tanka aktarılan hidrojen molları sayısı

Hidrojen depolama tankının basınç değişimi, depoya aktarılan hidrojen miktarına bağlı olarak Şekil 3.13’teki gibi elde edilmiştir. Şekil 3.13’ten de anlaşılacağı gibi, tank basıncı depolanacak hidrojen miktarı arttıkça artmaktadır. Aynı zamanda Şekil 3.13’e göre basınç artış eğimi depolama tankına aktarılan hidrojen miktarı ile de orantılıdır.



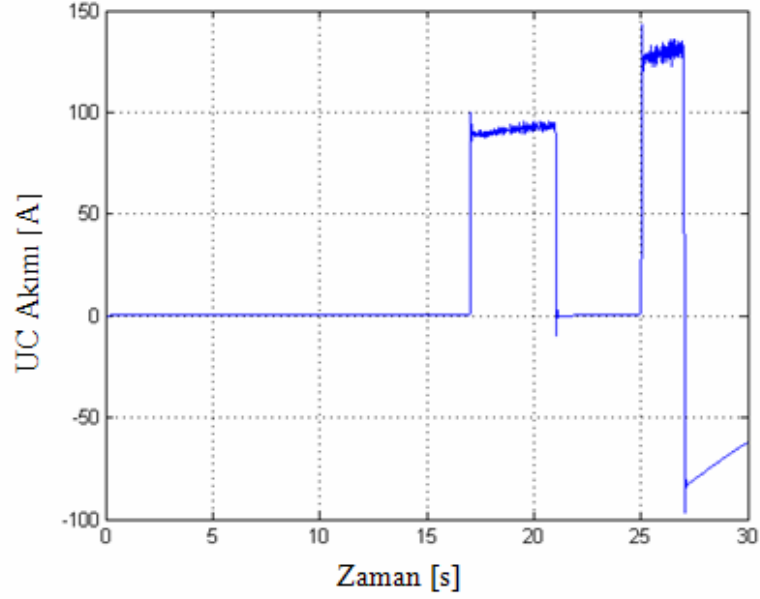
Şekil 3.13 Hidrojen depolama tankı basıncı

Şekil 3.3'te verilen yük talebi profiline göre, 17 ile 21 ve 25 ile 27 saniyeleri arasında tepe yük talepleri mevcuttur. Bu zaman aralıkları boyunca, FC sistem çıkış gücü, maksimum değerindedir ve rüzgar hızında da herhangi bir artış gözlenmemektedir. Bu durumda UC bank, dc baraya doğru deşarj olarak bu yüklenmeyi karşılamalıdır. UC bank tarafından karşılanan tepe yük güçleri Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



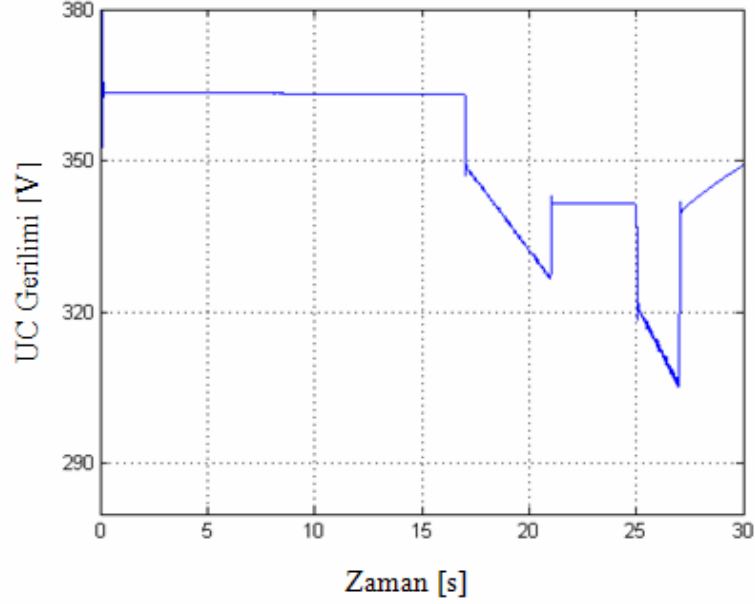
Şekil 3.14 UC sistem tarafından karşılanan güç

UC bank tarafından karşılanan bu güç, UC bank uçlarında Şekil 3.15'te elde edilen akım değişimine neden olmaktadır.



