



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

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE STATİK VE DİNAMİK GERİLİM
KARARLILIĞI İÇİN UPFC-EDS ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

TUBA EMİNE BOZKURT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. MEHMET KENAN DÖŞOĞLU**

DÜZCE, 2020

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE STATİK VE DİNAMİK GERİLİM
KARARLILIĞI İÇİN UPFC-EDS ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Tuba Emine BOZKURT tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Muhsin Uğur DOĞAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 14/07/2020

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

14 Temmuz 2020

Tuba Emine BOZKURT

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımlarından dolayı çok değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen çok değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DURSUN ve Öğr. Gör. Gökhan POYRAZ'a da şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili anneme,babama ve eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

14 Temmuz 2020

Tuba Emine BOZKURT

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. TEZİN AMACI	5
2. GERİLİM KARARLILIĞI.....	7
2.1. KÜÇÜK BOZUCU ETKİ GERİLİM KARARLILIĞI (KBEGK)	8
2.2. BÜYÜK BOZUCU ETKİ GERİLİM KARARLILIĞI (BBEGK)	8
2.3. KISA SÜRELİ GERİLİM KARARLILIĞI (KSGK)	8
2.4. UZUN SÜRELİ GERİLİM KARARLILIĞI (USGK)	8
2.5. ÇATALLANMA ANALİZİ	9
2.6. SÜREKLİ YÜK AKIŞI.....	10
2.7. PARAMETRELEŞTİRME	11
2.8. TAHMİN EDİCİ ADIM	13
2.9. DÜZELTİCİ ADIM	14
2.10. ADIM BOYUTU KONTROLÜ	14
3. GELİŞTİRİLMİŞ ESNEK AC İLETİM SİSTEMİ (FACTS) CİHAZLARI.....	15
3.1. TRİSTÖR TABANLI FACTS CİHAZLARI:	15
3.1.1. Statik Var Kompanzatör (SVC)	15
3.1.2. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC).....	16
3.2. GERİLİM KAYNAKLI EVİRİCİ TABANLI ESNEK AC İLETİM SİSTEMİ (FACTS) CİHAZLARI	17
3.2.1. Statik Senkron Seri Kompansatör (SSSC)	17
3.2.2. Statik Senkron Kompansatör (STATCOM).....	18
3.2.3. Birleşik Güç Akış Kontrolü (UPFC)	19
3.3. BAĞLANTI ŞEKİLLERİNE GÖRE (FACTS) CİHAZLARI.....	19
3.3.1. Seri FACTS Denetleyiciler	19
3.3.2. Paralel FACTS Denetleyiciler	20
3.3.3. Birleştirilmiş Seri-Seri FACTS Denetleyiciler.....	20
3.3.4. Birleştirilmiş Seri-Paralel FACTS Denetleyiciler	20
4. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİ.....	21
4.1. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN ÇALIŞMASI	21
4.2. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN AVANTAJLARI	21
4.3. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN TEORİSİ	22

4.4. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN AKTİF VE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ.....	23
4.5. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN GÜÇ ENJEKTE MODELİ	27
5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ (EDS)	31
5.1. YAKIT HÜCRESİ	31
6. BENZETİM ÇALIŞMASI	34
7. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI	37
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
9. KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	65



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Çatallanma analizi	9
Şekil 2.2. Tahmin edici – düzeltici işlemi	10
Şekil 3.1. SVC devre modeli	16
Şekil 3.2. TCSC devre modeli	17
Şekil 3.3. SSSC devre modeli	18
Şekil 3.4. STATCOM devre modeli	18
Şekil 4.1 UPFC devre modeli	22
Şekil 4.2 UPFC'nin iki makinalı sistemde gösterimi	23
Şekil 4.3 UPFC'nin gerilim fazör diyagramı	24
Şekil 4.4. İki makinalı güç sisteminin UPFC ile geliştirilmiş modeli	24
Şekil 4.5. Gerilim kaynaklı eviricinin seri devre bağlantısı	27
Şekil 4.6. Akım kaynağı ile elde edilen yeni devre modeli	28
Şekil 4.7. i ve j baraları arasında UPFC modellemesi	30
Şekil 6.1. 14 Baralı güç sistemi devre modeli	34
Şekil 7.1. IEEE 14 baralı sistemde sürekli durum çalışmada yüklenme parametresi	37
Şekil 7.2. IEEE 14 baralı sistemde sürekli durum çalışmada baraların genlik profili	38
Şekil 7.3. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi	38
Şekil 7.4. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili	39
Şekil 7.5. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi	40
Şekil 7.6. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili	40
Şekil 7.7. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile yüklenme parametresi	41
Şekil 7.8. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili	42
Şekil 7.9. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi	44
Şekil 7.10. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili	44
Şekil 7.11. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi	45
Şekil 7.12. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili	46
Şekil 7.13. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili	47
Şekil 7.14. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili	47
Şekil 7.15. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada yüklenme parametresi	49
Şekil 7.16. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada baraların genlik profili	49
Şekil 7.17. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi	50
Şekil 7.18. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı	

baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili	50
Şekil 7.19. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi	51
Şekil 7.20. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili ...	52
Şekil 7.21. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile yüklenme parametresi	53
Şekil 7.22. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili ...	53
Şekil 7.23. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi	55
Şekil 7.24. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili.....	55
Şekil 7.25. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi	56
Şekil 7.26. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili	57
Şekil 7.27. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile yüklenme parametresi	58
Şekil 7.28. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili	58

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 6.1. 14 baralı güç sisteminin hat bilgileri	35
Çizelge 6.2. 14 baralı güç sisteminin kademe değiştirme bilgileri	35
Çizelge 6.3. 14 baralı güç sisteminin generatör bilgileri	36
Çizelge 7.1. 9–14 numaralı hatlarda bulunan UPFC’nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri	42
Çizelge 7.2. 4–5 numaralı hatlarda bulunan UPFC’nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri	48
Çizelge 7.3. Geçici durum esnasında 9–14 numaralı hatlarda bulunan UPFC’nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri	54
Çizelge 7.4. Geçici durum esnasında 4–5 numaralı hatlarda bulunan UPFC’nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri	59

KISALTMALAR

BBEGK	Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı
EDS	Enerji depolama sistemi
FACTS	Esnek AC iletim sistemi
IEEE	Uluslararası elektrik elektronik mühendisliği
KBEGK	Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı
KSGK	Kısa süreli gerilim kararlılığı
PI	Oransal integral
PSAT	Güç sistemleri analiz programı
SSSC	Statik senkron seri kompanzatör
STATCOM	Statik senkron seri kompanzatör
SVC	Statik var kompanzatör
TCR	Tristör kontrollü reaktör
TCSC	Tristör kontrollü seri kompanzatör
TSC	Tristör anahtarlama kapasitör
UPFC	Birleştirilmiş güç akışı kontrolü
USGK	Uzun süreli gerilim kararlılığı
YGDA	Yüksek gerilim doğru akım

SİMGELER

b_s	Kaynak süseptansı
e_g	Evirici genliği
e_{g0}	Başlangıç evirici genliği
H_2	Hidrojen oranı
I_k	Yakıt hücresi akımı
I_s	Akım kaynağından geçen akım
i_k	Başlangıç yakıt hücresi akımı
k_{Gi}	Yüklenme durumu değişirken i barasındaki üretilen yük değişim oranı
k_{Li}	Yüklenme durumu değişirken i barasındaki özel yük değişim oranı
K_m	Modülasyon katsayısı
K_r	DC katsayısı
m	Modülasyon genliği
p	Bir sonraki nokta için belirtilen adım büyüklüğü
P	Hattan akan aktif güç
P_0	Başlangıç aktif güç değeri
P_g	Bağlı olduğu bara aktif gücü,
P_{Gi}	i barasındaki üretilen aktif güç
P_{Gi0}	i barasındaki aktif güç üretiminin başlangıç değeri
P_{Li}	i barasındaki yüklerin aktif gücü
P_{Li0}	Yükün aktif güç başlangıç değeri
P_{Ti}	i barasındaki sisteme verilen aktif güç
q	Soğutma katsayısı
Q_g	Bağlı olduğu bara reaktif gücü
Q_{Gi}	i barasındaki üretilen reaktif güç
Q_{Gi0}	i barasındaki reaktif güç üretiminin başlangıç değeri
Q_{Li}	i barasındaki yüklerin reaktif gücü,
Q_{Li0}	Yükün reaktif güç başlangıç değeri
Q_{r0}	Başlangıç reaktif güç değeri
Q_{Ti}	i barasındaki sisteme verilen reaktif güç
r ve Y	Özel değerler
$S_{\Delta base}$	Yüklenme durumu için görünür güç değeri
T_e	Küçük zaman sabiti
t_k	Adım boyut kontrolü
T_m	Modülasyon zaman sabiti
U_{lim}	Minimum veya maksimum yakıt tüketimi
V	Hat gerilimi
V_b	Bara gerilim genliği vektörü
V_g	Bağlı olduğu bara gerilimi
V_i	i barasının gerilimi
V_{k0}	Yakıt hücresi başlangıç DC gerilimi
V_{pq}	Toplam p-q gerilim ifadesi
V_r	Hat uç gerilimi
V_{ref}	Referans gerilimi
V_s	Kaynak uç gerilimi
V_t	Yakıt hücresinin terminal gerilimi

X	Hat empedansı
x_k	Sürekli değer alan parametre olarak durum değişkeni
X_s	Kaynak reaktansı
X_t	Transformatör reaktansı
y_{ij}	i ve j baralarındaki sistem admitans matrisi elemanları
δ	Faz açısı
δ_b	Bara gerilim açısı vektörü
δ_i	i barasının gerilim açısı
δ_j	j barasının gerilim açısı
η	Sürekli değer alan parametre olarak durum değişkeni için Tahmin edici değer
θ_i ve θ_j	i ve j numaralı baralardaki gerilim açıları
θ_s	Kaynak geriliminin açısı
θ_t	Yakıt hücresinin terminal gerilim açısı
λ	Yüklenme durumu vektörü
λ_y	Yük parametresi
ρ	İletim açısı
φ_i	i barasındaki yük değişimindeki güç faktörü açısı
χ	Durum değişkeni
$\bar{V}_i$	i barasının referans vektörü

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDE STATİK VE DİNAMİK GERİLİM KARARLILIĞI İÇİN UPFC-EDS ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Tuba Emine BOZKURT

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

Temmuz 2020, 64 sayfa

Günümüzde iletim hatlarının ve baraların kontrolünün sağlanmasında güç elektroniği tabanlı olan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç sistemlerinin farklı analiz yaklaşımlarında FACTS cihazları tercih edilmektedir. FACTS cihazları içerisinde kontrol etme yeteneği en güçlü olan Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü (UPFC)'dir. UPFC bara gerilimlerini reaktif güce bağlı olarak kontrol ederken, iletim hattını empedans ve akıma göre kontrol etmektedir. Bu tez çalışmasında, Uluslararası Elektrik Elektronik Mühendisliği (IEEE) 14 baralı güç sisteminde UPFC'nin statik ve dinamik gerilim kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. IEEE 14 baralı güç sistemindeki analiz için Güç Sistemleri Analiz Programı (PSAT) kullanılmıştır. Statik ve dinamik gerilim kararlılığı çalışma limitlerinin geliştirilmesi ve sistemin kararlı bölgede kalması için UPFC ile birlikte Enerji Depolama Sistemi (EDS) elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. Statik gerilim kararlılığı için sürekli durum çalışmasında UPFC-EDS'nin farklı iletim hattı ve farklı yük barasına bağlı olduğu durumdaki sistemin yüklenme olayları incelenirken, dinamik gerilim kararlılığı analizi için iletim hattında meydana gelen hat kopmaları durumları için gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkileri UPFC-EDS ile incelenmiştir. Ayrıca UPFC-EDS ile bara gerilim profilleri de analiz edilmiştir. UPFC ile EDS'nin birlikte kullanılması durumunda sistemin yüklenme parametre değerinin arttığı ve bara gerilim profillerinin iyileştiği görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Statik ve dinamik gerilim kararlılığı, UPFC-EDS, Bara gerilim profilleri, PSAT.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF UPFC-ESS EFFECTS FOR STATIC AND DYNAMIC VOLTAGE STABILITY IN POWER SYSTEMS

Tuba Emine BOZKURT

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronic
and Computer Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

July 2020, 64 pages

Nowadays, Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) devices, which are based on power electronics, are widely used in the control of transmission lines and bus. FACTS devices are preferred in different analysis approaches of power systems. Unified Power Flow Control (UPFC) is the most powerful controlling capability among FACTS devices. The UPFC controls bus voltages based on reactive power, while controlling the transmission line according to impedance and current. In this thesis, static and dynamic voltage stability analysis of UPFC has been carried out in the International Electrical-Electronics Engineering (IEEE) 14 bus power system. Power Systems Analysis Toolbox (PSAT) was used for the analysis of IEEE 14 bus power system. In order to improve the static and dynamic voltage stability operating limits and to keep the system in a stable area, A fuel cell from the Energy Storage System (EDS) components was used together with UPFC. In the steady state study for static voltage stability, while UPFC-EDS is connected to different transmission line and different load bus are examined to loading events of the system, the voltage-maximum load parameter relations for the case of outline occurring in the transmission line for dynamic voltage stability analysis are examined with UPFC-ESS. Besides, bus voltage profiles were analyzed with UPFC-ESS. When UPFC and EDS are used together, it is seen that the loading parameter value of the system increases and bus voltage profiles are improved.

Keywords: Static and dynamic voltage stability, UPFC–ESS, Bus voltage profiles, PSAT.

1. GİRİŞ

Yarı iletken teknolojisinin hızlı gelişimi elektrik güç sistemlerinin güç elektroniği aygıtları vasıtasıyla kontrol edilmesini mümkün kılmaktadır [1]. Bu cihazlar Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) adı verilen yeni bir teknolojiyi oluşturmuştur [2], [3]. FACTS teknolojisi, aktif-reaktif gücü kontrol etmek ve mevcut iletim sistemlerinin kullanılabilir kapasitesini arttırmak için yeni fırsatlar sunmaktadır. Bir hat üzerinden gücün kontrol edilebilme olasılığı, hatların kapasitesini artırma konusunda büyük bir potansiyele sahiptirler. FACTS cihazları genel olarak Statik Senkron Seri Kompanzatör (STATCOM), Statik Var Kompanzatör (SVC), Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC), Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) ve Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü (UPFC)'den oluşmaktadır. Paralel FACTS cihazlarından STATCOM güç sistemlerinde bara gerilim kontrolü ve açı kontrolünde kullanılırken, SVC ise bara gerilim kontrolünde kullanılmaktadır. Seri FACTS cihazlarından TCSC iletim hattında empedans ve akım kontrolünde kullanılırken, SSSC güç sistemlerinde empedans, akım ve açı kontrolünde kullanılmıştır. Hem baraya hemde iletim hattına bağlanan UPFC gerilim, akım, empedans ve açı kontrolünde tercih edilmektedir. UPFC'nin kullanımı diğer FACTS cihazlarına göre güç sistemleri için çok önemli avantajlara sahiptir. UPFC ile ilgili literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Güç sistemlerinde güç enjekte edilmesinde genel UPFC modeli tasarlanmıştır. İletim hatları arasındaki aktif ve reaktif güç alış verişine bağlı olarak güç sisteminde kararlılık analizi ile küçük dağılmalar durumunda UPFC'nin etkin kullanımı incelenmiştir. Çok makinalı sistemlerde elektromekanik salınım ve güç osilasyon sönümlerinde UPFC küçük sinyal kararlılığı bakımından sistemin kararlı bölgede kalmasını sağlamıştır [1], [2]. İletim hatlarında hat kopması sırasında mesafe koruma rölelerinin açması ve tekrar devreye alınmasında geçen sürede güç sistemleri kararsız durumda bulunmaktadır. İletim hattından geçen akım ve gerilim durumuna göre sistemi açan rölelerin zaman koordinasyonunun daha uygun olarak kullanılmasında UPFC'den yararlanılmaktadır. UPFC ile mesafe koruma röleleri arasında eş zamanlı koordinasyon algoritmasının geliştirilmesi ile güç sisteminin koruma bölgesinde alan empedans hesaplamaları daha esnek hale getirilmiştir [3], [4]. Çok baralı güç sistemlerinde iletim hattının kapasitif

etkilerinden dolayı senkron generatör parametrelerinde salınımların olduğu görülmektedir. Bu salınımlar senkron altı rezonans etkisi olarak açıklanmaktadır. Senkron generatör ve UPFC’de doğrudan kontrol modelleri ve ilave sinyal eklenmesi ile senkron altı rezonans analizleri incelenmiştir. Geliştirilen kontrol modelleri ve denetleyicileri sayesinde sistemdeki salınımların kısa sürede kararlı hale geldiği ve küçük sinyal kararlılığının etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [5]-[7]. Son yıllarda güç sistemlerinin çalışma koşullarının iyileştirilmesi için rüzgar türbinlerinde UPFC kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle şebekeye bağlantılı olarak çalışan rüzgar türbininde gücün dengeli olarak dağıtılması ve yönetimi, düşük ve yüksek rüzgar hızındaki olumsuz durumların en az düzeye indirilmesi ve yük modellerinin etkileri bakımından UPFC ile birlikte kullanılmasında sistem kararlılığı açısından etkili bir çözüm yöntemi olarak sunulmuştur [8]-[10]. UPFC’nin güç sistemlerinde yaygın olarak kullanıldığı diğer bir durum dengeli ve dengesiz arıza analizleridir. Özellikle de 3 faz ve faz toprak arızalarında UPFC kullanımı ile sistem kısa zaman içerisinde kararlı hale gelebilmektedir [11]. Çok baralı sistemde UPFC’nin bazı durumlarda tek kullanımı, salınımların sönümlenmesi açısından yetersiz kalabilmektedir. Bu yüzden UPFC yük akışı sonucunda en düşük gerilim profiline sahip yük baralarına bağlanarak salınım problemleri ortadan kaldırılmıştır [12]. Çok makinalı güç sisteminde şebeke tarafında oluşan olumsuz durumlara karşı meydana gelen güç kalitesi problemlerinin giderilmesinde dinamik zaman cevabını hızlı sağlaması açısından UPFC kullanılmaktadır. Aktif ve reaktif güç kontrolünün sağlanmasının yanı sıra, güç kalitesi sorunlarını çözmede sisteme seri evirici devresindeki gerilim enjekte edilmesini sağlayan UPFC eş zamanlı olarak şebeke sinüsoidal şeklinin bozulması ile ortaya çıkan harmonikleri kısa sürede minimum düzeye indirmektedir [13], [14]. Güç sistemlerinde güç kalitesi problemlerinden biri de lineer olmayan yük modellerinin devreye girip çıkması durumudur. Özellikle en yaygın olarak kullanılan yük modelleri asenkron motor ve termostatik kontrollü yük modelidir. Kısa süreli olarak devreye giren-çıkan asenkron motorun ve termostatik kontrollü yük modelinin çok makinalı güç sisteminde yük barasında akım, gerilim, aktif ve reaktif güç değerlerinde oluşan salınımların sönümlenmesinde UPFC’de farklı çalışma yöntemleri geliştirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır [15], [16]. Çok baralı sistemlerinin benzetim modellerinin analizi hassas bir doğrulukta yapılması gerekmektedir. Bu hassasiyette yapılan analizler sistem parametrelerinin belirlenmesinde ve gerçek değerlere yakın sonuçlar vermesi açısından