Şekil 3.15 Yük talebine bağlı olarak değişen UC akımı

Şekil 3.15'e göre, 17. saniyeden önceki UC akımı sıfırdır. UC akımı pozitif iken (17 ile 21 ve 25 ile 27. saniyeler arası), enerji UC bank'tan dc baraya doğru transfer edilmektedir. UC bank akımı negatif iken (27 ile 30. saniyeler arası), UC bank şarj olmaktadır. UC bank, ilk deşarjından sonra şarj olamamaktadır, çünkü bu aralıkta FC sistem zaten maksimum gücü ile yüklüdür. UC bank ancak 27. saniyeden sonra yük talebinin azalması ve böylelikle FC sistemden çekilen gücün azalması ile yeniden şarj olmaya başlayabilmiştir. Şekil 3.16, şarj ve deşarj olayları boyunca değişen ultra-kapasitör gerilimini göstermektedir. Şekil 3.16'dan da görülebileceği gibi, UC bank gerilimi yüke enerji transfer edildiği durumlarda azalmakta, şarj olduğu durumda da artmaktadır.



Şekil 3.16 UC bank gerilim değişimi

Simülasyonun başlangıcında UC bankın başlangıç gerilimi 363.5 V değerindedir. Belirli bir miktar enerjinin yük tarafına aktarılması ile UC bank geriliminde bir azalma meydana gelmektedir. Örnek olarak UC bankın, 17 ve 21. saniyeler arasında 4 saniye boyunca 30 kW'lık bir güç aktarımında bulunması gerekmektedir. $30000W \times s = 120000Ws$ değerindeki enerjinin yük tarafına aktarılması ile ultra-kapasitör gerilimi 363.5 V değerinden 343.38 V değerine düşmüştür. Bu enerji ve gerilim değişimi bilgileri, Eşitlik (3.3) kullanılarak matematiksel olarak da ispatlanabilir.

$$E_{UC} = \frac{1}{2}C(V_i^2 - V_f^2) \quad (3.3)$$

$$30000 \times 4 = \frac{1}{2}16.875 (363.5^2 - V_f^2) \quad (3.4)$$

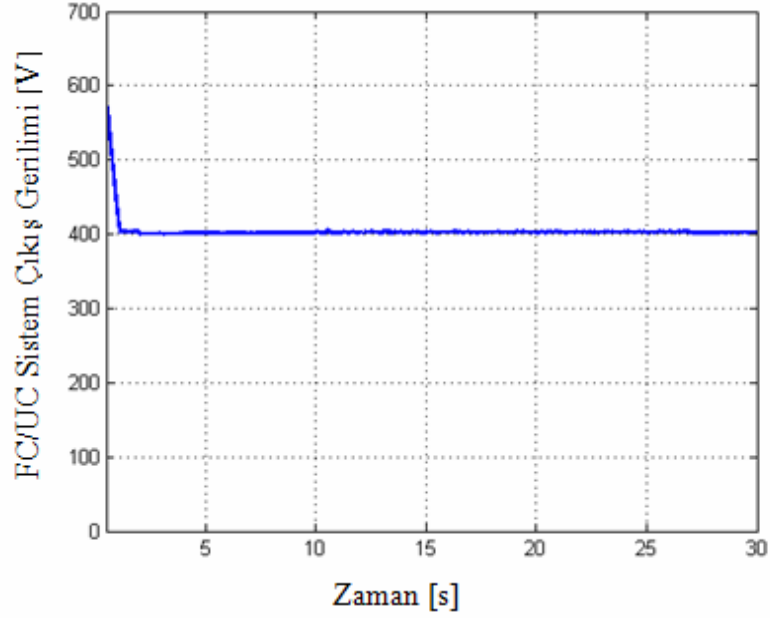
$$V_f = \sqrt{363.5^2 - \frac{30000 \times 4 \times 2}{16.875}} \quad (3.5)$$

$$V_f = 343.38V \quad (3.6)$$

Simülasyonun 27. saniyesinden itibaren ise, FC sistem gücü maksimum değerinin altına inebildiği için FC tarafından, UC bankın yeniden şarj edilebilmesi mümkün olmuştur ve UC

bank, gerilimi FC çıkış gerilimine eşit oluncaya kadar bir enerji kazanımı yapmıştır.