önemlidir. UPFC’de bulunan seri ve paralel evirici devresindeki modülün çok seviyeli olarak kullanılması sistemin dinamik karakteristiğini iyileştirmek için etkili olmaktadır [17]. Güç sistemlerinde maksimum transfer kapasitesini arttırmak, iletim hattı gücünü arttırmak ve istenilen aktif-reaktif güç profilini ortaya çıkartmak için UPFC iç çalışma noktası metodu kullanılmaktadır. İç çalışma noktası metodu ile UPFC’nin en optimum değerler alması sağlanarak UPFC bağlantı noktası ve gerçek generatör eşdeğer durumlarının belirlenmesi çok baralı güç sistemlerinde UPFC’nin daha etkin olarak bulunmasını sağlamış olur [18], [19]. Elektrik güç sistemlerinin iletim hattı-şebeke çalışması ve kontrolü için UPFC’de seri ve şönt evirici devrelerinin kontrol değişkenleri yeni bir kontrol algoritması içerisinde gösterilmiştir. Sistemde meydana gelen hat kopması sonucunda UPFC ile hattın yani duruma göre yeniden ayarlanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bunun için sonsuz baralı güç sisteminde hat gerilim, hat açısı ve hat empedansları tekrardan hesaplanarak sistemin yeni durumdaki zaman cevapları incelenmiştir [20]. Hat kopması, hattaki yoğunluk, kademeli olarak sistemdeki açma-kapamalar ve sistemdeki kararlılık problemleri çok baralı güç sistemlerinde ortaya çıkan en temel sorunların başında bulunmaktadır. Güç akışı kontrolü, gerilimin enjekte edilmesi ve güç yoğunluğunu rahatlatma bu gibi problemleri kısa sürede ortadan kaldırmaktadır. Bunun için çok baralı güç sistemlerinde UPFC yaygın olarak kullanılmaktadır [21]. UPFC’nin güç sistemlerinde diğer kullanım alanlarından birisi de paralel evirici devresindeki güç enjekte modellemesidir. Güç sistemlerinde UPFC’nin en optimum çalışma yerinin belirlenmesi ile iletim hattının başlangıç ve bitiş noktaları arasında eş zamanlı olarak güç denetimi yapılmaktadır. Özellikle paralel evirici devresinde gerçekleşen güç enjekte modellemesi sayesinde her iki evirici devresindeki anahtarlama kayıpları ve hat kopması problemlerini ortadan kaldırmada etkili olduğu gözlemlenmiştir [22], [23]. Eş zamanlı güç denetiminde UPFC’nin diğer bir avantajı seri ve paralel evirici devresinde kullanılan DC link bağlantı noktasının kullanılmamasıdır. Maliyet açısından sistemin pahalı hale gelmesine neden olan her iki evirici devresinde kullanılan DC link modelinin yerine bir kontrol devresi geliştirilerek güç kontrolü sağlanmaktadır. Çok baralı güç sisteminde UPFC eviricileri direk olarak iletim hattı ve baraya bağlanabilmektedir [24], [25]. UPFC devresinde DC link bağlantı noktasının maliyeti düşürmesinin yanı sıra, transformatör kullanılmadan iletim hattına seri olarak ve baraya paralel olarak bağlanması ile etkin bir biçimde kullanılmaktadır. UPFC modelinde maliyetin yanında, transformatörün kullanılmaması ağırlık, yüksek verim ve hızlı

dinamik cevaplar alması açısından avantajlar sağlamaktadır. Temel frekans modülünde bağımsız aktif güç ve reaktif güç kontrolünün gerçekleştirilmesinde önemli bir katkısı olmaktadır [26], [27]. Geçici kararlılık durumlarının güç sistemleri üzerindeki etkilerini incelemek için optimum güç akışı denetlemesinde UPFC kullanılmıştır. UPFC’de yerel parametre değerlerinin iyileştirilmesinde optimum güç akışı denetleme işleminde Lyapunov enerji fonksiyonu tercih edilmiştir. İki makinalı test sisteminde simetrik üç faz arızasında UPFC’nin güç akışı denetleme sistemi ile birlikte kullanılmasının kısa sürede kararlılık ve salınım sönümlenmesi açısından kullanılabilir bir model olduğu tespit edilmiştir [28]. Çok baralı güç sistemlerinde güç akışı analizinde UPFC yaygın olarak kullanılmaktadır. Yük akışı analizinde Newton Raphson yönteminde farklı yük aktarım tekniği, doğrudan kullanım tekniği ve matris katılım tekniği ile analizler yapılmıştır. Dahası güç akışı esnasında sistemin dinamik davranışını kontrol etmek için seri ve paralel evirici devresinde referans bir sinyal girişine bağlı olarak ayırık kontrol stratejisi geliştirilmiştir [29]. Güç akışı analizinde sistemdeki anlık olabilecek dinamik etkiler için UPFC’de sliding mod kontrol modeli geliştirilmiştir. Bu kontrol modeli seri evirici devresinde tasarlanmıştır. Güç akışı kontrolünde sliding mod kontrol değişkenleri aktif ve reaktif güç kontrol girişleri olarak kullanılmıştır. Ekstra dinamik etkilerin UPFC ile geliştirilen model sayesinde kararsızlık durumları ve salınımlar için etkileyici sonuçlar bulunmuştur [30]. IEEE farklı test sistemlerinde generatörlerin maksimum ve minimum aktif ve reaktif güç sınırlarının belirlenmesi, gerilim genlik limitlerinin ayarlanması ve generatörlerin aktif güç üretme maliyetlerinin tasarlanmasında optimal yük akışı analizi kullanılmaktadır. Newton Raphson algoritması ile optimal yük akışı durum ve kontrol değişkenlerinin belirlenmesinde UPFC tercih edilmektedir. UPFC optimal yük akışına seri evirici ve paralel eviriciye aktif ve reaktif güç eşitlikleri şeklinde ilave edilerek sistemin toplam transfer kapasitesini arttırmaktadır [31], [32]. Güç sistemlerinde yük akışının yanısıra, sürekli yük akışı problemlerinin çözümlenmesinde UPFC tercih edilmektedir. Sürekli yük akışı uygulanmadan önce güç sistemlerinde yük akışı analizi yapılarak gerilim seviyesi en düşük baralar tespit edilmektedir. Farklı test sistemlerinde tahminci ve düzeltici iterasyon adımları yapılarak güç sistemlerinin maksimum yüklenme parametre değerlerini iyileştirmek için UPFC kullanılmaktadır. Özellikle yük baralarındaki gerilim profillerindeki iyileşme yüklenme durumu açısından önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır [33]-[35].

1.1. TEZİN AMACI

Yapılan bu tez çalışmasında çok baralı güç sisteminde çalışma koşullarının iyileştirilmesi ve sistemin kararlı bölgede kalması için UPFC ile birlikte EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. Sistemin normal çalışması statik gerilim kararlılığı analizi olarak incelenirken, hatta bulunan kesicinin belirli bir süre devre dışı kalıp tekrar devreye girmesi dinamik gerilim kararlılığı sınıfı altında incelenmiştir. Her iki durumdaki gerilim kararlılığı analizi sonuçlarına göre UPFC-EDS'nin sistemin maksimum yüklenme değerlerini artırırken, yük baralarının gerilim profillerini de sürekli yük akışında iyileştirdiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasının 2. bölümünde gerilim kararlılığı ile ilgili kısımdan bahsedilmiştir. Küçük bozucu gerilim kararlılığı etkisi, büyük bozucu gerilim kararlılığı etkisi, kısa süreli gerilim kararlılığı etkisi, uzun süreli gerilim kararlılığı etkisi, çataklanma analizi, sürekli yük akışı analizi, parametreleştirme, tahminci adım, düzeltici adım, ve adım boyut kontrolü ile ilgili tanımlamalar açıklanmıştır.

Çalışmanın 3. bölümde FACTS cihazları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Tristör tabanlı olan SVC, TCSC, Gerilim Kaynaklı Evirici Tabanlı FACTS cihazlarından SSSC, STATCOM ve UPFC, seri FACTS denetleyicileri, paralel FACTS denetleyicileri, birleştirilmiş seri-seri FACTS denetleyicileri ve birleştirilmiş seri-şönt FACTS denetleyicileri hakkında bilgilere yer verilmiştir.

4. bölümde birleşik güç akış denetleyicilerin tanımlamaları yapılmıştır. UPFC'nin çalışması, UPFC'nin avantajları, UPFC teorisi, UPFC'nin aktif ve reaktif güç kontrolü ve UPFC'nin güç enjekte modeli hakkında detaylı olarak bilgiler verilmiştir.

Bu çalışmasının 5. bölümünde ise EDS hakkında genel bilgiler yer almıştır. Tez çalışmasında EDS elemanlarından olan yakıt hücresinin baraya bağlandığı durumdaki etkileri incelenmiştir.

6. bölümde tez çalışması için kullanılan IEEE 14 baralı güç sisteminden bahsedilmiştir. Bu güç sisteminde kullanılan salınım barası, generatör baraları ve yük baralarının bağlı olduğu baralar detaylı olarak ele alınmıştır. Dahası sistemin hat bilgileri, generatör bilgileri ve kademe değiştirmede kullanılan transformatörler hakkında bilgi paylaşımı yapılmıştır.

Tez çalışmasının son bölümünde benzetim çalışması sonuçlarına yer verilmiştir. Sürekli

durum ve geçici durumda IEEE 14 baralı sistemin sürekli yük akış analizi, UPFC kullanıldığı zamanki sürekli yük akışı analizi ve UPFC ile EDS elemanın birlikte kullandığı durumdaki sürekli yük akışı analizleri detaylıca incelenmiştir. Ayrıca EDS elemanı olarak kullanılan yakıt hücresinin farklı güç oranında çalışması ile elde edilen yüklenme parametre değerleri ve bara genlik profilleri şekiller ve grafikler ile yorumlanmıştır.



2. GERİLİM KARARLILIĞI

Teknolojik gelişmeler ve artan nüfus sayısından dolayı dünyadaki enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Bu taleplerin karşılanması için birçok yeni güç üretim tesisleri aktif hale getirilmiştir. Güç üretim kapasitesi artarken iletim ve dağıtım sistemleri de eş zamanlı olarak gelişmektedir. Üretim kapasitesi, iletim ve dağıtım sistemlerinin gelişmesinin yanında birçok problemi de ortaya çıkarmaktadır. Gerilim kararlılığı problemi en önemli olanlarından biridir. Büyük elektrik tesisleri son yıllarda kararlılık problemi yüzünden çökme noktasına gitmiştir. Bu yüzden kararlılık çalışması günümüzde yaygın olarak ele alınmaktadır.

Literatürde, gerilim kararlılığı farklı şekillerde tanımlanmaktadır. Temel olarak gerilim kararlılığı kabul edilebilir limitlerde tüm baraların geriliminin sabit tutulması olarak tanımlanmaktadır. Arıza sonrasında ve normal çalışma koşulları altında güç sisteminin tüm baralarında gerilim kabul edilebilir limitlerde bulunuyorsa sistem kararlıdır. Aksi halde sistem kararsızdır. Ayrıca gerilim kararlılığı, sisteme reaktif güç verilerek yada sistemden reaktif güç çekilerek de kontrol edilebilmektedir. Güç sisteminde reaktif güç verme yada çekme durumlarında sistemin kararlı olarak adlandırmak için tüm sistemdeki bara gerilimlerinin çalışma sınırları içerisinde bulunması gerekmektedir. Barada gerilimlerin herhangi birinde belirtilen sınırın altına gelmesi halinde sistem kararsız olmaktadır. Gerilim kararsızlığının oluşmasında bir çok etken bulunmaktadır. Bunlar gerilim düşmesi ve talep edilen yük miktarındaki artıştır. Ancak başlıca sebep aslında reaktif güç talebidir. Eğer güç sistemi reaktif güç talebini karşılayamaz ise gerilim kararsızlığı meydana gelir. Genel olarak reaktif güç gereksiniminin karşılanamaması durumu aktif ve reaktif güç akışında gerilim dengesizliğine neden olmaktadır [36]. Gerilim kararsızlık problemleri farklı zaman periyotlarında bozucu etkilerin etkisi olarak ortaya çıkmaktadır. Gerilim kararlılığı Küçük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı (KBEGK), Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı (BBEGK), Kısa Süreli Gerilim Kararlılığı (KSGK) ve Uzun Süreli Gerilim Kararlılığı (USGK) şeklinde dört gruba ayrılmıştır.

2.1. KÜÇÜK BOZUCU ETKİ GERİLİM KARARLILIĞI (KBEGK)

Sistemde gerilim kararlılığının sağlanması için gerilimler hem normal çalışma koşullarında hem de arızalı durum sonrasında kabul edilebilir sınırlar içerisinde bulunması gerekmektedir. Buna göre, KBEGK küçük bozucu olayların meydana gelmesinden sonra sistemin kararlı halde kalması şeklinde tanımlanmaktadır. Sistemde yüklenmenin artması küçük bozucu etkinin başlıca nedenidir. Bu yüzden bu tip kararlılıkta yük karakteristiğine göre analizler gerçekleştirilir.

2.2. BÜYÜK BOZUCU ETKİ GERİLİM KARARLILIĞI (BBEGK)

BBEGK’da yaygın olarak ortaya çıkan problemler güç sistemindeki arızalar, aktif ve reaktif güç kaybı ve hat kopmaları şeklinde özetlenmektedir. Bu büyük bozucu etki sonrasında güç sistemi tüm baraların gerilimlerini kontrol edilebiliyorsa, sistem büyük bozucu etki karşısında kararlı hale gelmektedir. Bu tip kararlılık analizi sistem performansını, sistem yüklenme karakteristiğini ve kontrol-koruma koordinasyonunu incelemektedir [36]. BBEGK analizi farklı zaman periyotlarında meydana gelebilmektedir.

2.3. KISA SÜRELİ GERİLİM KARARLILIĞI (KSGK)

KSGK sıfır ile on saniye arasında gerçekleşir. KSGK’nın başlıca olduğu durum asenkron motorların güç sisteminde kısa süreli olarak devreye girip çıkmasıdır. Yada bir arıza olduğunda generatörün elektriksel momenti mekanik moment gereksinimini karşılayamaz. Ancak son yıllarda Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) uygulamaları KSGK’na sebep olmaktadır. YGDA uygulamaları zayıf sistemlerde özellikle karşımıza çıkan gerilim kararlılığı problemidir. Dahası evirici ve paralel kondansatörlerde KSGK’na neden olmaktadır.

2.4. UZUN SÜRELİ GERİLİM KARARLILIĞI (USGK)

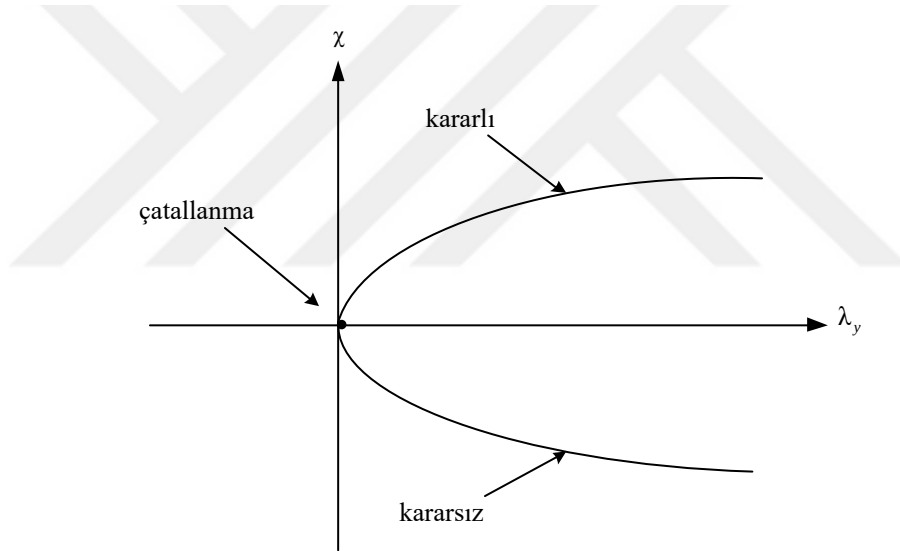
USGK genelde on saniye ile iki veya üç dakika arasında gerçekleşir. Büyük generatörlerdeki güç kayıpları ve hattın kopması sonucunda meydana gelen kararsızlık durumları USGK sınıfına girmektedir. Generatörlerdeki güç kayıpları ve hat kopmaları sonucunda reaktif güç kayıpları artar ve gerilim düşmeleri oluşur. Bu yüzden kademe

değiştirici transformatörler ve dağıtım gerilim ayarlanmaları gerilim düşmelerine karşı belirli zamanlar içerisinde gerçekleştirilerek USGK problemlerinin minimum düzeye çekilmesi sağlanır [36].

2.5. ÇATALLANMA ANALİZİ

Dinamik bir sistemde, sistem parametreleri değiştiğinde, fazların yapısı da değişir. Bu çatallanma analizinin temel açıklamasıdır. Yerel çatallanma analizinin incelenmesi için çatallanma noktasına yakın olan vektör diferansiyel denklemler ile analiz edilir. Bu analiz yapılırken bir yükleme parametresi belirtilmektedir. Bir güç sisteminde, yüklenme parametresi sistemdeki yük değişiklikleri anlamına gelir. Buna bağlı olarak aktif ve reaktif güç değerleri de değişmiş olur. Çatallanma analiz yaklaşımı

Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Çatallanma analizi.

Çatallanma analizi yapılırken çatallanma denkleminden yararlanılmaktadır. Çatallanma analizi için kullanılacak olan ifade Denklem (2.1)’de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \lambda - x^2 = f(x, \lambda) \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte, x durum değişkenidir. $f(x, \lambda)$ fonksiyonu değiştiğinde sistemin kararlı ve kararsız olduğu bölgelerin tanımlaması yapılabilir. Eğer $\lambda < 0$ olduğu durumda sistemin denge durumunda olmadığı görülür. Eğer $\lambda > 0$ olduğu durumda ise iki tane denge durumu karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan bir tanesi denge noktası diğeri ise denge noktası

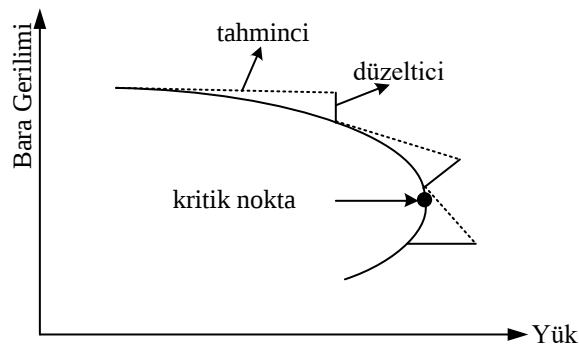
değildir. Bu durumların haricinde $\lambda = 0$ olduğu durumda denge durumu oluşur ve sistem değişiminin kararlı olduğu elde edilir. Fonksiyonun $f(0, 0)$ olduğunda sistemin sürekli durum çalışmasında olduğu ve tekil noktada bulunduğu görülür. Bu yüzden farklı fonksiyon durumlarından dolayı sistem yüklenebilirliği çözümlenemez. Bunun çözümlenmesi için sürekli yük akışı metodu kullanılır [37].

2.6. SÜREKLİ YÜK AKIŞI

Sürekli yük akışı bir güç sisteminin yük ve üretim değişimleri altındaki sürekli durum davranışını inceleyen bir yöntemdir. Bu yöntem birçok farklı durumda kullanılabilir, ancak özellikle, farklı yük ve üretim koşulları altında gerilim değişimlerini ve maksimum kapasiteyi analiz etmek için kullanılmaktadır [38].

Son bölümde anlatılan çatallanma analizine dayanan bu yöntemin prensipleri daha önce de belirtildiği gibi, sürekli durum gerilim kararlılık analizi yaparken bir sorun oluşturmaktadır. Bu analizde, geleneksel olarak kullanılan Newton-Raphson güç akışı teknikleri değiştirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, Jacobian matrisin tekilleşmesi ve gerilim kararlılık limitinin veya kritik noktanın çözümlenememesi durumları ortaya çıkmaktadır. Özetle, kritik noktaya yakın olan yüklenme durumu güç akışı çözümlerini gerçekleştiremez. Bu nedenle, güç akışı denklemleri sürekli güç akışı yöntemi kullanılarak yeniden düzenlenmesi gerekmektedir.

Sürekli güç akışı yönteminde, güç akışı denklemlerine bir yük parametresi (λ) eklenir. Daha sonra, yeniden düzenlenmiş güç akış denklemlerinin çözüm yolunu bulmak için, bir tahminci–düzeltici hesaplamaları uygulanır. Şekil 2.2’de tahminci–düzeltici işlemi gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Tahmin edici – düzeltici işlemi.

İlk olarak, ilk temel değer geleneksel güç akışından bulunur. Bu ilk temel değer çözümü başlatmak için kullanılır. Daha sonra, farklı yük parametresine teğet bir tahminleyici uygulanır ve çözüm tahmin edilir. Tahminden sonra düzeltme adımı uygulanır. Bu süreç kritik noktaya kadar devam eder. Genel olarak sürekli güç akışı yöntemi dört adıma ayrılır. Bunlar parametreleştirme, tahmin edici, düzeltici ve adım-boyut kontrolü şeklinde isimlendirilir [39].

2.7. PARAMETRELEŞTİRME

Daha önce de belirtildiği gibi, sürekli güç akışı tekniği dört aşamaya ayrılabilir. İlk adım parametreleştirme aşamasıdır. Bunun için güç akışı denklemlerine bir yük parametresi (λ_y) girilmelidir. Böylece bir baradaki yük ve güç üretiminde yük parametresinin bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Baradaki geleneksel güç akış ifadeleri Denklem (2.2) ve Denklem (2.3)'de verilmiştir.

$$P_{Gi} - P_{Li} - P_{Ti} = 0 \quad (2.2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_{Ti} = 0 \quad (2.3)$$

Burada, P_{Gi} i barasındaki üretilen aktif güç, P_{Li} i barasındaki yüklerin aktif gücü, P_{Ti} i barasındaki sisteme verilen aktif gücü, Q_{Gi} i barasındaki üretilen reaktif güç, Q_{Li} i barasındaki yüklerin reaktif gücü, Q_{Ti} i barasındaki sistem verilen reaktif güçtür.

Parametreleştirme aşaması için, yük parametresi (λ_y) Denklem (2.2) ve Denklem (2.3)'te eşitliklere ilave edilirse elde edilen yeni durumlar Denklem (2.4) ve Denklem (2.5)'te gösterilmiştir.

$$P_{Gi}(\lambda_y) - P_{Li}(\lambda_y) - P_{Ti} = 0 \quad (2.4)$$

$$Q_{Gi}(\lambda_y) - Q_{Li}(\lambda_y) - Q_{Ti} = 0 \quad (2.5)$$

Yeni duruma göre P_{Ti} ve Q_{Ti} ifadelerinin genişletilmiş halleri Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'de gösterilmiştir.

$$P_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2.6)$$

$$Q_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}) \quad (2.7)$$

Bu eşitliklerde y_{ij} i ve j baralarındaki sistem admitans matrisi elemanlarıdır. δ_i i barasının gerilim açısı, δ_j j barasının gerilim açısıdır. Sistemde yük değişim etkisinin P_{Li} ve Q_{Li} üzerindeki etkileri ile elde edilen ifadelerin yeni durumları Denklem (2.8) ve Denklem (2.9)'da gösterilmiştir.

$$P_{Li} = P_{Li0} + \lambda_y (k_{Li} S_{\Delta base} \cos \phi_i) \quad (2.8)$$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda_y (k_{Li} S_{\Delta base} \sin \phi_i) \quad (2.9)$$

Burada, P_{Li0} ve Q_{Li0} yükün aktif ve reaktif güç başlangıç değerleri, k_{Li} yüklenme durumu değişirken i barasındaki özel yük değişim oranı, ϕ_i i barasındaki yük değişimindeki güç faktörü açısı, $S_{\Delta base}$ yüklenme durumu için görünür güç değeridir. Yüklenme durumuna bağlı olarak aktif ve reaktif güç üretim ifadelerinin yeni halleri Denklem (2.10)'da gösterilmiştir.

$$P_{Gi} = P_{Gi0} (1 + \lambda_y k_{Gi}) \quad (2.10)$$

Burada, P_{Gi0} ve Q_{Gi0} i barasındaki aktif ve reaktif güç üretiminin başlangıç değerleri, k_{Gi} yüklenme durumu değişirken i barasındaki üretilen yük değişim oranıdır. Denklem (2.8), Denklem (2.9) ve Denklem (2.10)'daki ifadeler Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'deki ifadeler ile birlikte gösterilirse, yeni güç akışı aktif ve reaktif güç eşitlikleri Denklem (2.11) ve Denklem (2.12)'deki gibi olmaktadır.

$$0 = P_{Gi0} (1 + \lambda_y k_{Gi}) - P_{Li0} - \lambda_y (k_{Li} S_{\Delta base} \cos \phi_i) - P_{Ti} \quad (2.11)$$

$$0 = Q_{Gi0} - Q_{Li0} - \lambda_y (k_{Li} S_{\Delta base} \sin \phi_i) - Q_{Ti} \quad (2.12)$$

Dahası, bu yeni eşitlikler vektör formunda gösterilebilir. Bu yüzden sürekli yük akışı algoritmasında yeni formuyla ifade edilebilir. Vektör formuyla oluşturulan eşitlik Denklem (2.13)'de gösterilmiştir.

$$F = (\delta_b, V_b, \lambda) = 0 \quad 0 \leq \lambda \leq \lambda_{kritik} \quad (2.13)$$

Burada, δ_b bara gerilim açısı vektörü, V_b bara gerilim genliği vektörü, λ yüklenme durumu

vektörüdür. Temel olarak geleneksel güç akışında başlangıç değeri ilk olarak adım, ikinci olarak da tahminci-düzeltilici ile çözümlemeye başlar [39].

2.8. TAHMİN EDİCİ ADIM

Başlangıç çözümlemesi ve parametrelendirmeden sonra, tahminci adım başlar. Tahminci adımda, bir sonraki çözüm için uygun bir nokta bulunur. Bu adımdaki çözüm teğet vektör alınarak elde edilir. Bu nedenle, öncelikli olarak teğet vektörün hesaplanması gerekmektedir. Bu hesaplamanın yapılabilmesi için güç akış denklemlerinin türevi alınmalıdır. Vektör formunun türev alınma işlemi Denklem (2.14)'de gösterilmiştir.

$$[F(\delta_b, V_b, \lambda)] = F_{\delta_b} d\delta_b + F_{V_b} dV_b + F_{\lambda} d\lambda = 0 \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)'de verilen eşitlik farklı bir formda tekrar yazılırsa Denklem (2.15)'deki ifade elde edilir.

$$[F_{\delta_b}, F_{V_b}, F_{\lambda}] \begin{bmatrix} d\delta_b \\ dV_b \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (2.15)$$

Jacobian matrisinin tekillığe gitmesini önlemek için güç akışı denklemlerine bir parametre eklenir. Ancak, parametre eklenmesi yeni bir sorun ortaya çıkarmaktadır. Denklem sayısı hala aynı olduğundan sorun çözülemez. Bunu çözmek için yeni bir yöntem kullanılmaktadır. Teğet vektör bileşenlerinden biri +1 veya -1 olarak alınır, sorunun çözülmesi sağlanabilir. Teğet vektörün hesaplanmasında sonra, tahminci adım işleminin başlangıcı Denklem (2.16)'da gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} d\delta_b \\ dV_b \\ d\lambda \end{bmatrix}^p = \begin{bmatrix} d\delta_b \\ dV_b \\ d\lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta_b \\ dV_b \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Burada, p öngörülen değerlerdir ve bir sonraki nokta için belirtilen adım büyüklüğüdür. Bunu belirlemek için birçok farklı yöntem vardır, ancak genellikle bunun için sabit bir büyüklük kullanılır [39].

2.9. DÜZELTİCİ ADIM

Tahminci adımından sonra düzeltici adımı başlar. Bu adımın amacı, öngörü çözümünü düzeltmektir. Bu düzeltme genellikle yerel parametreleştirme ile gerçekleştirilir. Yerel parametreleştirme, tahmin etmede ek bir denklemin güç akışı denklemlerine uygulanması ile elde edilir. Ek bir ifadenin ilave edilmesi ile elde edilen yeni vektör formu Denklem (2.17)'de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} F(x) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (2.17)$$

Burada, x_k sürekli değer alan parametre olarak durum değişkeni, η bu durum değişkeni için tahmin edici değerdir. İlk olarak k ve η için uygun değerler seçilir. Daha sonra değiştirilmiş Newton raphson güç akışı yöntemi ile çözüm elde edilir.

2.10. ADIM BOYUTU KONTROLÜ

Genel olarak, sürekli değer alan parametre en büyük vektör bileşenine göre seçilir. İşlemin temel çözümlemesini başlatmak için bunun uygun bir seçim olması gerekir. En büyük vektörünün haricinde kullanılan parametrelerin analizinde Denklem (2.18)'de kullanılan eşitlikten yararlanılmaktadır.

$$x_k : |t_k| = \max \{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_m|\} \quad (2.18)$$

Burada t_k adım boyut kontrolüdür. Denklem (2.18)'de gösterilen teğet vektör ve bu vektörün boyutu $m=2n_1+n_2+1$ şeklinde ifade edilir. Teğet vektörün takibi artıyorsa adım kontrol boyutu 1 kabul edilir. Teğet vektörünün takibi azalıyorsa adım kontrol boyutu -1 olarak kabul edilir [40].

3. GELİŞTİRİLMİŞ ESNEK AC İLETİM SİSTEMİ (FACTS) CİHAZLARI

FACTS güç transfer kapasitesini ve kontrol edilebilirliği artırmak için güç elektroniği tabanlı olarak yapılan ve diğer statik denetleyicileri içeren alternatif akım iletim sistemidir. FACTS cihazlarının çeşitli temel uygulamaları aşağıdaki gibidir;

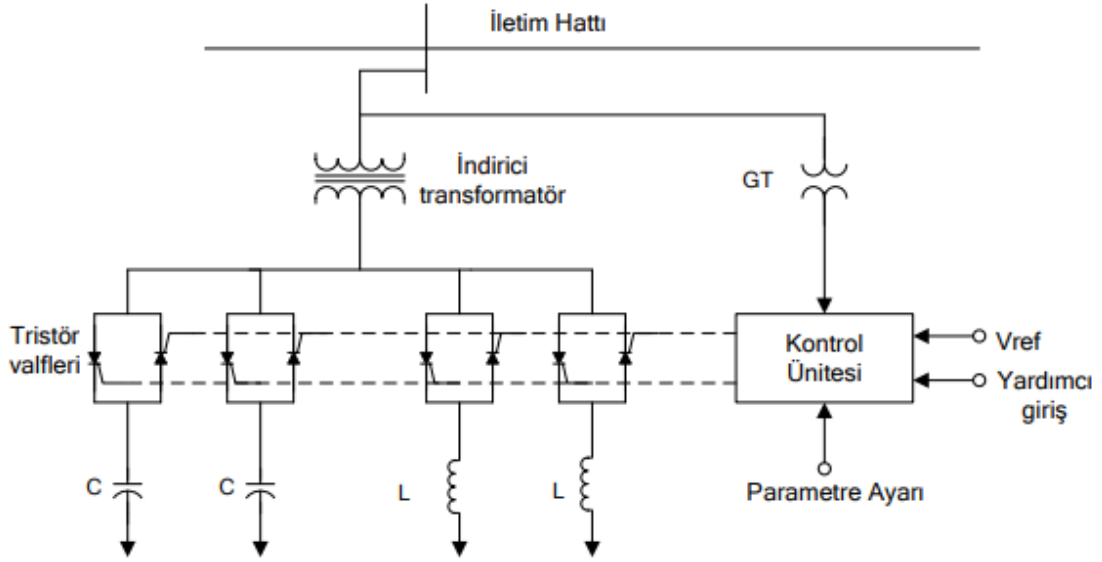
- Güç Akış Kontrolü
- İletim kapasitesinin artması
- Gerilim kontrolü
- Reaktif güç kompanzasyonu , kararlılık iyileştirme
- Güç kalitesini iyileştirme
- Güç koşullarını düzenleme

Güç elektroniği cihazlarında FACTS tabanlı denetleyicilerin sınıflandırılması iki şekilde ifade edilmektedir. İlk sınıflandırmada tristör valfleri veya eviriciler kullanılmaktadır. Bu tristör valfleri veya eviriciler yakın zamana kadar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmada kullanılan elemanların çalışması düşük anahtarlama frekansı ve düşük kayıplara sahiptir. İkinci sınıfta IGBT ve GTO anahtarlama elemanları kullanılmaktadır. Son yıllarda kullanılan anahtarlama elemanlarından IGBT ve GTO’larda gerilim kaynağı eviriciler daha ileri teknolojiye sahiptirler. Dahası bu anahtarlama elemanları yüksek modülasyon frekansına sahiptirler.

3.1. TRİSTÖR TABANLI FACTS CİHAZLARI:

3.1.1. Statik Var Kompanzatör (SVC)

Elektrik güç sisteminde, bara geriliminde belirli parametreleri korumak veya kontrol etmek için geliştirilen FACTS cihazlarından biridir. SVC tristör kontrollü reaktör (TCR), Tristör anahtarlama Kapasitör (TSC), bağlantı transformatörü ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. SVC devre modeli Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

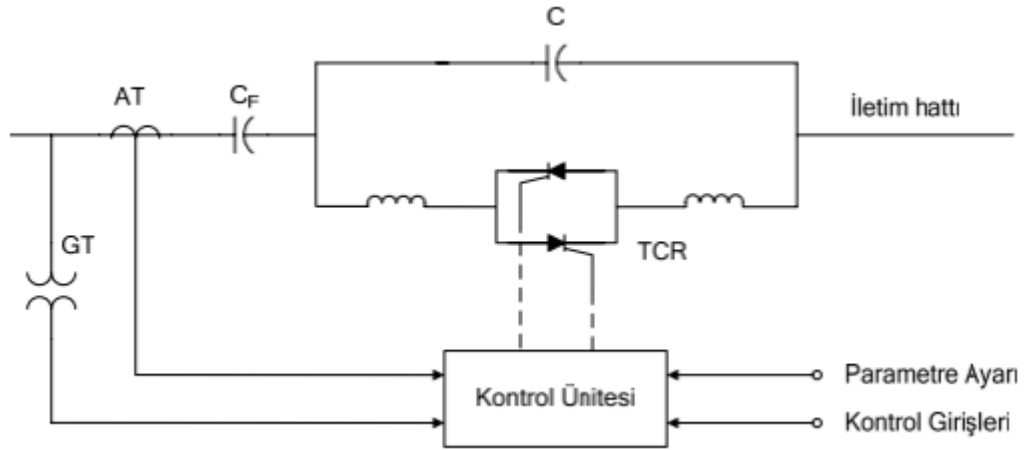


Şekil 3.1. SVC devre modeli.

TCR ve TSC ifadeleri SVC'nin tanımlanmasında kullanılan isimlerdir. Baraya paralel olarak bağlanan SVC bara gerilimini süseptansa bağlı olarak kontrol etmektedir. Ölçülen gerilim ile referans gerilimi arasındaki fark bir oransal integral (PI) denetleyicisine girmektedir. PI denetleyicisinde tetikleme açısının minimum ve maksimum değerlerine bağlı olarak sistemin davranışına göre yeni tetikleme açısı belirlenmektedir [41], [42].

3.1.2. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC)

İletim hattına seri olarak yerleştirilmiş bir tristör kontrollü kondansatör ile hat empedansını kontrol etme yeteneğine sahip tristör bazlı FACTS teknolojisi esas alınarak tasarlanmıştır. TCSC sisteme bağlanan kondansatörlere bağlı olarak hattın empedansını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca iletim hattının kapasitesini arttırmak ve böylece ilave gücün aktarılmasını sağlamak için kullanılır. TCSC devre modeli Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



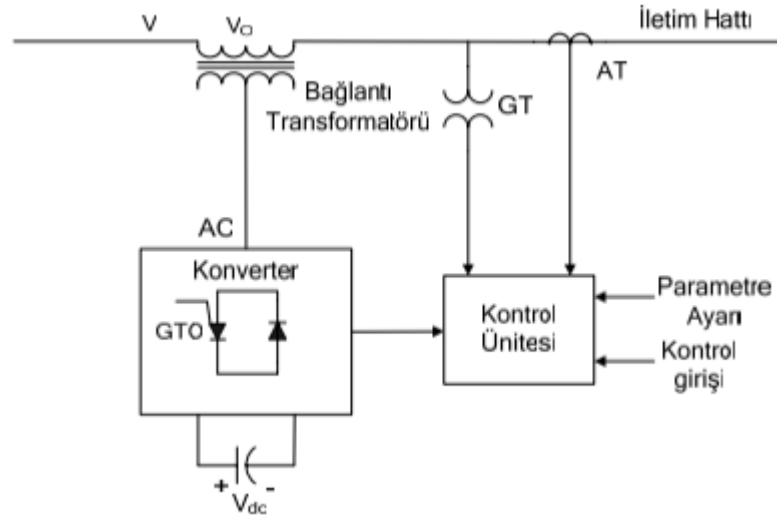
Şekil 3.2. TCSC devre modeli.

İletim hattına seri olarak bağlanan TCSC hattın ölçülen akım ve referans akımının değerine göre iletim hattının empedans kontrolünü sağlamaktadır. Bu kontrol endüktif ve kapasitif olarak belirlenmektedir.

3.2. GERİLİM KAYNAKLI EVİRİCİ TABANLI ESNEK AC İLETİM SİSTEMİ (FACTS) CİHAZLARI

3.2.1. Statik Senkron Seri Kompansatör (SSSC)

Statik Senkron Seri Kompansatör (SSSC) hat akımından bağımsız olarak istenen gerilim büyüklüğünü üretmek için tasarlanmış olan FACTS cihazlarından biridir. SSSC bir evirici, DC bara (depolama birimi) ve bağlantı transformatöründen oluşur. DC bara, transformatörden iletim hattıyla seri olarak yerleştirilen bir AC gerilim dalga biçimini uygun faz açısı ve hat akımı ile değerlendirmek için evirici kullanır. SSSC devre modeli Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

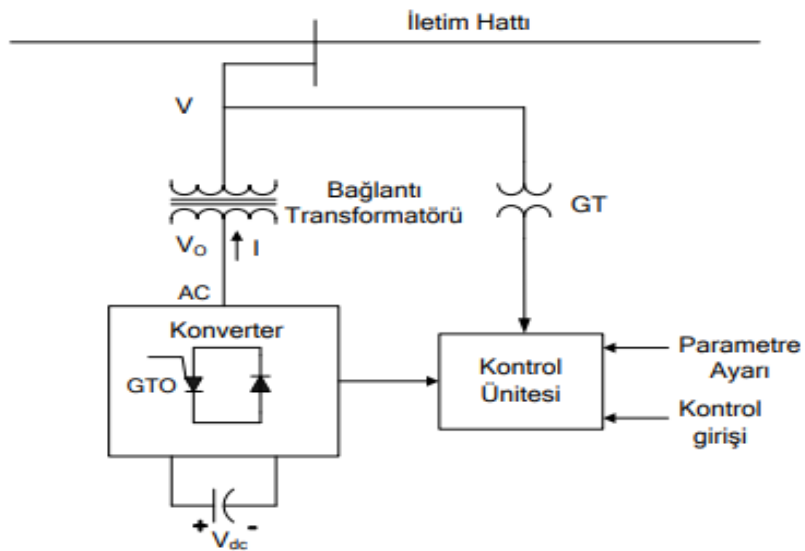


Şekil 3.3. SSSC devre modeli.

Enjekte edilen seri gerilim hat akımı ile aynı fazda ise, gerçek güç ve enjekte edilen gerilim hat akımı ile karesel ise reaktif bir güç aktarır. Bu nedenle, bir iletim hattında hem gerçek hem de reaktif gücü değiştirme yeteneğine sahiptir [43]. Ölçülen akım ile referans akım arasındaki ilişki ve ölçülen DC bara gerilimi ile referans DC bara gerilime bağlı olarak hattın akım ve empedans kontrolünü gerçekleştirmektedir.

3.2.2. Statik Senkron Kompansatör (STATCOM)

Baraya paralel bağlanan STATCOM gerilim düşürücü bağlantı transformatörü, konverter, DC bara ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. STATCOM devre modeli Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. STATCOM devre modeli.

STATCOM sistemin aktif ve reaktif gücünü kompanze etmek için DC giriş gerilimini AC çıkış gerilimine dönüştürür. STATCOM, SVC'den daha iyi özelliklere sahiptir ve gerilim kontrolü, faz açısı kontrolü ve reaktif güç kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Bir baraya bağlanmış olan STATCOM, bir güç sisteminin gerilim dengesini kontrol ederek iletim ve dağıtım sistemlerindeki gerilimi, iletim sistemindeki sönmüleme güç salınımını ve istenen reaktif güç kompanzasyonunu sağlar. Ölçülen gerilim ve referans gerilime bağlı olarak modülasyon indeksini kontrol etmektedir. Dahası ölçülen DC bara gerilimi ve referans DC bara gerilimi ile tetikleme açısını kontrol etmektedir [44].

3.2.3. Birleşik Güç Akış Kontrolü (UPFC)

UPFC AC iletim sistemlerinin gerçek-zamanlı kontrolü ve dinamik kompanzasyonu için önerilmiş olan bir FACTS cihazıdır. UPFC, ortak bir DC kapasitörde çalışan bir STATCOM ve bir SSSC'nin birleşiminden meydana gelmektedir. UPFC gerilim, empedans ve faz açısı gibi güç sistemlerinin tüm iletim parametrelerini aynı anda kontrol etme yeteneğine sahiptir. İki eviricinin DC barası, bir DC kapasitör ile birlikte bağlanır. Seri evirici, iletim hattındaki aktif ve reaktif güç akışlarını kontrol eden hat ile seri olarak gerilim büyüklüğü ve faz açısı ilave eder. Dolayısıyla seri evirici, hat ile aktif ve reaktif güç alışverişinde bulunmaktadır.

3.3. BAĞLANTI ŞEKİLLERİNE GÖRE FACTS CİHAZLARI

Bağlantı şekillerine göre Seri FACTS Denetleyicileri, Paralel FACTS Denetleyicileri, Birleştirilmiş Seri-Seri FACTS Denetleyicileri ve Birleştirilmiş Seri-Paralel FACTS Denetleyicileri olarak incelenmiştir.

3.3.1. Seri FACTS Denetleyiciler

Bu FACTS denetleyicileri, kapasitör, reaktör veya güç elektroniği bazlı bir değişken kaynağı gibi değişken empedans olabilir. Tipik seri kompensatörler frekans oranında hat gücünün eşdeğer reaktansını azaltma için kondansatörleri kullanmaktadır. Bu yüzden hat ile seri olduğunda enjekte edilen gerilim ile yük çıkışındaki gerilim artmış olur. Bu şekilde kontrol ünitesinde reaktif güç çeker veya verirler. Başka bir yöntemde aktif güce göre kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir.

3.3.2. Paralel FACTS Denetleyiciler

Paralel denetleyiciler, değişken akımı enjekte etmek için hatta bağlanan paralel kapasitör, reaktör veya güç elektroniği bazlı değişken kaynaklı bir değişken empedans olabilir. Akım hat gerilimine bağlı olarak enjekte edildiğinde, paralel denetleyiciler yalnızca üreten veya tüketen bir reaktif güç oluşumunu sağlarlar. Farklı bir yöntem olarak aktif güç kontrol edilmiş olur. Bir dağıtım sistemindeki paralel kompanzatörler, güç faktörünü yaklaşık olarak düzenleyebilir, yüklerde harmoniklerin baskılanmasını sağlar, böylece kaynaktan çekilen akım neredeyse sinüzoidal olur, besleme geriliminde dalgalanmalara neden olan yüklerin gerilimini düzenlemek gibi kullanım yararları bulunmaktadır.

3.3.3. Birleştirilmiş Seri-Seri FACTS Denetleyiciler

Bu denetleyiciler, çok hatlı bir iletim sisteminde koordineli olarak kontrol edilen ayrı Seri FACTS denetleyicilerin birleşimidir. Birleştirilmiş Seri-Seri FACTS denetleyicilerin çalışması, her hat için bağımsız seri reaktif güç kompanzasyonu sağlar, aynı zamanda hatlar arasında güç bağlantısını kullanarak gerçek gücü aktarmış olur. Seri kontrol üniteleri arasındaki güç bağlantısının varlığı bu çalışmada “Birleşik Seri-Seri Kontrol Cihazı” olarak adlandırır.

3.3.4. Birleştirilmiş Seri-Paralel FACTS Denetleyiciler

Bu denetleyiciler, koordineli bir şekilde kontrol edilen ayrı paralel ve seri denetleyici birleşimleri veya seri ve paralel elemanlarıyla birleştirilmiş bir güç akışı denetleyicisidir. Paralel ve seri FACTS denetleyicileri birleştirildiğinde; güç bağlantısı üzerinden seri ve paralel kontrol cihazları arasında gerçek bir güç değişimi olabilir.

4. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİ

UPFC, güç akışını ve güç sisteminin kararlılığını kontrol etmek için kullanılan en güçlü ve çok yönlü FACTS cihazıdır. UPFC, dinamik durumun yanı sıra statik durumları da kontrol edebilir. Statik durum, sürekli hal durumunda bir analizdir, dinamik durum ise, iletim sisteminde meydana gelen arızalar gibi geçici koşulda oluşan bir analizdir.