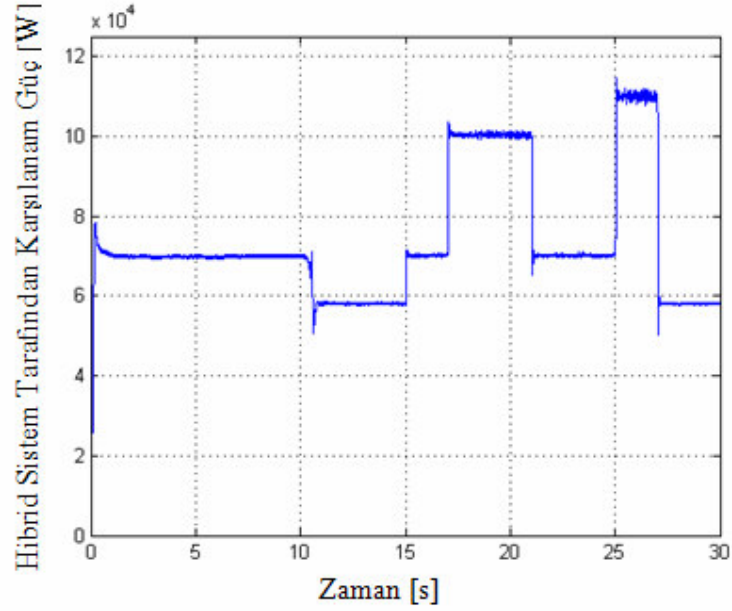
Her ne kadar UC ve FC sistemlerin gerilimleri yük değişimlerine göre değişimler ve dalgalanmalar yaşasa da, FC/UC hibrid sisteminin çıkışında bulunan dc/dc dönüştürücü, yük tarafı gerilimini sabit ve kararlı tutabilmektedir. Bu dc/dc dönüştürücünün çıkış gerilimi, Şekil 3.17’de verilmiştir. Başlangıçtaki ilk bir kaç saniyede gözlenen yüksek gerilim, başlangıç şartlarına bağlı bir geçici bir durumdur ve hızlı bir şekilde sönümlenmektedir.



Şekil 3.17 dc/dc dönüştürücü çıkış gerilimi

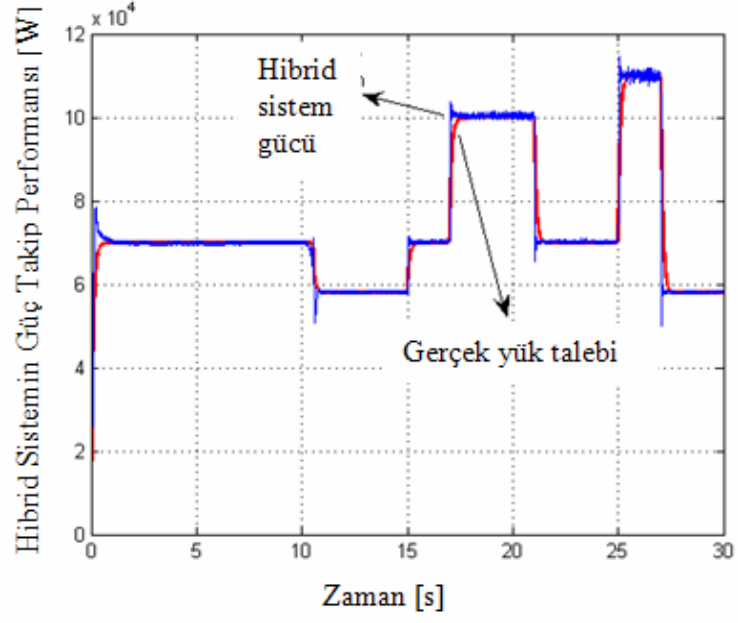
Rüzgar türbininin çıkışına bağlı PI kontrollü çift köprülü ac/dc doğrultucu ve FC/UC hibrid sisteminin çıkışına bağlı PI kontrollü dc/dc dönüştürücü, sistemdeki her iki dc baranın da sırasıyla, Şekil 3.6 ve Şekil 3.17’de gösterildiği gibi sabit gerilimde korunmasını sağlamıştır. Her iki dc baranın da gerilimlerinin 400 V değerinde tutulması sayesinde, dc/ac inverterler yük tarafına istenen miktardaki gücün 60 Hz frekansında ve fazlararası 240 V gerilim değerinde taşınmasında kullanılabilmiştir.

Yük tarafına rüzgar/FC/UC hibrid topolojisi tarafından aktarılan toplam güç, Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 Hibrid sistem tarafından yük tarafına aktarılan güç

Son olarak, kullanıcı güç ihtiyacı ve rüzgar/FC/UC sistem tarafından yük tarafına aktarılan güç değişimleri Şekil 3.19'da verilmiştir. Şekil 3.3'te, geliştirilen rüzgar/FC/UC sistem tarafından karşılanması beklenen toplam yük talebi verilmiştir. Zaman sabitleri, kontrol gecikmeleri ve ölçüm hataları gibi fiziksel sınırlamalar nedeniyle yük talep gücü ile üretilen güç arasında Şekil 3.19'da gözlendiği gibi küçük farklılıklar söz konusu olmuştur. Bu sınırlar altında geliştirilen ve önerilen sistem, rüzgar hızı değişimlerine karşı başarılı bir şekilde uyum göstererek yük talebini verimli bir şekilde takip edebilmiştir.