4.1. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN ÇALIŞMASI

UPFC hattın güç akışını empedans, gerilim ve faz açısına göre eş zamanlı olarak kontrol eden bir FACTS cihazıdır. Dahası iletim hattında optimum güç akışını sağlamak için kullanılan FACTS ailesinden biridir. UPFC STATCOM ve SSSC birleşimidir. Her iki eviricisi de DC depolama kapasitörlü ortak bir DC linkten çalıştırılır. Aktif güç iki AC kaynak arasında iki yönde serbestçe akabilir. Her evirici bağımsız olarak AC çıkış terminallerinde reaktif güç üretebilir veya tüketebilir [45]. Denetleyici istenen seri gerilimi sağlamak ve gerekli şönt akımları eşzamanlı olarak çekmek için evirici sinyallerine geçiş sinyalleri sağlamaktadır. Gerekli seri enjekte edilen gerilimi sağlamak için evirici istenen özelliklere sahip bir DC kaynak gerektirir. Muhtemel olabilecek çözümlerin başında ise DC bara gerilimini desteklemek için şönt evirici kullanılmaktadır.

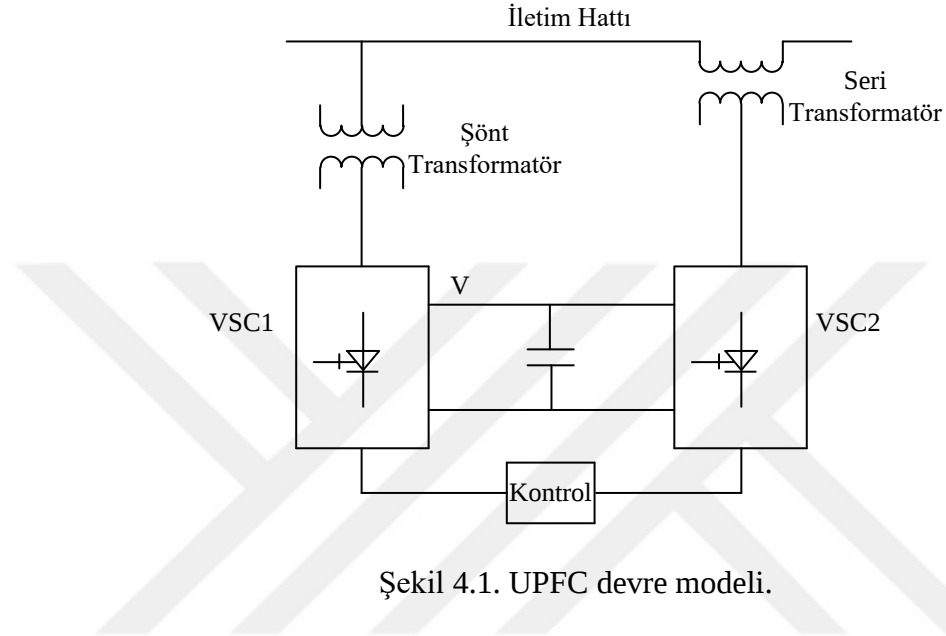
4.2. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN AVANTAJLARI

UPFC, gerilim, faz açısı ve akım kontrolünü gerçekleştirir. UPFC bahsedilen fonksiyonların bir kısmını birleştirerek ek bir esneklik de sağlayabilir. UPFC aynı zamanda bir iletim sisteminde aynı anda aktif ve reaktif güç akışını kontrol etme ve bağlı olduğu veri yolundaki gerilimi düzenleme konusunda benzersiz bir özelliğe sahiptir. UPFC kısa sürede çalışma sınırına ulaşana kadar yük talebi için gelen güç akışının kapasitesini de artırabilir. UPFC geçici kararlılık, arıza ve aşırı yük talebinin sınırını artırarak güvenliği de artırabilir. UPFC reaktif gücün değerini düşürebilir ve iletim hattından geçen gerçek güç akışını optimum hale getirir.

4.3. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN TEORİSİ

UPFC AC iletim hattının dinamik kompanzasyonu ve gerçek zamanlı kontrolü sağlamayı amaçlamaktadır. UPFC devre modeli Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi UPFC tristör tetikleme devreleri kullanılan gerilim kaynaklı eviricilerden oluşmaktadır.



Şekil 4.1. UPFC devre modeli.

VSC1 ve VSC2 olarak etiketlenen bu eviriciler, bir DC depolama kapasitörünün sağladığı ortak bir DC bağlantı ile çalıştırılır. Bu düzenleme ile aktif gücün, iki eviricinin AC terminalleri ile her bir evirici arasındaki iki yönde serbest bir şekilde akabildiği AC güç dönüştürücü, kendi AC çıkış terminalinde reaktif gücü çekmenin yanı sıra bağımsız olarak üretebilir.

UPFC'nin seri dönüştürücüsü değişken büyüklük ve faz açısına sahip bir gerilimi enjekte edebildiği için, seri transformatör yardımı ile iletim hattıyla aktif güç alışverişi yapılabilir. Ancak bir bütün olarak UPFC DC terminallerinde bir güç kaynağına sahip olmadığı sürece sabit durumda aktif gücü besleyemez veya çekemez. Bu nedenle, UPFC şönt tarafının kullanılması gereklidir. Çünkü UPFC şönt taraf, UPFC seri taraftan elde edilen aktif gücü kompanzasyon kısmında kullanmaktadır. Dahası UPFC şönt tarafın kullanılması ile bağımsız olarak reaktif güç alışverişi yapılabilir.

Şekil 4.1’de görülen evirici 2 genlik ve faz açısının kontrol edilebilmesi için UPFC’ye bir gerilim enjekte etme fonksiyonuna sahiptir. Bu enjekte edilen gerilim, senkron AC gerilim kaynağı olarak kabul edilir.

Hattan geçen akım gerilim kaynağından akar ve bunun AC sistemi arasında aktif ve reaktif güç değişimini sağlar. AC terminalinde ve eviricide değiştirilen aktif güç, AC gücün DC güce dönüştürülmesine yardımcı olur. Bu aşamadan sonra DC güç DC bağlantısında pozitif veya negatif aktif güç talebi olarak görünür. AC terminalinde değiştirilen reaktif güç ise evirici tarafından dahili olarak üretilir.

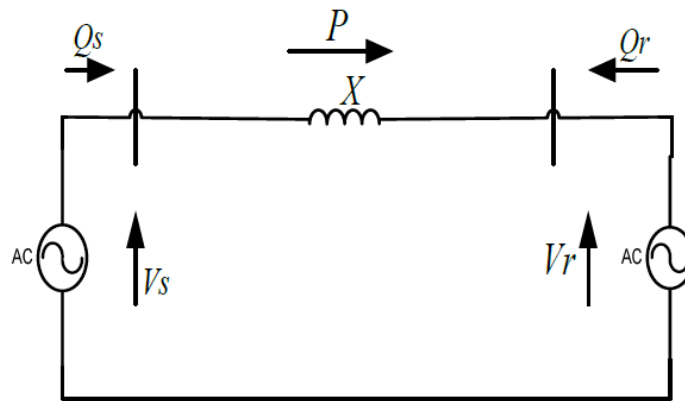
Evirici 1'in işlevi, evirici 2 tarafından talep edilen aktif gücü ortak DC bağlantısında sağlamaktır. DC bağlantının gücü tekrar AC'ye dönüştürülür ve şönt bağlantılı bir transformatör aracılığıyla iletim hattına bağlanır. Reaktif güç gerekirse, evirici 1 kontrol edilebilir ve buna bağlı olarak reaktif gücü üretebilir veya tüketebilir.

Evirici 1 ve evirici 2 arasındaki güç alış verişinde seri olarak enjekte edilen gerilimden yararlanılmasına rağmen, aslında burdaki reaktif gücü tamamı evirici 2 üzerinden sağlanılmaktadır. Bundan dolayı evirici 1 bir birleşik güç faktöründe çalıştırılabilir veya evirici 2 tarafından değiştirilen reaktif güçten bağımsız olarak hat ile reaktif bir güç alışverişine sahip olacak şekilde kontrol edilebilir. Bu, UPFC'den sürekli reaktif güç akışı olmadığı anlamına gelir.

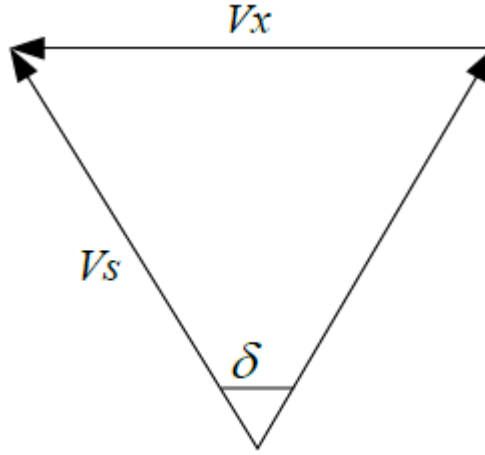
UPFC genel olarak seri kompanzasyon, şönt kompanzasyon ve faz kaydırma işlemlerini temsil etmektedir. Temsil edilen bu özellik enjekte edilen gerilim tarafından sağlanmaktadır.

4.4. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN AKTİF VE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ

Şekil 4.2'de UPFC'nin iki makinalı sistemdeki gösterimi verilirken, Şekil 4.3'de UPFC'nin gerilimi fazör diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.2. UPFC'nin iki makinalı sistemde gösterimi.



Şekil 4.3. UPFC'nin gerilim fazör diyagramı.

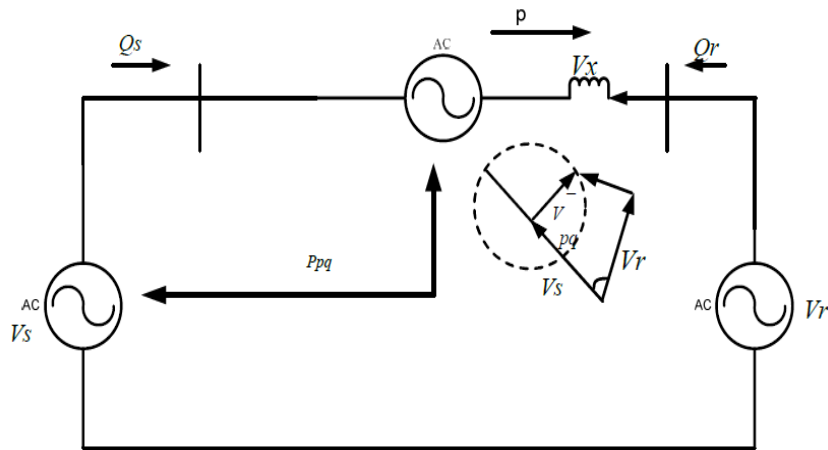
Şekil 4.2'de, kaynak uç gerilimi V_s , alıcı uç gerilimi V_r ve hat empedansı X olarak tanımlanırken, Şekil 4.3'de UPFC gerilimleri fazör olarak, δ ve $V_s=V_r=V$ iletim açıları ile gösterilmiştir. Hattan iletilen aktif ve reaktif güç ifadeleri Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'de gösterilmiştir.

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (4.1)$$

$$Q = Q_s = Q_r = \frac{V^2}{X} \cos \delta \quad (4.2)$$

Burada, P hattan akan aktif güç, V hat gerilimi ve δ faz açısıdır.

Şekil 4.4'de iki makinalı temel güç sisteminin UPFC ile geliştirilmiş modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.4. İki makinalı güç sisteminin UPFC ile geliştirilmiş modeli.

UPFC'nin iletilen aktif gücü ile kaynak ve alıcı ucundan sırasıyla Q_s ve Q_r reaktif güç taleplerini kontrol etme kabiliyetini ortaya koyacak bir amacın temin edilmesini sağlar. UPFC tarafından hatla seri olarak enjekte edilen gerilim, fazör V ile temsil edilir, $V_{pq}(0 \leq V_{pq} \leq 0.5 \text{ p.u.})$ büyüklüğü ve $\rho(0 \leq \rho \leq 360^\circ)$ 'in şekilde gösterildiği gibi fazörün verilen faz konumuna göre ölçülür. Hat akımı I fazörü ile temsil edilir, seri gerilim kaynağı V_{pq} üzerinden akar ve hem reaktif hem de gerçek güç alışverişiyle sonuçlanır. UPFC'yi doğru şekilde temsil etmek için seri gerilim kaynağı yalnızca reaktif güç üretme şartına bağlanır ve hat ile alışveriş de bulunur [46]. Böylece, hat ile karşılaştırma yapan aktif güç gücün iki makinalı sistemde uygun değerin belirlenmesinde önemli bir rol almış olur. Şekil 4.4'te, iletim hattının $V_s + V_{pq}$ değeri iki makinalı sistemde iletim hattı boyunca gerilimin tamamını temsil etmektedir. UPFC ile iki makinalı sistemde gerilim ve aktif-reaktif güç ifadeleri Denklem (4.3) ve Denklem (4.4)'de gösterilmiştir.

$$V_{pq} = \Delta V + V_p + V_q \quad (4.3)$$

$$P - jQ = V_r \left(\frac{V_s + V_{pq} - V_r}{jX} \right) \quad (4.4)$$

$V_{pq}=0$ olduğu durumda Denklem (4.5) elde edilir.

$$P - jQ = V_r \left(\frac{V_s - V_r}{jX} \right) \quad (4.5)$$

$V_{pq}=0$ ' eşit olmadığı durumda Denklem (4.6) elde edilir.

$$P - jQ = V_r \left(\frac{(V_s - V_r^*)}{jX} \right) + \left(\frac{V_r V_{pq}^*}{-jX} \right) \quad (4.6)$$

Kaynak gerilimi, alıcı uç gerilimi ve toplam p-q gerilim ifadeleri Denklem (4.7) ve Denklem (4.9) arasında gösterilmiştir.

$$V_s = V e^{j\delta/2} = V \left(\cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.7)$$

$$V_r = V e^{-j\delta/2} = V \left(\cos \frac{\delta}{2} - j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.8)$$

$$V_{pq} = Ve^{-j(\delta/2+\rho)} = V_{pq} \left[\cos\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) - j \sin\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) \right] \quad (4.9)$$

İletim hattından akan aktif güç ve uç alıcı reaktif güç ifadeleri Denklem (4.10) ve Denklem (4.11)'de gösterilmiştir.

$$P(\delta, \rho) = P_0(\delta) + P_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} \sin \delta - \frac{VV_{pq}}{X} \cos\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) \quad (4.10)$$

$$Q_r(\delta, \rho) = Q_{r0}(\delta) + Q_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) - \frac{VV_{pq}}{X} \sin\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) \quad (4.11)$$

Burada, P_0 ve Q_{r0} başlangıç aktif ve reaktif güç değerleridir. Başlangıç aktif ve reaktif güç ifadeleri denklem (4.12) ve denklem (4.13)'de gösterilmiştir.

$$P_0(\delta) = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (4.12)$$

$$Q_{r0}(\delta) = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (4.13)$$

Burada, ρ açısı iletim açısıdır. ρ açısı 0 ile 2π arasında değer alırken, δ faz açısı değeri 0 ile π arasında değer almaktadır. P_0 ve Q_{r0} başlangıç aktif ve reaktif güç değerlerinin almış olduğu değer aralığı Denklem (4.14) ve Denklem (4.15)'de gösterilmiştir.

$$P_0(\delta) - \frac{VV_{pqmaksimum}}{X} \leq P_0(\delta) \leq P_0(\delta) + \frac{VV_{pqmaksimum}}{X} \quad (4.14)$$

$$Q_{r0}(\delta) - \frac{VV_{pqmaksimum}}{X} \leq Q_{r0}(\delta) \leq Q_{r0}(\delta) + \frac{VV_{pqmaksimum}}{X} \quad (4.15)$$

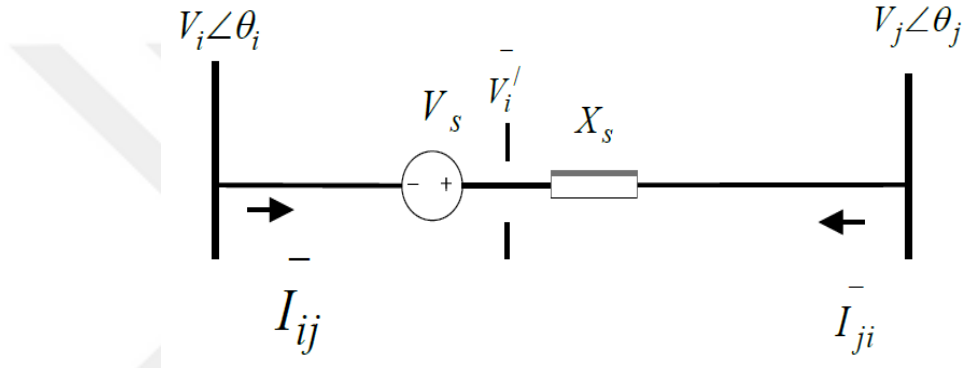
Başlangıç aktif ve reaktif güç değerlerinde normal olarak iletilen güç ifadeleri Denklem (4.16) ve Denklem (4.17)'de gösterilmiştir.

$$P_0(\delta) = \frac{V^2}{X} \sin \delta = \sin \delta \quad (4.16)$$

$$Q_{r0}(\delta) = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) = 1 - \cos \delta \quad (4.17)$$

4.5. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ DENETLEYİCİSİNİN GÜÇ ENJEKTE MODELİ

UPFC'nin enjekte etme modelinde iki bağlantı transformatördeki reaktans bağlı empedans ve iki evirici devresinin çıkış gerilim dalga boyu temel elemanlarının sürekli durum çalışmasındaki durumlarına göre oluşturulmaktadır. Bu model UPFC'nin sürekli durum analizinde etkisini anlayabilmemizi sağlamaktadır. Dahası sürekli durum yük akışı ile birlikte çalışma olanaklarını sunmaktadır [46]. UPFC güç enjekte modelinde seri gerilim kaynaklı evirici sistemin temel fonksiyonunda bulunmadığı için, sürekli durum çalışmada yaklaşık bir eşdeğer model oluşturulmaktadır. Şekil 4.5'de gerilim kaynaklı eviricinin seri bağlantısı verilmiştir.



Şekil 4.5. Gerilim kaynaklı eviricinin seri devre bağlantısı.

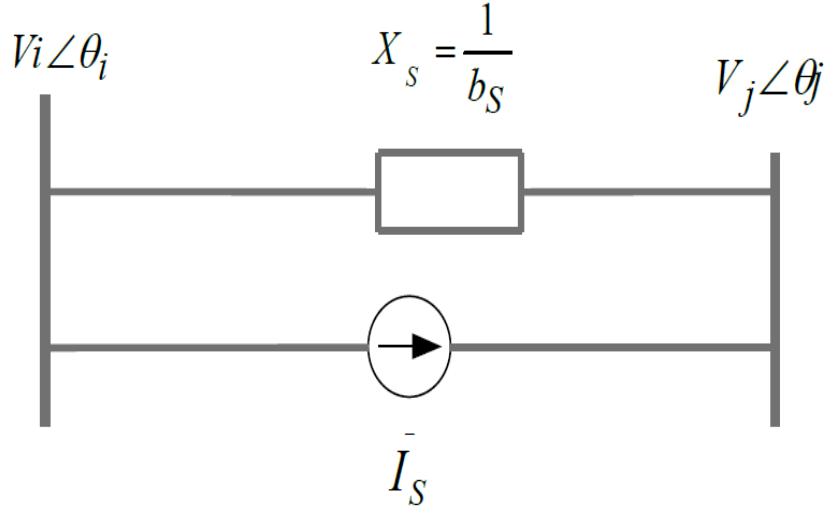
Şekil 4.5'te i ve j baraları kullanılmaktadır. Referans vektör olarak i barasının gerilimi alınmaktadır. Bu gerilim ifadesi Denklem (4.18)'de gösterilmiştir.

$$\bar{V}_i' = V_s + V_i \quad (4.18)$$

Burada, $\bar{V}_i'$ i barasının referans vektörü, V_s kaynak gerilimi ve V_i i barasının gerilimidir. Kaynak geriliminin gösterimi Denklem (4.19)'da verilmiştir.

$$V_s = r V_i e^{j\gamma} \quad (4.19)$$

Bu denklemde r ve γ özel değerler olarak isimlendirilmektedir. Bu özel değerlerden r $0 \leq r \leq r_{maksimum}$ aralığında ve γ $0 \leq \gamma \leq 2\pi$ aralığında değerler almaktadır. Sürekli durum UPFC matematiksel modelinde iletim hattına paralel bağlı akım kaynağı modeli kaynak gerilimi ile yer değiştirmiştir. Elde edilen yeni devre modeli Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Akım kaynağı ile elde edilen yeni devre modeli.

Yeni modelde kullanılan akım kaynağı ve kaynak reaktansı ifadeleri Denklem (4.20) ve Denklem (4.21)'de gösterilmiştir.

$$I_s = -jb_s V_s \quad (4.20)$$

$$b_s = \frac{1}{X_s} \quad (4.21)$$

Burada, I_s akım kaynağından geçen akım, b_s kaynak süseptansı ve X_s kaynak reaktansıdır. Baralar arasındaki görünür güç ifadeleri Denklem (4.22) ve Denklem (4.23)'de gösterilmiştir.

$$S_{is} = -V_i (-I_s)^* \quad (4.22)$$

$$S_{js} = -V_j (I_s)^* \quad (4.23)$$

Yukarıda verilen eşitlikleri biribiri yerine yazıldığı durumda yeni elde edilen ifade denklem (4.24)'de gösterilmiştir.

$$S_{is} = V_i [jb_s r V_i e^{j\gamma}] \quad (4.24)$$

Eular teoreminin kullanılması ile oluşan yeni eşitlikler Denklem (4.25) ve Denklem (4.26)'da verilmiştir.

$$S_{is} = V_i [e^{j(\gamma+90)} b_s r V_i] \quad (4.25)$$

$$S_{is} = V_i^2 b_s r [\cos(-\gamma - 90) + j \sin(-\gamma - 0)] \quad (4.26)$$

Trigonometrik eşitliklerin kullanılması ile Denklem (4.26)'nın sadeleşmiş hali Denklem (4.27)'de gösterilmiştir.

$$S_{is} = b_s r V_i^2 \sin \gamma - j b_s V_i^2 \cos \gamma \quad (4.27)$$

Benzer eşleştirmenin Denklem (4.23)'de yapılması ile elde edilen yeni eşitlik Denklem (4.28)'de gösterilmiştir.

$$S_{js} = V_j [-j b_s r V_j E^{j\gamma}] \quad (4.28)$$

UPFC'de şönt evirici devresi seri bağlı olan evirici devresi üzerinden aktif gücü sağlamaktadır. Kayıplar ihmal edildiğinde evirici devrelerindeki aktif güç eşitlikleri Denklem (4.29)'da gösterilmiştir.

$$P_{evirici1} = P_{evirici2} \quad (4.29)$$

Seri gerilim kaynağı tarafından sağlanan görünür güç ifadesi Denklem (4.30)'da gösterilmiştir.

$$S_{evirici2} = v_s I_{ij}^* = r e^{j\gamma} V_i \left(\frac{\bar{V}_i - V_j}{jX_s} \right)^* \quad (4.30)$$

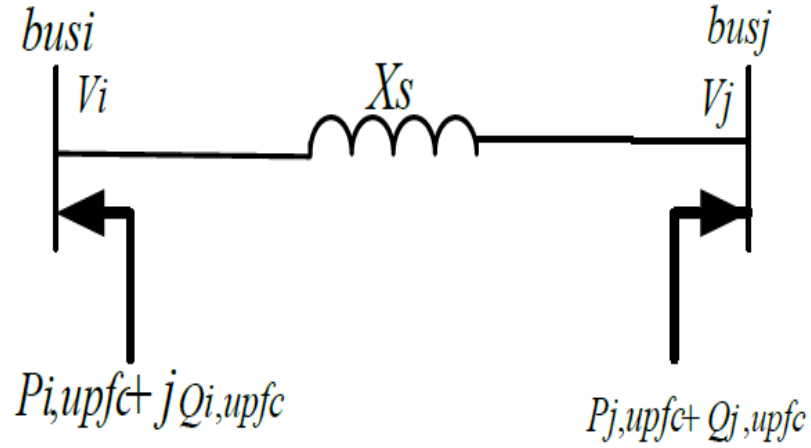
Denklem (4.30)'daki görünür güç ifadesi sadeleştirildiğinde evirici 2 devresindeki aktif ve reaktif güç ifadeleri Denklem (4.31) ve Denklem (4.32)'de gösterilmiştir.

$$P_{evirici2} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - r b_s V_i^2 \sin \gamma \quad (4.31)$$

$$Q_{evirici2} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) - r b_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (4.32)$$

Burada, θ_i ve θ_j i ve j numaralı baralardaki gerilim açılarıdır. Reaktif gücün evirici1 tarafından alınması veya verilmesi UPFC tarafından bağımsız olarak kontrol edilebilir. Dahası ayrı bir şönt reaktif kaynak olarak modellenenebilir. Bu durumda reaktif gücün temel işlevi i barasındaki gerilim seviyesini kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutabilmektedir. Sonuç olarak sürekli durum UPFC matematiksel model i ve j baraları arasında bulunan

evirici 1 evirici 2 devresi ile yapılandırmaktadır [46]. Yapılandırılan bu model Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. i ve j baraları arasında UPFC modellemesi.

Şekilde 4.6’da verilen eşdeğer güç eşitlikleri Denklem (4.33), Denklem (4.34), Denklem (4.35) ve Denklem (4.36)’da gösterilmiştir.

$$P_{i,upfc} = rb_s V_i^2 \sin \gamma - rb_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (4.33)$$

$$P_{j,upfc} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (4.34)$$

$$Q_{i,upfc} = rb_s V_i^2 \cos \gamma \quad (4.35)$$

$$Q_{j,upfc} = rb_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) \quad (4.36)$$

5. ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ (EDS)

Günümüzde fosil yakıtların tükenmiş olması ve giderek artan enerji taleplerinden dolayı enerjinin daha etkin ve verimli kullanılması için EDS kullanımı oldukça önemli bir hal almıştır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarında enerjinin depolanması amacıyla kullanılmasının yanısıra çok baralı güç sistemlerinde baraların gerilim ve reaktif gücü kontrol etmede kullanılan FACTS cihazlarında kullanımı popüler bir hal almıştır. Özellikle de güç elektroniği tabanlı olarak kullanılan kompanzasyon sistemlerinden STATCOM, SSSC ve UPFC’de kullanımı güç sistemlerinin çalışma limitlerin korunması ve daha da iyileştirilmesi yönünde önemlidir. Hem geçici durum çalışmalarda hem de sürekli durum çalışmalarda EDS’nin kullanımı sistemlerin talep edilen güçlere karşı rahatlıkla iyi cevap verebileceği görülmektedir. FACTS cihazlarında EDS elemanın kontrolünde depolanmış olan enerji ile sistemin aktif güç kontrolü yapılmaktadır. Belirlenen duruma bağlı olarak EDS elemanı sisteme aktif güç verir ya da sistemden aktif güç çeker. Günümüzde birçok alanda EDS elemanlarının kullanımı ile karşılaşabiliriz. Bunların en yaygın olarak kullanılanları yakıt hücresi, süperkapasitör, batarya ve folanlardır. Bu tez çalışmasında yakıt hücresi kullanılmıştır.

5.1. YAKIT HÜCRESİ

Yakıt hücresi sistemi elektrik üretiminde 3 temel katmandan oluşmaktadır. Bunlar yakıt işlemcisi, yakıt hücresi devresi ve güç bağlantı ünitesidir. Güç işlemcisi yakıtın dönüştüğü kısımdır. Yakıt hücresi devresi sistem içerisinde kullanılan elektrokimyasallar sayesinde elektriğin üretildiği kısımdır. Güç bağlantı ünitesi ise AC güç akım, gerilim ve frekans içeren bölge ve DC güce dönüşen kısımdır. Yakıt hücresi devresi DC güç üretmektedir. Ancak bu kısımda üretilen güç gözlemlenebildiği ve ölçülebildiği için doğrudan kontrol edilemeyebilir. Güç bağlantı ünitesi şebekenin ihtiyacına göre AC gücü DC güce dönüştürmeden sorumlu olan bölgedir. Bu bağlantı ünitesinde yakıt hücresinin fonksiyonları iki blok halinde ifade edilmektedir. İlk blok sırasıyla aktif ve reaktif güç hakkında bilgi gönderir ve şebeke ile olan ilişkisi incelenir. Bu bloğa şebeke ara yüz denetleyicisi denir. İkinci blok olarak yakıt hücresi modellemesinde yakıt durağan model

kullanılmaktadır. Bu blok ile ara yüz denetleyicisi, yakıt işlemcisi ve yakıt hücresi devresinin dengeli ve kararlı bir şekilde çalışmasını sağlayan kısımdır. Yakıt hücresi modelindeki yakıt hücre akımının sabit güç kontrolü ile hesaplaması Denklem (5.1)'de gösterilmiştir.

$$I_k = \frac{(P_{ref} / V_{k0} - i_k)}{T_e} \quad (5.1)$$

Burada, I_k yakıt hücresi akımı, V_{k0} yakıt hücresi başlangıç DC gerilimi, i_k başlangıç yakıt hücresi akımı, T_e küçük zaman sabitidir. Bağlandığı sistemde giriş sinyali aşırı derecede büyük olduğu durumda yakıt hücresinde akım hesaplaması Denklem (5.2)'deki gibi olmaktadır.

$$I_k = \left(\frac{U_{limit} q H_2}{2K_r} - i_k \right) \frac{1}{T_e} \quad (5.2)$$

Burada, U_{lim} minimum veya maksimum yakıt tüketimi, H_2 hidrojen oranı, q soğutma katsayısı, K_r DC katsayısıdır. Yakıt hücresinin şebeke bağlantısı transformatör ve ideal bir evirici vasıtasıyla sağlandığında, AC gerilim modülasyon genliği sayesinde ayarlanmaktadır. Modülasyon genlik ifadesinin türevli hali Denklem (5.3)'de gösterilmiştir.

$$m = \frac{(K_m (V_{ref} - V_s) - m)}{T_m} \quad (5.3)$$

Burada, m modülasyon genliği, K_m modülasyon katsayısı, V_{ref} referans gerilim, V_s ölçülen şebeke gerilimi, T_m modülasyon zaman sabitidir. Genlik kontrolü bir sınırlandırıcı tarafından denetlenmektedir. Yakıt hücresinin DC gücü şebekeye aktif ve reaktif güç olarak ilave edilmektedir. Güç sistemine ilave edilen aktif ve reaktif güç eşitlikleri Denklem (5.4) ve Denklem (5.5)'de gösterilmiştir.

$$P_s = \frac{V_t V_s}{X_t} \sin(\theta_t - \theta_s) \quad (5.4)$$

$$Q_s = \frac{V_t V_s}{X_t} \cos(\theta_t - \theta_s) \quad (5.5)$$

Burada, V_t yakıt hücresinin terminal gerilimi, X_t transformatör reaktansı, θ_t yakıt hücresinin terminal gerilim açısı ve θ_s kaynak geriliminin açısıdır. Kaynak gerilim açısının ifadesi Denklem (5.6)'da gösterilmiştir.

$$\theta_t = \theta_s + a \sin\left(\frac{X_t I_k}{K_m V_s}\right) \quad (5.6)$$

Denklem (5.6)'da verilen terminal gerilim açısı ifadesi Denklem (5.5)'deki reaktif güç eşitliği ile birleştirildiğinde Denklem (5.7) yazılır.

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_t} + \frac{V_s V_t}{X_t} \sqrt{1 - \left(\frac{X_t I_k}{K_m V_s}\right)^2} \quad (5.7)$$

Evirici genliğinin ve referans gerilim değerinin güç akışı çözümlemesinde kullanılan ifadeleri Denklem (5.8) ve Denklem (5.9)'da verilmiştir.

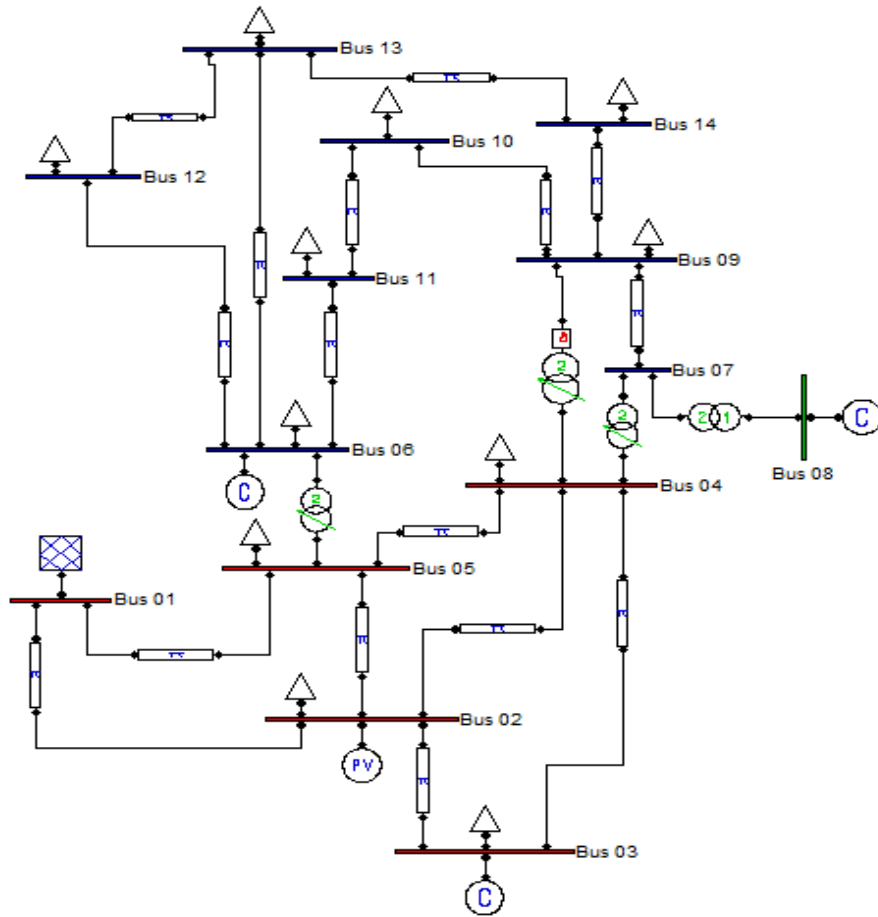
$$e_{g0} = -\frac{X_t}{V_s(V_t / K_m)} \sqrt{P_g^2 + \left(Q_g + \frac{V_g^2}{X_t}\right)^2} \quad (5.8)$$

$$V_{ref} = V_g + \left(\frac{e_g}{K_m}\right) \quad (5.9)$$

Burada, e_g evirici genliği, e_{g0} başlangıç evirici genliği, V_g bağlı olduğu bara gerilimi, P_g bağlı olduğu bara aktif gücü, Q_g bağlı olduğu bara reaktif gücüdür [47].

6. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu tez çalışması Uluslararası Elektrik Elektronik Mühendisliği (IEEE) 14 baralı güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Bu tez çalışmasında Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır [48]. IEEE 14 baralı güç sistemi devre modeli Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. 14 Baralı güç sistemi devre modeli.

IEEE 14 baralı güç sisteminde 1 adet salınım barası, 4 adet generatör barası ve 9 adet yük barası bulunmaktadır. IEEE 14 baralı sistemin 5-6, 4-8 ve 4-9 iletim hatlarında gerilimi düşüren transformatörler kullanılmıştır. 5-6 ve 4-9 numaralı iletim hatları arasındaki transformatörlerde kademe değiştirme ve faz kaydırma işlemleri yapılmaktadır. IEEE 14 baralı güç sistemindeki hat bilgileri, generatör bilgileri ve transformatör kademe değiştirme bilgileri Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. 14 baralı güç sisteminin hat bilgileri.

Hat sayısı	Baradan	Baraya	Hat empedansı (p.u.)		Yarı hat suseptans (p.u.)	Görünür güç oranı
			Direnç	Reaktans		
1	1	2	0.01938	0.05917	0.02640	120
2	1	5	0.05403	0.22304	0.02190	65
3	2	3	0.04699	0.19797	0.01870	36
4	2	4	0.05811	0.17632	0.02460	65
5	2	5	0.05695	0.17388	0.01700	50
6	3	4	0.06701	0.17103	0.01730	65
7	4	5	0.01335	0.04211	0.00640	45
8	4	7	0	0.20912	0	55
9	4	9	0	0.55618	0	32
10	5	6	0	0.25202	0	45
11	6	11	0.09498	0.1989	0	18
12	6	12	0.12291	0.25581	0	32
13	6	13	0.06615	0.13027	0	32
14	7	8	0	0.17615	0	32
15	7	9	0	0.11001	0	32
16	9	10	0.03181	0.0845	0	32
17	9	14	0.12711	0.27038	0	32
18	10	11	0.08205	0.19207	0	12
19	12	13	0.22092	0.19988	0	12
20	13	14	0.17093	0.34802	0	12

Çizelge 6.2. 14 baralı güç sisteminin kademe değiştirme bilgileri.

Baradan	Baraya	Kademe değiştirme değeri (p.u.)
4	7	0.978
4	9	0.969
5	6	0.932

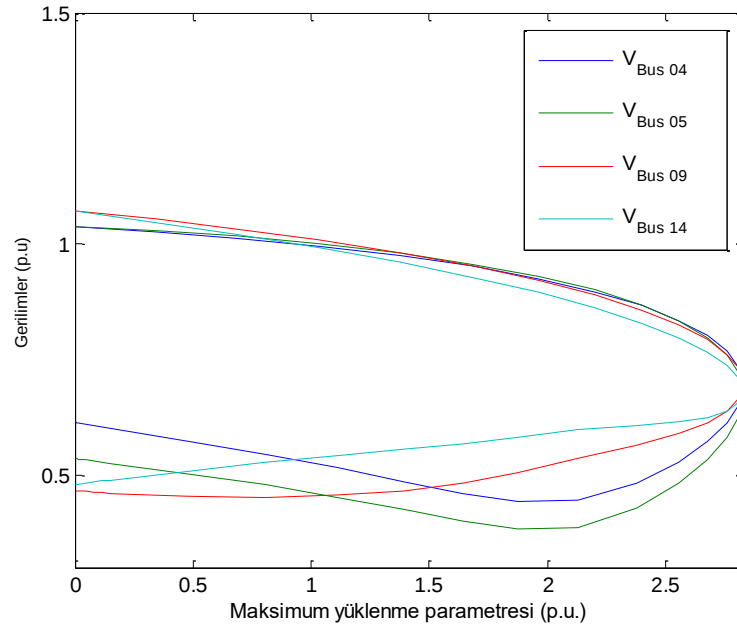
Çizelge 6.3. 14 baralı güç sisteminin generatör bilgileri.

Bara	P _{giriş} (MW)	P _{maksimum} (MW)	P _{minimum} (MW)	Q _{giriş} (MVA _r)	Q _{maksimum} (MVA _r)	Q _{minimum} (MVA _r)
1	232.4	200	50	16.9	100	-40
2	40	80	20	42.4	50	-40
3	0	50	15	23.4	40	0
6	0	35	10	12.2	24	-6
8	0	30	10	17.4	24	-6

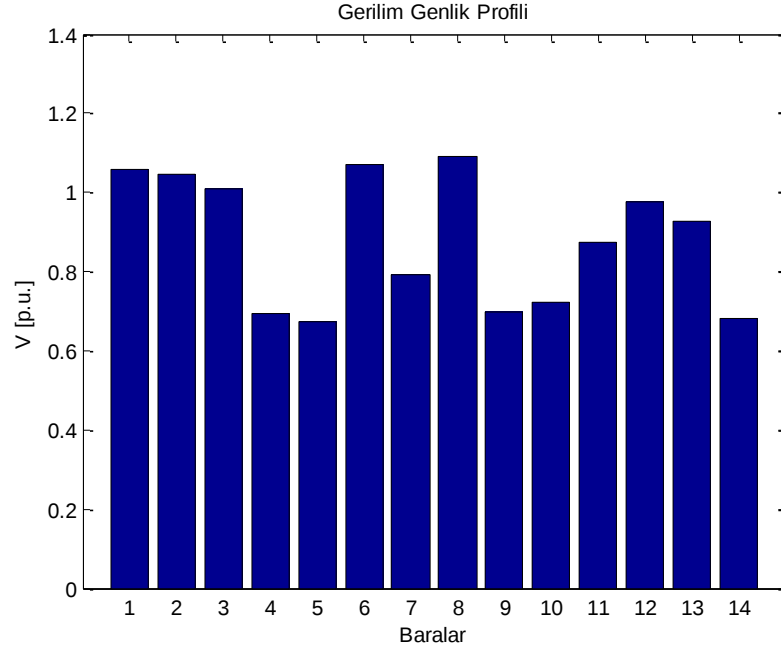
Sistemin sürekli yük akışı yaklaşımı ile farklı durumlar incelenmiştir. Öncelikli olarak sistemde UPFC ve EDS'nin olmadığı durumdaki gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi ve bara genlik profilleri incelenmiştir. Daha sonraki analizlerde 4, 5, 9 ve 14 numaralı baralarda UPFC'nin gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. UPFC analizinden sonra UPFC-EDS ile birlikte kullanıldığı durumların analizleri gerçekleştirilmiştir. Farklı EDS güçlerinde UPFC ile birlikte kullanılması sonucunda elde edilen gerilim-maksimum yüklenme parametresi ilişkileri ve bara gerilim genlik değerlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Hem UPFC hem de EDS elemanlarında yakıt hücresinin gücü 100 MVA olarak seçilmiştir. Yapılan sürekli yük akışı analizi ile elde edilen gerilim, yüklenme parametresi ve bara gerilim genlik değerlerinin değerlendirmeleri yapılmıştır.

7. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI

IEEE 14 baralı güç sisteminde ilk aşamada UPFC'nin kullanılmadığı durumdaki sürekli yük akışı analiz gerçekleştirilmiştir. Sürekli yük akışı esnasında bara gerilimi en düşük olan baralar 4, 5, 9 ve 14 numaralı baralardır. Sürekli yük akışı sonucunda UPFC'nin kullanılmadığı durumda 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri 2.8286 olarak bulunmuştur. 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim değerleri sırasıyla 0.69289, 0.67532, 0.69726 ve 0.68148 p.u'dir. UPFC'nin kullanılmadığı durumdaki 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim-maksimum yüklenme parametre ilişkisi Şekil 7.1'de verilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.2'de gösterilmiştir.

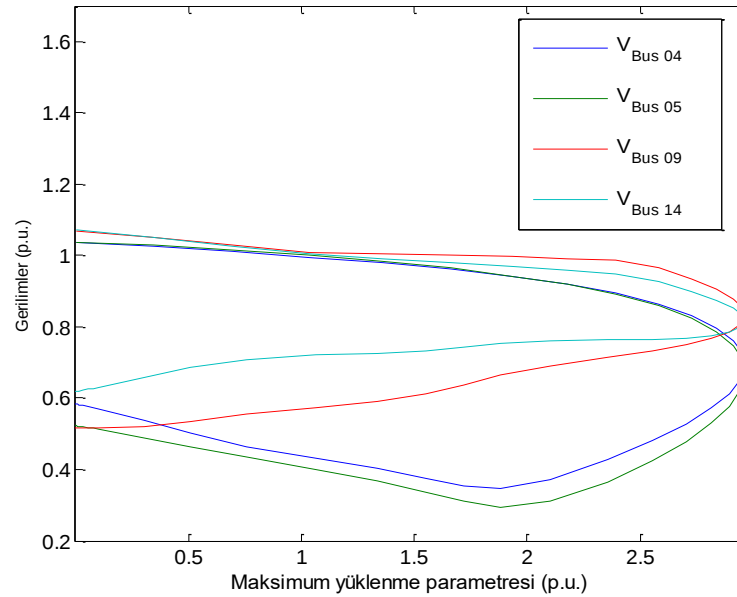


Şekil 7.1. IEEE 14 baralı sistemde sürekli durum çalışmada yüklenme parametresi.