Şekil 3.19 Hibrid topolojinin güç takip performansı

4. SONUÇLAR

Günümüzde gittikçe artan enerji gereksinimleri ve fosil yakıtların hızla tükenmesi bütün dünyanın alternatif enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yapmasına neden olmuştur. Yakın gelecekte fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması ve Kyoto kriterlerinde belirtildiği gibi karbondioksit emisyonunun da sınır değerlerin altında tutulması hedeflenmektedir. Bu nedenle rüzgar enerjisi, güneş enerjisi ve diğer yenilenebilir doğal enerji kaynaklarının üzerine yapılan çalışmalar gittikçe artmaktadır. Öte yandan, rüzgar ve güneş enerjili sistemlerin çıkış güülerinin doğal şartlara bağımlılığı, bu enerji kaynaklarının başka enerji kaynakları ve/veya depolama sistemleri ile birlikte kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle, son zamanlarda hibrid sistemlerle ilgili çalışmalar yapan araştırmacılar, mevcut kaynaklar arasında etkin yük paylaşımı üzerine de yoğunlaşmaktadırlar. Bu noktada hemen göze çarpan yakıt hücresi ve elektrolizör teknolojilerinin sürdürülebilir, alternatif ve çevre dostu bir çözüm olması beklenmektedir.

Bu çalışmada, şebekeden bağımsız bir kullanıcı için yeni bir rüzgar/FC/UC sistemi uygun güç akış kontrolörleri ile birlikte tasarlanmış ve modellenmiştir. Şebekeden bağımsız kullanıcılar ve dağılmış güç üretimi (distributed generation) özellikle yerinde üretim-yerinde tüketim sağladığı ve iletim-dağıtım kayıplarını azalttığı için son yıllarda önem kazanmıştır. Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarından alınabilecek anlık güç, rüzgar hızı gibi çevresel şartlara oldukça bağımlıdır. Rüzgar sisteminin bu eksikliklerinin üstesinden gelebilmek için rüzgar sistemi FC/UC sistemi ile yeni bir topoloji kullanılarak birleştirilmiştir. Bu yeni topoloji, farklı rüzgar hızı ve farklı yük ihtiyaçları altında mükemmel bir performans göstermiştir. Amaçlanan bu sistem, enterkonnetke olmayan uzak bölgeler için veya şebekeden izole çalışan kojenerasyon güç sistemleri için ideal olmayan rüzgar hızı karakteristiklerinde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] The Energy Foundation Annual Report, The Energy Foundation, San Francisco, CA, (2001).
- [2] M.J. Khan, M.T. Iqbal, Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System, *J. Renewable Energy* 30 (3) (2005) 421-439.
- [3] H. De Battista, R.J. Mantz, F. Garelli, Power Conditioning for a Wind-Hydrogen Energy System, *J. Power Sources*, Article in Press (2005).
- [4] U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Wind & Hydropower Technologies Program, Wind Energy Research Area, <http://www.eere.energy.gov>
- [5] M.C. Williams, J.P. Strakey and S.C. Singhal, U.S. Distributed Generation Fuel Cell Program, *J. Power Sources*, 131 (1-2) (2004), 79-85.
- [6] R.M. Dell, D.A.J. Rand, Energy storage – a key technology for global energy sustainability, *J. Power Sources*, 100 (1-2) (2001) 2-17.
- [7] B.D. Shakyaa, Lu Ayea, P. Musgraveb, Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind–photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma, *Int. J. Hydrogen Energy*, 30 (1) (2005) 9-20.
- [8] A. Burke, Ultracapacitors: Why, How and Where is the Technology, *J. Power Sources*, 91(1) (2000) 37-50.
- [9] F.I. Khan, K. Hawboldt and M.T. Iqbal, Life Cycle Analysis of Wind-Fuel Cell Integrated System, *J. Renewable Energy* 30 (2) (2005) 157-177.
- [10] B. Delfino and F. Fornari, Modeling and Control of an Integrated Fuel Cell-Wind Turbine System, *IEEE PowerTech Conference*, Bologna 2 (2003) 6.
- [11] D.A. Bechrakis, E.J. McKeogh and P.D. Gallagher, Simulation and Operational Assessment for a Small Autonomous Wind-Hydrogen Energy System, *J. Energy Conversion and Management* 47 (1) (2006) 46-59.
- [12] F. Barbir, PEM Electrolysis for Production of Hydrogen from Renewable Energy Sources, *J. Solar Energy* 78 (5) (2005) 661-669.
- [13] H. Gorgun, Dynamic Modeling of a Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolyzer, *Int. J. Hydrogen Energy*, Article in Press. (2005).
- [14] M. Uzunoglu and M. S. Alam, Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultra-capacitor system for stand alone applications, *IEEE Trans. Energy Conversion*, accepted for publication, (2006)
- [15] M. Uzunoglu, A. Kizil and O.C. Onar, Her Yonu ile MATLAB (Proficiency in MATLAB, 2nd Edition), Turkmen Kitabevi, Istanbul, 2003.
- [16] MATLAB Simulink Simulation and Model Based Design User's Guide, Version 6.3, http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/simulink/sl_using.pdf
- [17] MATLAB SimPowerSystems for Use with Simulink User's Guide, Version 4.1.1, http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/phymod/powersys/powersys.pdf