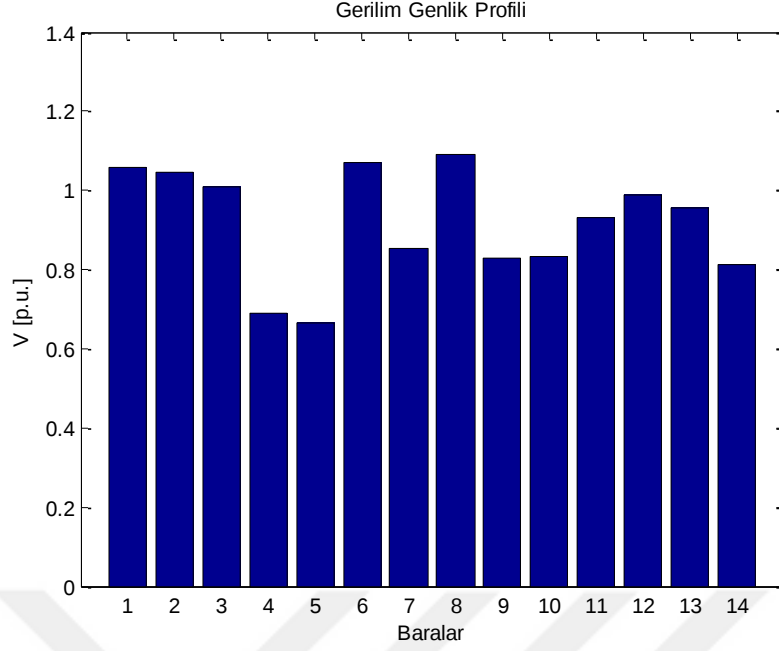


Şekil 7.2. IEEE 14 baralı sistemde sürekli durum çalışmada baraların genlik profili.

İkinci yapılan analizde 100 MVA gücündeki UPFC'nin IEEE 14 baralı güç sisteminde 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 2.9638 olarak elde edilmiştir. UPFC'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.3'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.4'de gösterilmiştir



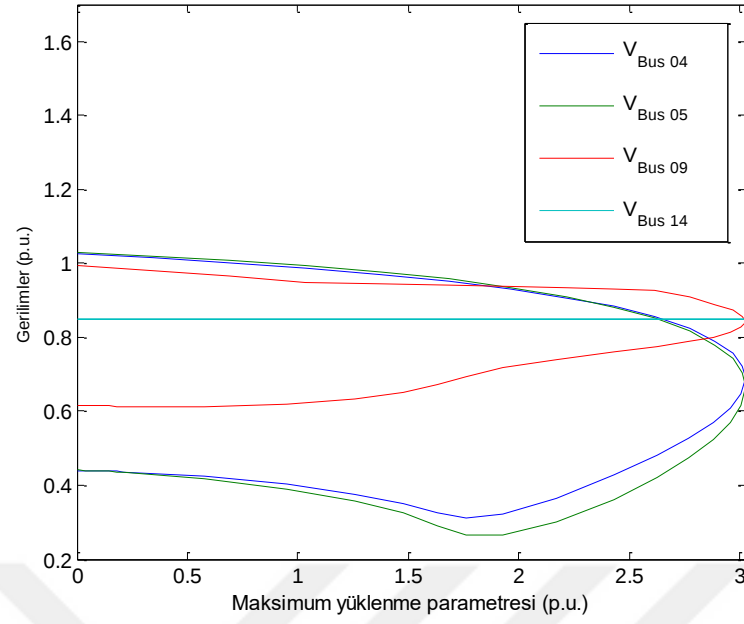
Şekil 7.3. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi.



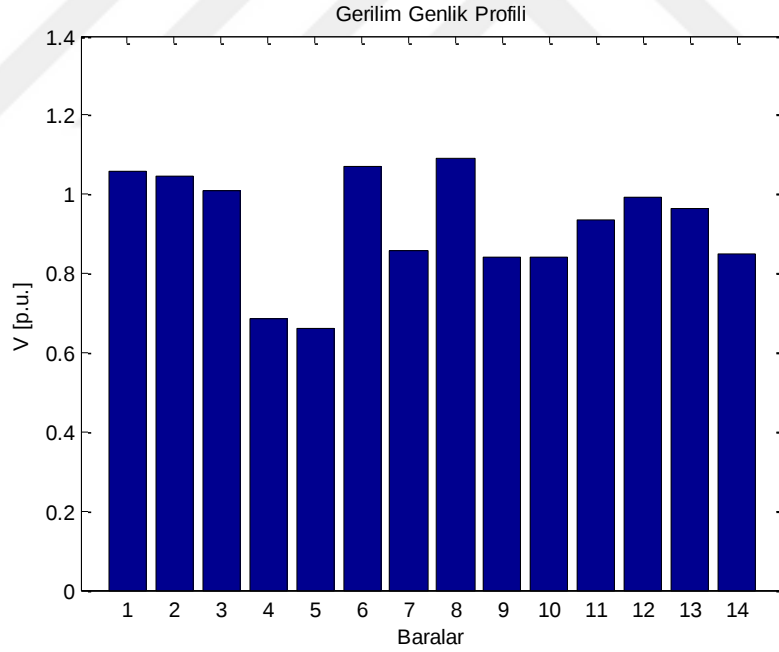
Şekil 7.4. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili.

UPFC'nin 9 ile 14 numaralı baralar arasına bağlanması ile 9 ve 14 numaralı baraların gerilim genlik değerleri artmıştır. 9 numaralı baranın gerilim değerleri 0.69726 p.u değerinden 0.82847 p.u. değerine yükselirken 14. numaralı baranın gerilimi 0.68148 p.u. değerinden 0.8139 p.u. değerine yükselmiştir. 4 ve 5 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde UPFC'nin kullanılmadığı durum ile karşılaştırıldığında düşmüştür. 4 numaralı baranın gerilimi 0.69289 p.u. değerinden 0.68966 değerine düşerken 5. numaralı bara gerilimi ise 0.67532 p.u. değerinden 0.66507 p.u. değerine düşmüştür.

Üçüncü yapılan analizde 100 MVA gücündeki UPFC'nin yanısıra 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. UPFC–EDS birlikte kullanılmıştır. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç ilk etapta % 10'dur. IEEE 14 baralı güç sisteminde UPFC 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanırken, EDS elemanı 14 numaralı baraya bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 3.0257 olarak elde edilmiştir. UPFC–EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.5'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.5. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi.

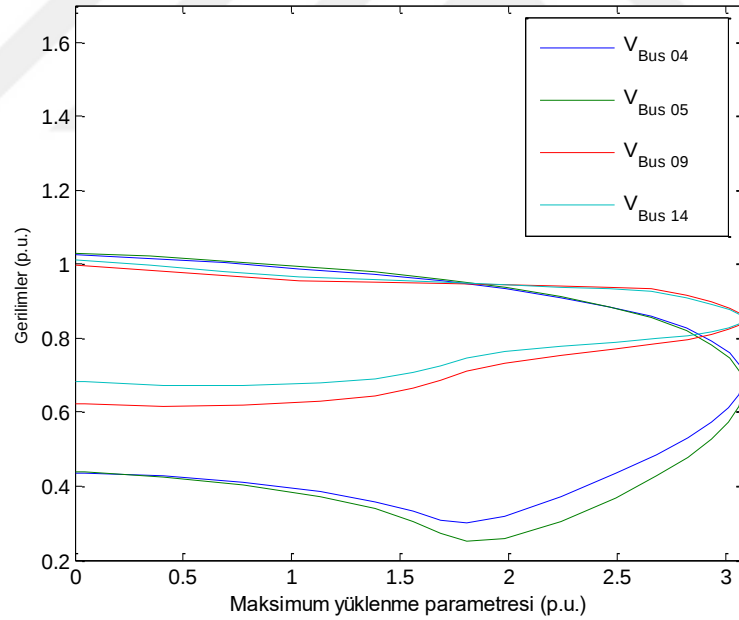


Şekil 7.6. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili.

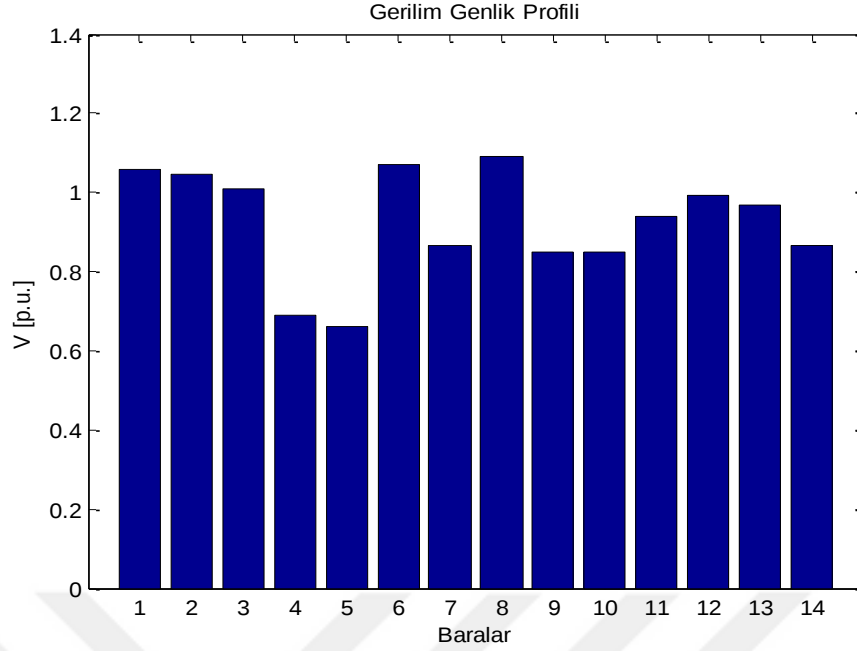
9 ile 14 numaralı baralar arasına bağlanan 100 MVA gücündeki UPFC'nin yanısıra 14 numaralı baraya 100 MVA gücünde yakıt hücresi bağlanmıştır. Yakıt hücresinin % 10'luk güç oranında 9 numaralı baranın gerilim değerleri 0.82847 p.u değerinden 0.84174

p.u. değerine yükselirken 14. numaralı baranın gerilimi 0.8139 p.u. değerinden 0.85 p.u. değerine yükselmiştir. 4 ve 5 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde sadece UPFC'nin kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında düşmüştür. 4 numaralı baranın gerilimi 0.68966 p.u. değerinden 0.68683 değerine düşerken 5 numaralı bara gerilimi ise 0.66507 p.u. değerinden 0.66177 p.u. değerine düşmüştür.

Bir sonraki analizde 100 MVA gücündeki UPFC ile birlikte 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi IEEE 14 baralı güç sistemine dahil edilmiştir. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç bu analizde % 20 oranındadır. 100 MVA gücündeki UPFC 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanırken, EDS elemanı olarak kullanılan yakıt hücresi 14 numaralı baraya bağlanmıştır. Sistemde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 3.0795 olarak elde edilmiştir. UPFC-EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.7'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.8'de gösterilmiştir.



Şekil 7.7. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile yüklenme parametresi.



Şekil 7.8. IEEE 14 baralı sistemde 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili.

9 ile 14 numaralı baralar arasına UPFC'nin yanısıra 14 numaralı baraya 100 MVA gücünde yakıt hücresi bağlanmıştır. Yakıt hücresinin % 20 oranında güç vermesi ile 9 numaralı baranın gerilim değerleri 0.84174 p.u. değerinden 0.85077 p.u. değerine yükselirken 14 numaralı baranın gerilimi 0.85 p.u. değerinden 0.865 p.u. değerine yükselmiştir. 4 ve 5 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde sadece UPFC'nin % 10 yakıt hücresi ile kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında artmıştır. 4 numaralı baranın gerilimi 0.68683 p.u. değerinden 0.68809 değerine yükselirken 5 numaralı bara gerilimi ise 0.66177 p.u. değerinden 0.66265 p.u. değerine yükselmiştir. UPFC'nin yakıt hücresi ile farklı güçlerde kullanıldığı diğer durumlarda elde edilen maksimum yüklenme parametre değeri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. 9–14 numaralı hatlarda bulunan UPFC'nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri.

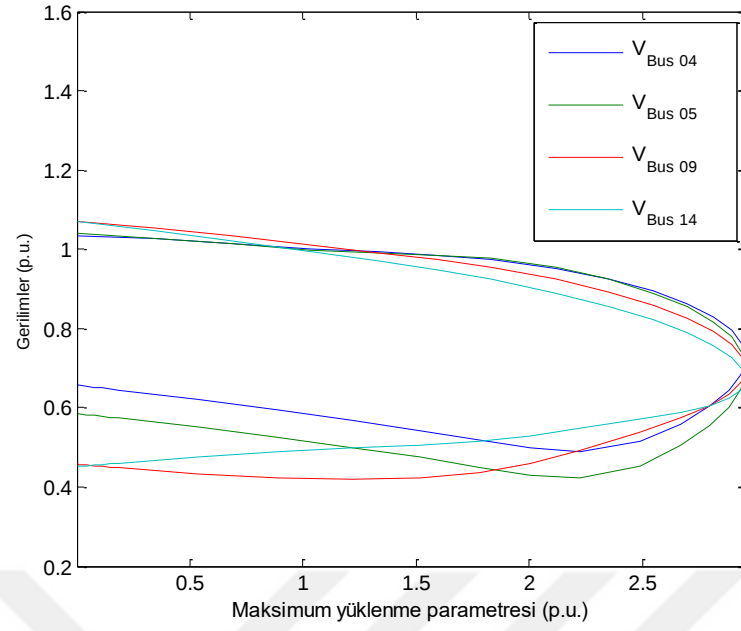
Yakıt hücresinin güç sistemine vermiş olduğu yüzdelik güç değeri	Maksimum yüklenme parametre değeri
% 30	3.1366
% 40	3.1857
% 50	3.242

Çizelge 7.1. (devam). 9–14 numaralı hatlarda bulunan UPFC’nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri.

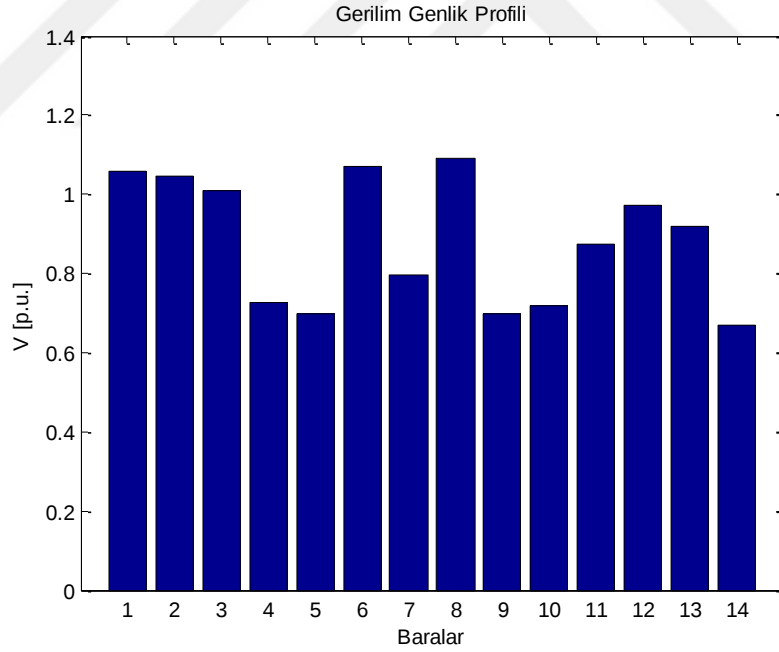
Yakıt hücresinin güç sistemine vermiş olduğu yüzdelik güç değeri	Maksimum yüklenme parametre değeri
% 60	3.2907
% 70	3.3411
% 80	3.3917
% 90	3.444
% 100	3.4964

14 numaralı baraya bağlı farklı yakıt hücresi güç değerlerinde ve 9 ile 14 numaralı iletim hattına bağlanan UPFC’nin IEEE 14 baralı güç sisteminin maksimum yüklenme değerini arttırdığı görülmektedir. % 100 yakıt gücü ile sistemin en yüksek maksimum yüklenme değerine ulaştığı görülürken, % 10 yakıt hücresi gücü ile sistemde maksimum yüklenme parametre değerinin en az arttığı görülmüştür.

100 MVA gücündeki UPFC’nin IEEE 14 baralı güç sisteminde 4 ile 5 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 2.9545 olarak elde edilmiştir. UPFC’nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.9’da gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.10’da gösterilmiştir.



Şekil 7.9. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi.

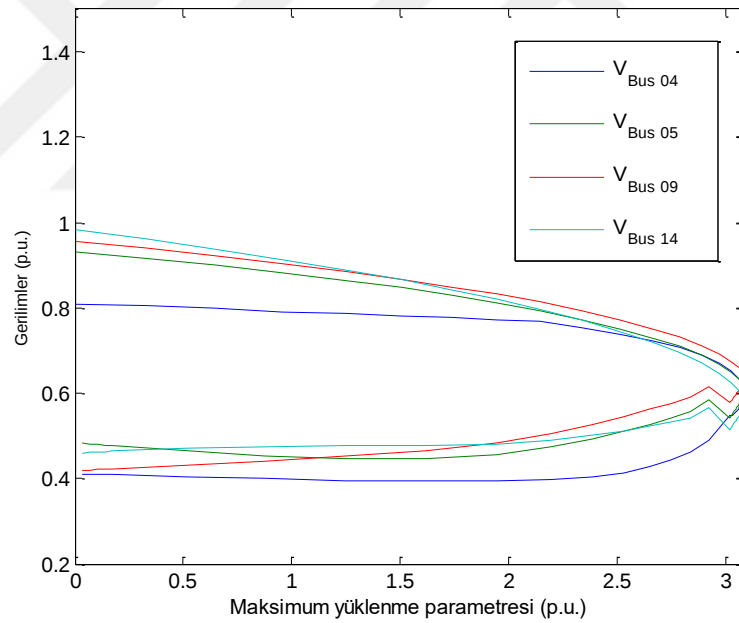


Şekil 7.10. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili.

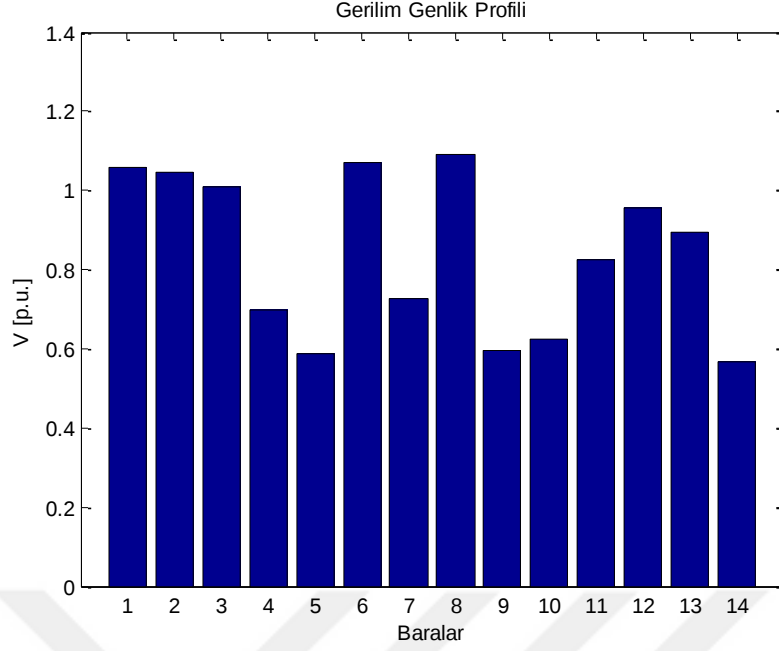
UPFC'nin 4 ile 5 numaralı baralar arasına bağlanması ile 4 ve 5 numaralı baraların gerilim genlik değerleri artmıştır. 4 numaralı baranın gerilim değerleri 0.69289 p.u değerinden 0.72479 p.u. değerine yükselirken 5. numaralı baranın gerilimi 0.67532 p.u. değerinden

0.69622 p.u. değerine yükselmiştir. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde UPFC'nin kullanılmadığı durum ile karşılaştırıldığında düşmüştür. 9 numaralı baranın gerilimi 0.69726 p.u. değerinden 0.69647 değerine düşerken 14 numaralı bara gerilimi ise 0.68148 p.u. değerinden 0.67115 p.u. değerine düşmüştür.

4 ve 5 numaralı iletim hattına bağlanan 100 MVA gücündeki UPFC'nin yanısıra 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. UPFC-EDS birlikte kullanılmıştır. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç %10'dur. IEEE 14 baralı güç sisteminde UPFC 4 ile 5 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanırken. EDS elemanı 5 numaralı baraya bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 3.0844 olarak elde edilmiştir. UPFC-EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.11'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.12'de gösterilmiştir.



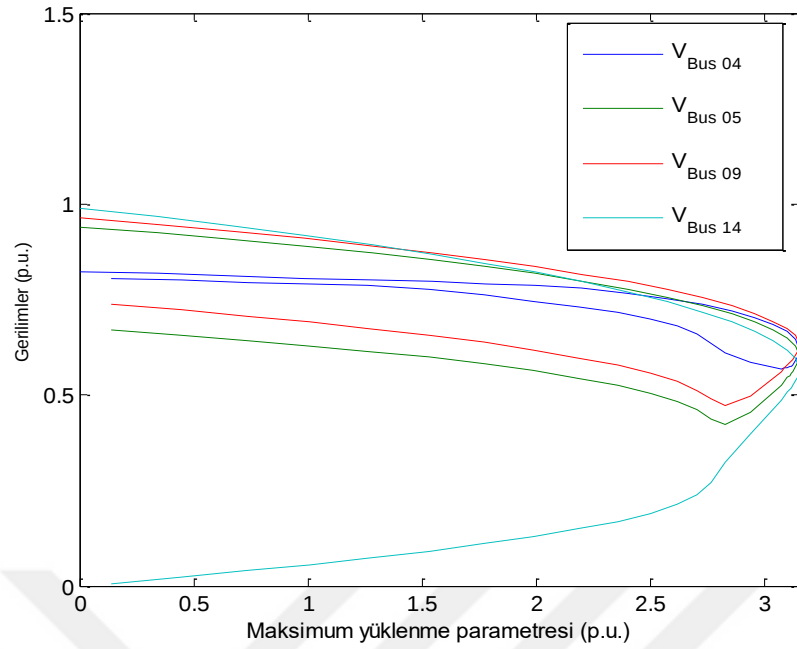
Şekil 7.11. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi.



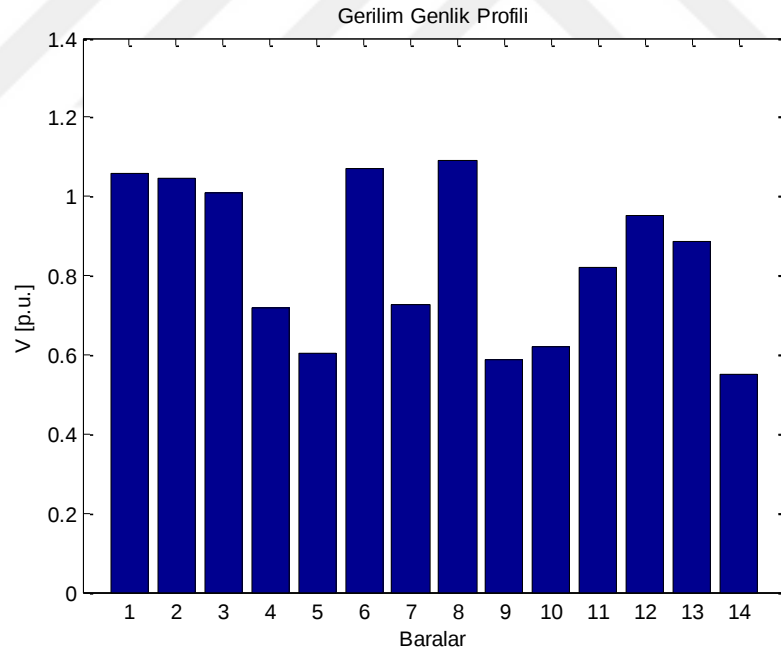
Şekil 7.12. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili.

4 ile 5 numaralı baralar arasına UPFC bağlanan UPFC'nin yanısıra 5 numaralı baraya 100 MVA gücünde yakıt hücresi bağlanması ve yakıt hücresinin % 10 oranında sisteme güç vermesi ile 4 numaralı baranın gerilim değerleri 0.72479 p.u değerinden 0.74 p.u. değerine yükselirken 5 numaralı baranın gerilimi 0.69622 p.u. değerinden 0.61451 p.u. değerine düşmüştür. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde sadece UPFC'nin kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında düşmüştür. 9 numaralı baranın gerilimi 0.69647 p.u. değerinden 0.61843 p.u. değerine düşerken 14 numaralı bara gerilimi ise 0.67115 p.u. değerinden 0.5788 p.u. değerine düşmüştür.

4 ve 5 numaralı iletim hattına bağlanan 100 MVA gücündeki UPFC ile birlikte 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç % 20'dur. IEEE 14 baralı güç sisteminde UPFC 4 ile 5 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanırken, EDS elemanı olan yakıt hücresi 5 numaralı baraya bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 3.1519 p.u. olarak elde edilmiştir. UPFC-EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.13'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.14'de gösterilmiştir.



Şekil 7.13. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili.



Şekil 7.14. IEEE 14 baralı sistemde 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili.

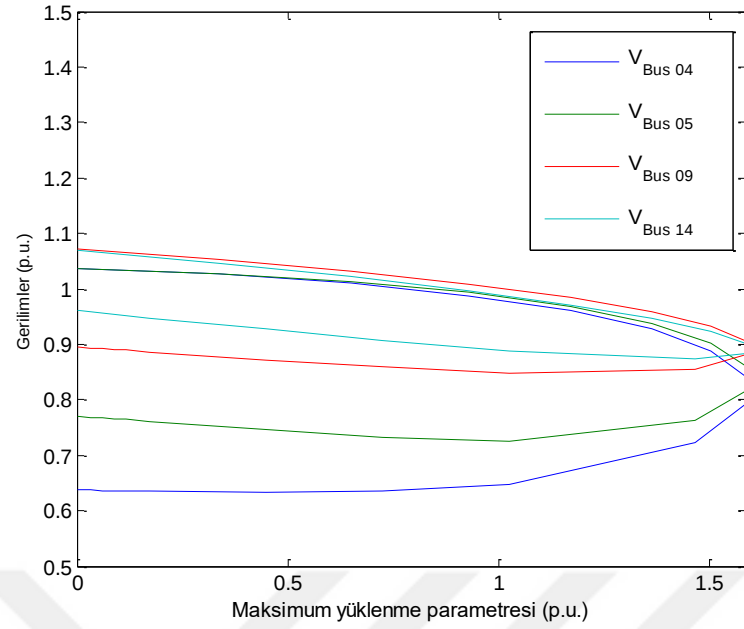
4-5 numaralı iletim hatları arasına bağlanan UPFC'nin yakıt hücresi ile farklı güçlerde kullanıldığı diğer durumlarda elde edilen maksimum yüklenme parametre değerleri Çizelge 7. 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2. 4–5 numaralı hatlarda bulunan UPFC’nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri.

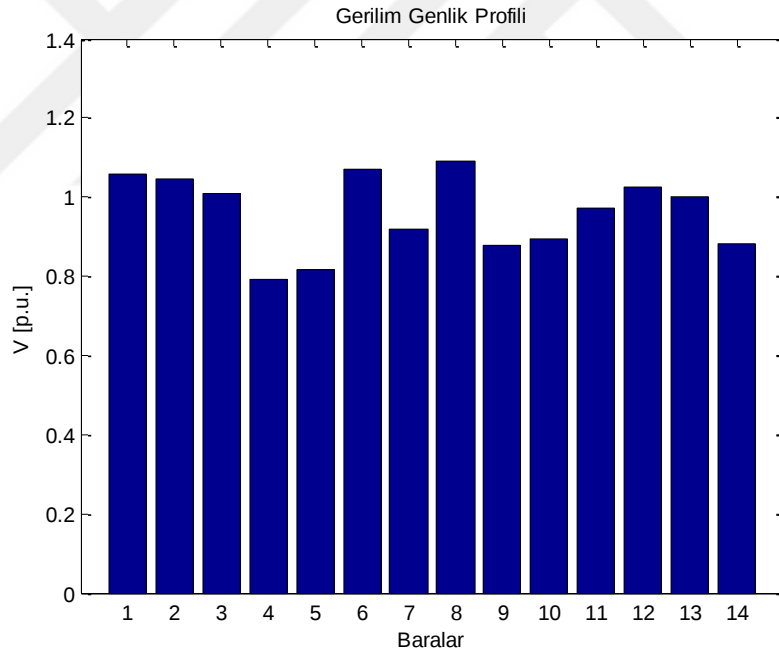
Yakıt hücresinin güç sistemine vermiş olduğu yüzdelik güç değeri	Maksimum yüklenme parametre değeri
% 30	3.2174
% 40	3.2816
% 50	3.3438
% 60	3.4034
% 70	3.4573
% 80	3.5172
% 90	3.5768
% 100	3.6321

5 numaralı baraya bağlı farklı yakıt hücresi güç değerlerinde ve 4 ile 5 numaralı iletim hattına bağlanan UPFC’nin IEEE 14 baralı güç sisteminin maksimum yüklenme değerini arttırdığı görülmektedir. % 100 yakıt gücü ile sistemin en yüksek maksimum yüklenme değerine ulaştığı görülürken, % 10 yakıt hücresi gücü ile sistemde maksimum yüklenme parametre değerinin en az arttığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında diğer analiz yaklaşımlarında ise geçici durumların gerilim kararlılığı üzerinde oluşturmuş olduğu etkiler üzerinde durulmuştur. Geçici durumun oluşması kesicinin belli bir süre devre dışı kalıp tekrar devreye girmesi şeklinde gösterilmiştir. Buda hat kopması olarak temsil edilmektedir. Geçici durum çalışmasının ilk etabında 2 ile 3 numaralı iletim hattı arasına kesici bağlanmıştır. Bu kesici devrede kalıp çıkma zamanı 1 saniye ile 1.5 saniyeler arasındadır. IEEE 14 baralı sistemde ilk aşamada FACTS cihazlarından UPFC’nin kullanılmadığı durumdaki modelleri kullanılmadan sürekli yük akışı analiz gerçekleştirilmiştir. Sürekli yük akışı esnasında geçici durum durumunda bara gerilimi en düşük olan baralar 4, 5, 9 ve 14 numaralı baralar olmuştur. Sürekli yük akışı sonucunda UPFC’nin kullanılmadığı durumda 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri 1.5846 p.u. olarak bulunmuştur. 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim değerleri sırasıyla 0.69289, 0.67532, 0.69726 ve 0.68148 p.u’dur. UPFC’nin kullanılmadığı durumdaki 4, 5, 9 ve 14 numaralı yük baralarının gerilim–maksimum yüklenme parametre ilişkisi Şekil 7.15’de verilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.16’da gösterilmiştir.



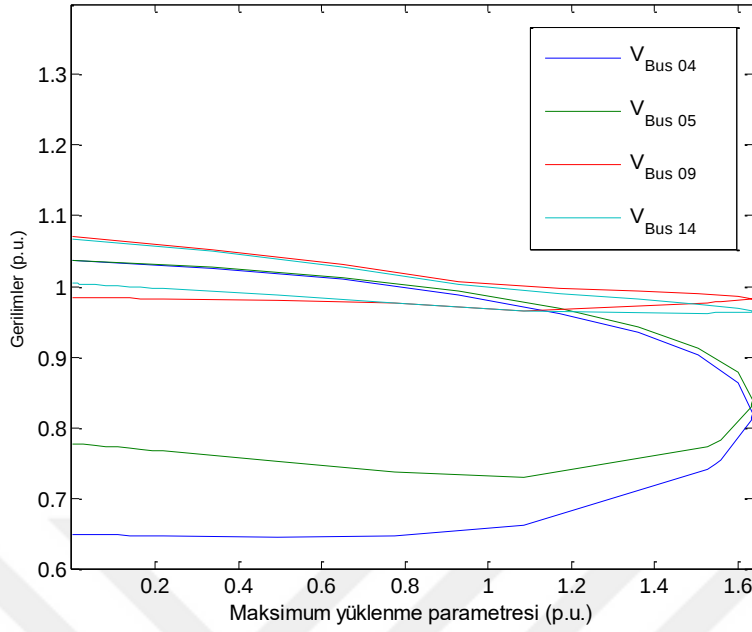
Şekil 7.15. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada yüklenme parametresi.



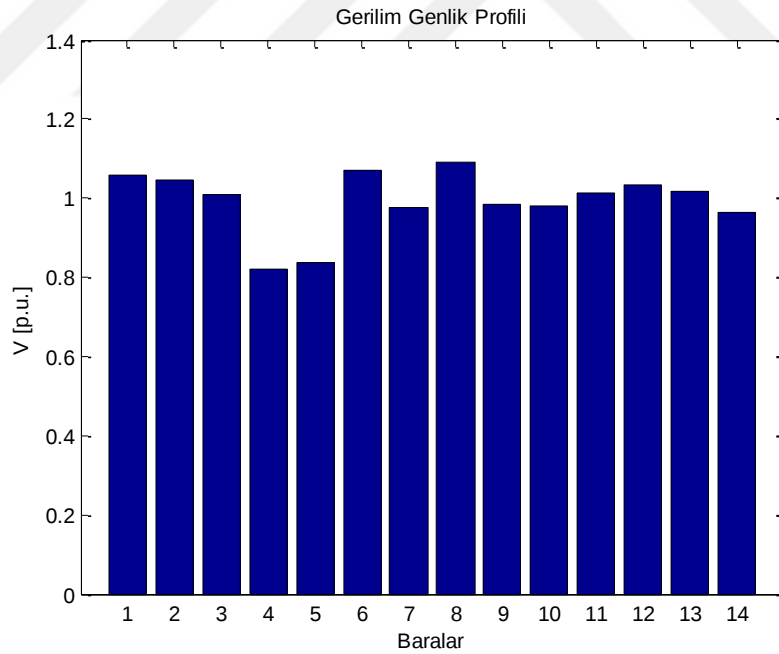
Şekil 7.16. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada baraların genlik profili.

Geçici durum analizinde 100 MVA gücündeki UPFC IEEE 14 baralı güç sisteminde 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 1.6351 p.u. olarak elde edilmiştir. UPFC'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.17'de gösterilirken, baraların gerilim

genlik profili Şekil 7.18’de gösterilmiştir.



Şekil 7.17. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi.

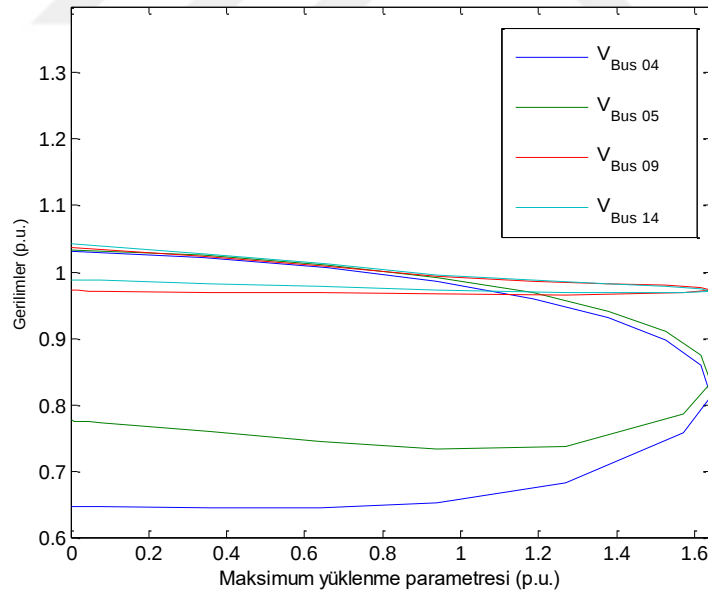


Şekil 7.18. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili.

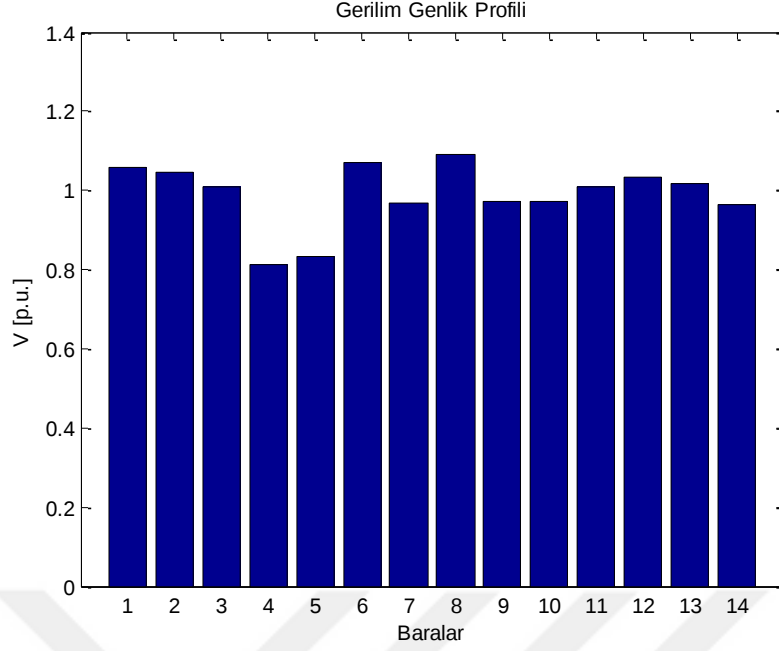
IEEE 14 baralı güç sisteminde kesicinin belli bir süre devreye girip çıkmasında UPFC’nin 9 ile 14 numaralı baralar arasına bağlanması ile 4 ve 5 numaralı baraların gerilim genlik

değerleri artmıştır. 4 numaralı baranın gerilim değerleri 0.79012 p.u değerinden 0.81949 p.u. değerine yükselirken 5 numaralı baranın gerilimi 0.81593 p.u. değerinden 0.83782 p.u. değerine yükselmiştir. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizdeki UPFC'nin kullanılmadığı durum ile karşılaştırıldığında yükselmiştir. 9 numaralı baranın gerilimi 0.8804 p.u. değerinden 0.98296 p.u. değerine yükselirken 14 numaralı bara gerilimi ise 0.88418 p.u. değerinden 0.96445 p.u. değerine yükselmiştir.

Geçici durum için 100 MVA gücündeki UPFC'nin yanısıra 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. UPFC ve EDS elemanlarından yakıt hücresi birlikte kullanılmıştır. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç miktarı ilk etapta % 10'dur. IEEE 14 baralı güç sisteminde UPFC 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanırken, EDS elemanı 14 numaralı baraya bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 1.6407 p.u. olarak elde edilmiştir. UPFC-EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.19'da gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.20'de gösterilmiştir.



Şekil 7.19. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi.

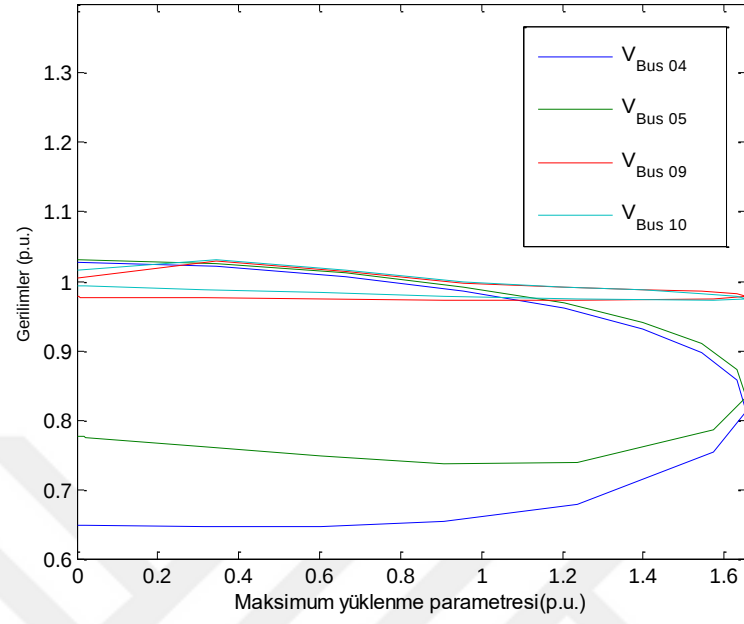


Şekil 7.20. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili.

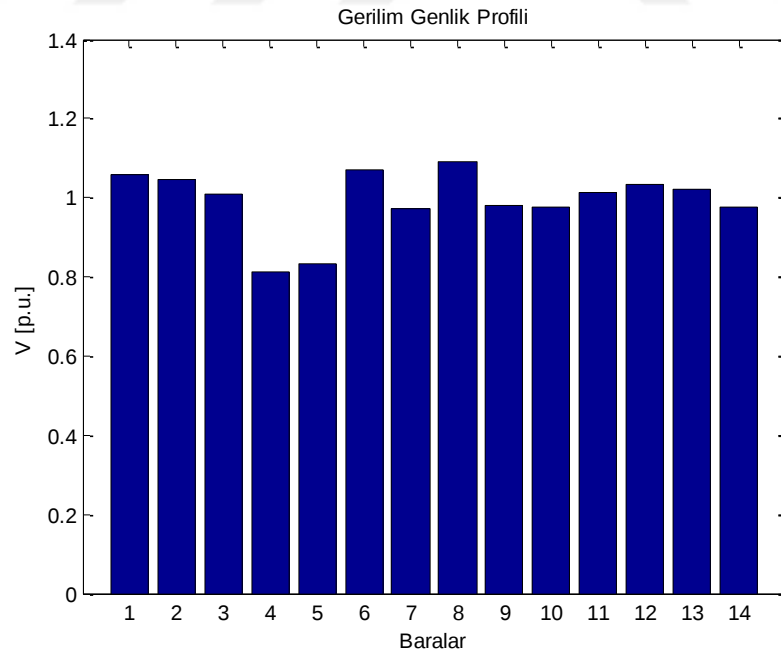
Geçici durum esnasında 9 ile 14 numaralı baralar arasına bağlanan UPFC'nin yanısıra 14 numaralı baraya 100 MVA gücünde yakıt hücresi bağlanmıştır. Geçici durum esnasında yakıt hücresinin % 10 oranında sisteme güç vermesi ile 4 numaralı baranın gerilim değerleri 0.81949 p.u değerinden 0.83301 p.u. değerine yükselirken 5 numaralı baranın gerilimi 0.83782 p.u. değerinden 0.83301 p.u. değerine düşmüştür. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde geçici durumda UPFC'nin kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında 9 numaralı baranın gerilimi 0.98296 p.u. değerinden 0.97305 p.u. değerine düşerken 14 numaralı baranın gerilimi 0.96445 p.u. değerinden 0.965 p.u. değerine yükselmiştir.