- [18] E. S. Abdin and W. Xu, Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine – Induction Generator Unit, *IEEE Trans. Energy Conversion* 15 (1) (2000) 91-96.
- [19] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons Ltd., New York, 1998.
- [20] E. Muljadi, C.P. Butterfield, Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation, *IEEE Trans. Industry Applications* 37 (1) (2001) 240-246.
- [21] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, Wiley-IEEE Press (2002).
- [22] M.Y. El-Shark, A. Rahman, M.S. Alam, P.C. Byrne, A.A. Sakla and T. Thomas, A Dynamic Model for a stand-alone PEM Fuel Cell Power Plant for Residential Applications, *J. Power Sources* 138 (1-2) (2004) 199-204.
- [23] R.M. Nelms, D.R. Cahela and B.J. Tatarchuk, Modeling double-layer capacitor behavior using ladder circuits, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems* 39 (2) (2003) 430-438.
- [24] K.H. Hauer, *Analysis Tool for Fuel Cell Vehicle Hardware and Software (Controls) with an Application to Fuel Cell Economy Comparisons of Alternative System Designs*, Ph.D. Dissertation, Dept. of Transportation Technology and Policy, University of California Davis (2001).
- [25] R.L. Spyker and R.M. Nelms, Analysis of double-layer capacitors supplying constant power loads, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems* 36 (4) (2000) 1439-1443.
- [26] R.L. Spyker and R.M. Nelms, Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems* 36 (3) (2000) 829-836.
- [27] O. Ulleberg, *Stand-alone Power Systems for the Future: Optimal Design. Operation and Control of Solar-Hydrogen Energy Systems*, PhD Dissertation, Norwegian University of Science and Technology (1998).
- [28] K. Sapru, N.T. Stetson, S.R. Ovshinsky, Development of a Small Scale Hydrogen Production Storage System for Hydrogen Applications, *The 32nd Intersociety Conference* 3 (1997) 1947-1952.
- [29] T. Schucan, *Case Studies of Integrated Hydrogen Energy Systems*, International Energy Agency Hydrogen Implementing Agreement, Final Report, Paul Scherrer Institute, Switzerland (2000).
- [30] Honda fuel cell power FCX (2004). <http://world.honda.com/FuelCell/FCX/FCXPK.pdf>
- [31] L. Gao, R.A. Dougal, and S. Liu, Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid, *IEEE Trans. on Power Electronics* 20 (1) (2005) 236-243.
- [32] M. Cacciato, F. Caricchi, F. Giuhlii and E. Santini, A critical evaluation and design of bi-directional dc/dc converters for super-capacitors interfacing in fuel cell applications, *39th IAS Annual Meeting IEEE Industry Appl. Conference* 2 (2004) 1127-1133.
- [33] Electric Double Layer Capacitor: BOOSTCAP[®] Ultracapacitor <http://www.maxwell.com/pdf/uc/datasheets/PC2500.pdf>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	28.09.1982	
Doğum yeri	Ankara	
Lise	1996-2000	Bahçelievler Lisesi
Lisans	2000-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fak., Elektrik Müh. Bölümü
Yüksek Lisans	2004-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği. Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

2003-2004	Figes Ltd. Şti. Uygulama Mühendisi
2004-Devam ediyor	YTÜ Elektrik Müh. Bölümü Araştırma Görevlisi