Geçici durum incelemesinde 100 MVA gücündeki UPFC'nin yanısıra 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. UPFC ve EDS elemanlarından yakıt hücresi birlikte kullanılmıştır. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç miktarı % 20'dur. IEEE 14 baralı güç sisteminde UPFC 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanırken, EDS elemanı 14 numaralı baraya bağlanmıştır. 2 ile 3 numaralı iletim hatları arasında bulunan kesicinin açıp kapanması esnasında 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 1.6526 p.u. olarak elde edilmiştir. UPFC-EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki

ilişki Şekil 7.21’de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.22’de gösterilmiştir.



Şekil 7.21. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile yüklenme parametresi.



Şekil 7.22. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 9 ile 14 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili.

Geçici durum esnasında 9 ile 14 numaralı baralar arasına UPFC bağlanan UPFC'nin yanısıra 14 numaralı baraya 100 MVA gücünde yakıt hücresi bağlanmıştır. Geçici durum esnasında yakıt hücresinin sisteme % 20 oranında güç ilave etmesi ile 4 numaralı baranın gerilim değerleri 0.83301 p.u değerinden 0.81136 p.u. değerine düşerken 5 numaralı baranın gerilimi 0.83301 p.u. değerinden 0.8324 p.u. değerine yükselmiştir. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde geçici durumda UPFC'nin kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında 9 numaralı baranın gerilimi 0.97305 p.u. değerinden 0.97854 p.u. değerine yükselirken, 14 baralı baranın gerilimi 0.965 p.u. değerinden 0.978 p.u. değerine yükselmiştir.

Geçici durum esnasında 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanan UPFC'nin yakıt hücresi ile farklı güçlerde kullanıldığı diğer durumlarda elde edilen maksimum yüklenme parametre değeri Çizelge 7.3'de gösterilmiştir.

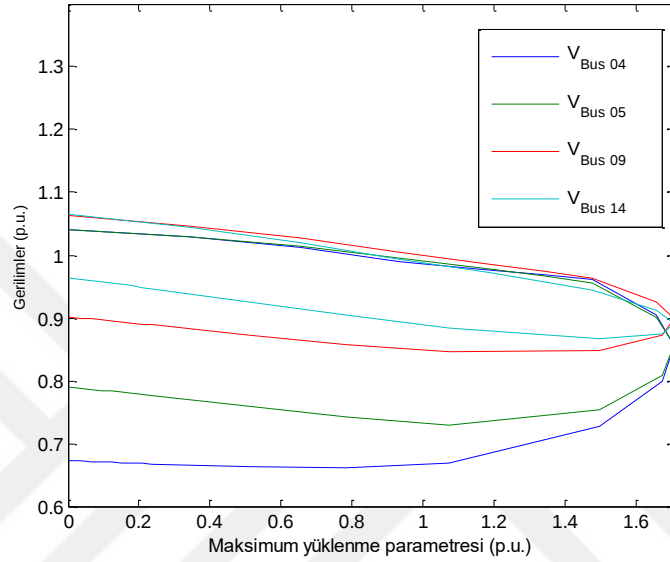
Çizelge 7.3. Geçici durum esnasında 9-14 numaralı hatlarda bulunan UPFC'nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri.

Yakıt hücresinin güç sistemine vermiş olduğu yüzdelik güç değeri	Maksimum yüklenme parametre değeri
% 30	1.6645
% 40	1.6777
% 50	1.6886
% 60	1.6999
% 70	1.7133
% 80	1.7245
% 90	1.7389
% 100	1.7492

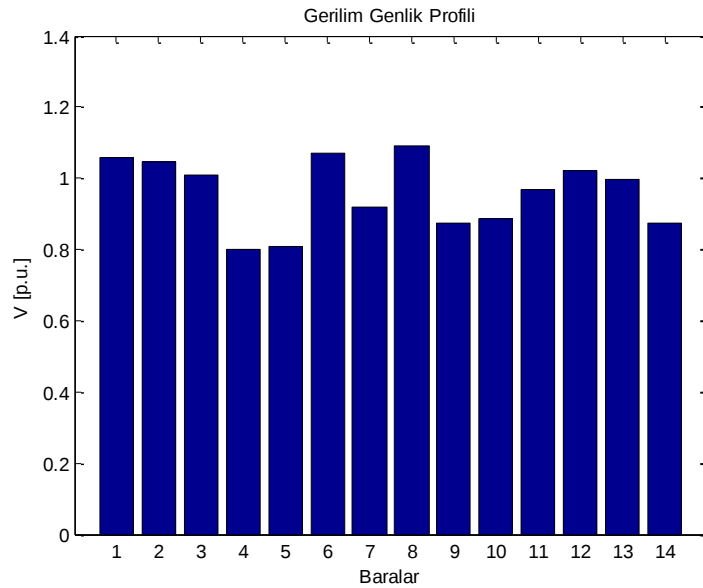
Geçici kararlılık esnasında farklı yakıt hücresi güç değerlerinde 9 ile 14 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanan UPFC'nin sistemdeki maksimum yüklenme değerini arttırdığı görülmektedir. 14 numaralı baraya bağlanan yakıt hücresi gücünün % 100 olması ile sistemin en yüksek maksimum yüklenme değerine ulaştığı görülürken, % 10 yakıt hücresi gücü ile sistemde maksimum yüklenme parametre değerinin en az arttığı görülmüştür.

Geçici durum için yapılan diğer analizde 100 MVA gücündeki UPFC IEEE 14 baralı güç

sisteminde 4 ile 5 numaralı baralar arasında bulunan iletim hattına bağlanmıştır. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 1.7051 p.u. olarak elde edilmiştir. UPFC'nin 4 ile 5 numaralı baralar arasında kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.23'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.24'de gösterilmiştir.



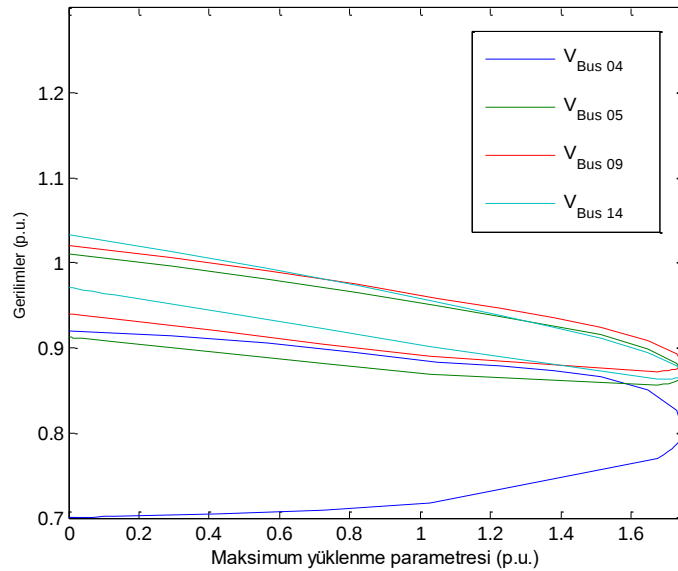
Şekil 7.23. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile yüklenme parametresi.



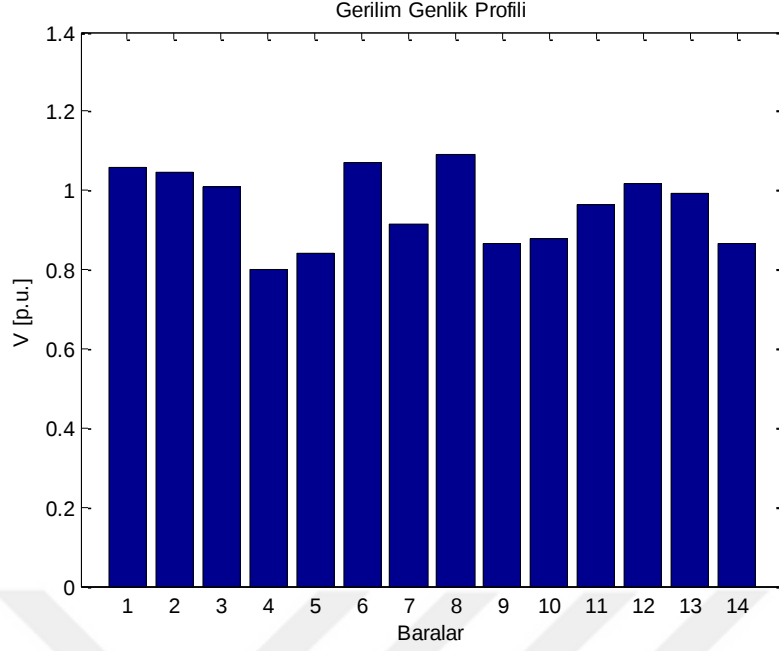
Şekil 7.24. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ile baraların genlik profili.

IEEE 14 baralı güç sisteminde kesicinin belli bir süre devreye girip çıkmasında UPFC'nin 4 ile 5 numaralı baralar arasına bağlanması ile 4 ve 5 numaralı baraların gerilim genlik değerleri artmıştır. 4 numaralı baranın gerilim değerleri 0.79012 p.u değerinden 0.79926 p.u. değerine yükselirken 5 numaralı baranın gerilimi 0.81593 p.u. değerinden 0.80923 p.u. değerine yükselmiştir. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizdeki UPFC'nin kullanılmadığı durum ile karşılaştırıldığında 9 numaralı baranın gerilimi 0.8804 p.u. değerinden 0.87221 p.u. değerine düşerken 14 numaralı bara gerilimi ise 0.88418 p.u. değerinden 0.82497 p.u. değerine düşmüştür.

Geçici durum için 4 ile 5 numaralı baralar arasındaki iletim hattına bağlanan 100 MVA gücündeki UPFC'nin yanısıra 5 numaralı baraya bağlanan 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. UPFC ve EDS elemanlarından yakıt hücresi birlikte kullanılmıştır. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç miktarı % 10'dur. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 1.7252 p.u. olarak elde edilmiştir. UPFC-EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.25'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.26'da gösterilmiştir.



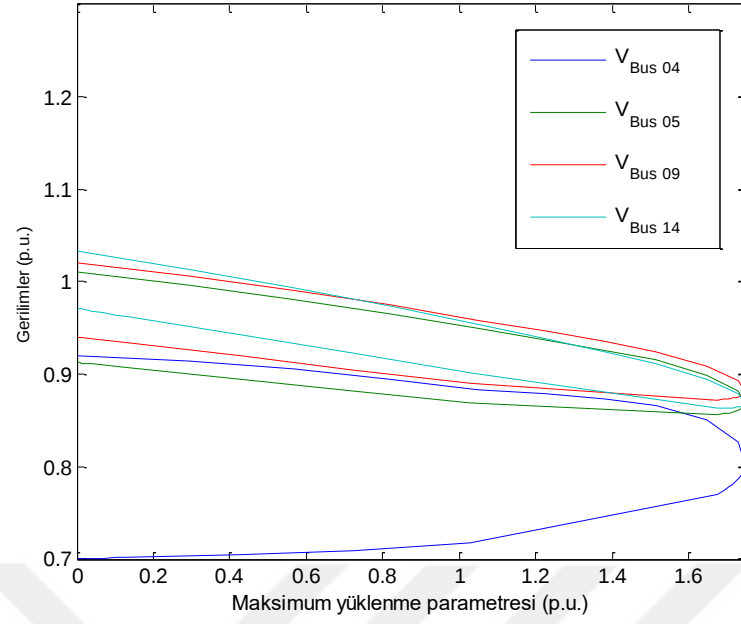
Şekil 7.25. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile yüklenme parametresi.



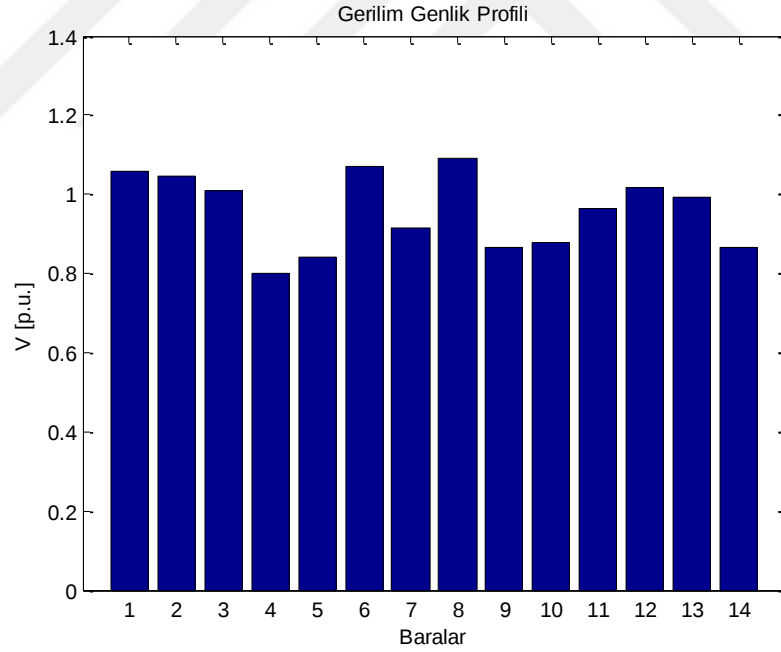
Şekil 7.26. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 10 EDS gücü ile baraların genlik profili.

Geçici durum esnasında 4 ile 5 numaralı baralar arasına bağlanan UPFC'nin yanısıra 5 numaralı baraya 100 MVA gücünde yakıt hücresi bağlanmıştır. Geçici durum esnasında yakıt hücresinin % 10 oranında sisteme güç vermesi ile 4 numaralı baranın gerilim değerleri 0.79926 p.u. değerinden 0.79423 p.u. değerine düşerken 5 numaralı baranın gerilimi 0.80923 p.u. değerinden 0.83 p.u. değerine yükselmiştir. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde geçici durumda UPFC'nin kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında 9 numaralı baranın gerilimi 0.87221 p.u. değerinden 0.86545 p.u. değerine düşerken, 14 baralı baranın gerilimi 0.82497 p.u. değerinden 0.86782 p.u. değerine yükselmiştir.

Geçici durum için 4 ile 5 numaralı baralar arasındaki iletim hattına bağlanan 100 MVA gücündeki UPFC'nin yanısıra 5 numaralı baraya bağlanan 100 MVA gücünde EDS elemanlarından yakıt hücresi kullanılmıştır. UPFC ve EDS elemanlarından yakıt hücresi birlikte kullanılmıştır. EDS elemanlarında yakıt hücresinin sisteme vermiş olduğu güç miktarı % 20'dur. 14 baralı güç sisteminde yapılan sürekli güç akışı sonucunda yüklenme parametre değeri 1.7485 p.u. olarak elde edilmiştir. UPFC-EDS'nin kullanılması ile 4, 5, 9 ve 14 numaralı baraların gerilim-maksimum yüklenme parametre değeri arasındaki ilişki Şekil 7.27'de gösterilirken, baraların gerilim genlik profili Şekil 7.28'de gösterilmiştir.



Şekil 7.27. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile yüklenme parametresi.



Şekil 7.28. IEEE 14 baralı sistemde geçici durum çalışmada 4 ile 5 numaralı baralarda kullanılan UPFC ve % 20 EDS gücü ile baraların genlik profili.

Geçici durum esnasında 4 ile 5 numaralı baralar arasına UPFC bağlanan UPFC'nin yanısıra 5 numaralı baraya 100 MVA gücünde yakıt hücresi bağlanmıştır. Geçici durum esnasında yakıt hücresinin % 20 oranında sisteme güç ilave etmesi ile 4 numaralı baranın

gerilim değerleri 0.79423 p.u değerinden 0.79857 p.u. değerine yükselirken 5 numaralı baranın gerilimi 0.83 p.u. değerinden 0.842 p.u. değerine yükselmiştir. 9 ve 14 numaralı baraların gerilim değerleri bir önceki analizde geçici durumda UPFC'nin kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında 9 numaralı baranın gerilimi 0.86545 p.u. değerinden 0.86593 p.u. değerine yükselirken, 14 baralı baranın gerilimi 0.86782 p.u. değerinden 0.86701 p.u. değerine düşmüştür.

Geçici durum esnasında 4 ile 5 numaralı hatlarda bulunan UPFC'nin yakıt hücresi ile farklı güçlerde kullanıldığı diğer durumlarda elde edilen maksimum yüklenme parametre değeri Çizelge 7.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.4. Geçici durum esnasında 4–5 numaralı hatlarda bulunan UPFC'nin farklı güçlerdeki yakıt hücresi ile kullanımındaki maksimum yüklenme parametre değerleri.

Yakıt hücresinin güç sistemine vermiş olduğu yüzdelik güç değeri	Maksimum yüklenme parametre değeri
% 30	1.7717
% 40	1.7946
% 50	1.8173
% 60	1.8396
% 70	1.8632
% 80	1.8897
% 90	1.9161
% 100	1.9442

Geçici kararlılık esnasında farklı yakıt hücresi güç değerlerinde 4 ile 5 numaralı iletim hatları arasına bağlanan UPFC'nin sistemdeki maksimum yüklenme değerini arttırdığı görülmektedir. % 100 yakıt hücresi gücü ile sistemin en yüksek maksimum yüklenme değerine ulaştığı görülürken, % 10 yakıt hücresi gücü ile sistemde maksimum yüklenme parametre değerinin en az arttığı görülmüştür.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinin çalışma koşullarının iyileştirilmesi ve dinamik durumlarda hızlı cevap verebilme yeteneğine sahip olan UPFC'nin statik ve dinamik davranışları incelenmiştir. Genel olarak sistemde aktif–reaktif güç, gerilim, açı, akım ve empedans kontrolünü sağlamada UPFC'nin avantajlarından yararlanarak bu tez çalışmasında kullanılması önerilmiştir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan EDS elemanlarından yakıt hücresinin gerilim kararlılığı üzerinde ne gibi etkiler oluşturabileceği konusunda UPFC ile birlikte kullanılması amaçlanmıştır. Benzetim çalışmasında IEEE 14 baralı güç sistemi tercih edilmiştir. IEEE 14 baralı güç sisteminde öncelikli olarak sürekli ve geçici durumlarda yük akışı analizi ile gerilim profili en düşük olan baraların tespiti gerçekleştirilmiştir. Geçici durumda yapılan sürekli yük akışı analizinde yüklenme parametre değerinin çok azaldığı görülmüştür. Daha sonraki analiz kısımlarında sürekli durum çalışmada sistemin maksimum yüklenme parametresi, UPFC'nin farklı iletim hatlarına bağlandığı durumdaki maksimum yüklenme parametresi ve UPFC'nin EDS elemanlarından yakıt hücresi ile birlikte kullanıldığı durumdaki gerilim kararlılığı analizleri incelenmiştir. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde UPFC'nin yakıt hücresi ile kullanılması durumunda diğer senaryolar ile karşılaştırıldığında gerilim-maksimum yüklenme parametre değerinin arttığı görülmüştür. Bu çalışmada kullanılan yakıt hücresinin farklı yüzdelik güç değerlerinde IEEE 14 baralı güç sisteminin yüklenme parametre değerini yükselttiği görülmüştür. Benzer şekilde maksimum yüklenme parametre değerinin artması UPFC ve yakıt hücresinin bağlı olduğu bara gerilim profil değerlerini iyileştirmiştir. Bu tez çalışması ile yakıt hücresinin IEEE 30, IEEE 57, IEEE 118 baralı ve farklı test sistemleri üzerinde diğer FACTS cihazları ile birlikte kullanılması sayesinde gerilim kararlılığı haricinde, frekans kararlılığı ve açı kararlılığı gibi farklı analiz yaklaşımlarının kullanılmasına zemin hazırlanmıştır. Analiz için kullanılan PSAT programında bulunan senkron altı rezonans analizleri, generatör denetlemesinde kullanılan türbin yöneticisi, otomatik gerilim regülatörü, güç sistem denetleyicisi gibi farklı çalışma blokları üzerinde test edilmesine olanak sağlamıştır.

9. KAYNAKLAR

- [1] D. B. Valle ve P. B. Araujo, "The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 65, ss. 299-306, 2015.
- [2] R. K. Pandey ve N. K. Singh, "UPFC control parameter identification for effective power oscillation damping," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 31, sayı 6, ss. 269-276, 2009.
- [3] H. Mehrjerdi ve A. Ghorbani, "Adaptive algorithm for transmission line protection in the presence of UPFC," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 91, ss. 10-19, 2017.
- [4] S. Y. Ebrahimi ve A. Ghorbani, "Performance comparison of LOE protection of synchronous generator in the presence of UPFC," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 19, sayı 1, ss. 71-78, 2016.
- [5] Z. H. U. Xinyao, J. I. N. Meng, K. O. N. G. Xiangping, Z. H. A. O. Jingbo, L. I. U. Jiankun ve Z. H. O. U. Qian, "Subsynchronous resonance and its mitigation for power system with unified power flow controller," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 6, sayı 1, ss. 181-189, 2018.
- [6] J. Ling, H. Ji, C. Yu, S. Wang, D. Yu ve S. Jiang, "Design of UPFC sub-synchronous oscillation damping controller based on modal control," *In 2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 2018, ss. 1439-1443.
- [7] D. K. Raju, B. S. Umre, A. S. Junghare ve B. C. Babu, "Mitigation of subsynchronous resonance with fractional-order PI based UPFC controller," *Mechanical Systems and Signal Processing*, c. 85, ss. 698-715, 2017.
- [8] J. Li, F. Liu, Z. Li, S. Mei ve G. He, "Impacts and benefits of UPFC to wind power integration in unit commitment," *Renewable Energy*, c. 116, ss. 570-583, 2018.
- [9] S. Sharma, I. Srivastava, S. Sing ve S. Rawat, "Control of real and reactive power flow using unified power flow controller (UPFC) in integrated power system (electrical grid and wind power generation)," *Research & Reviews: Journal of Physics*, c. 7, sayı 3, ss. 44-50, 2018.
- [10] M. K. Dosoglu, A. Ozturk, U. Guvenc ve S. Tosun, "Investigation of static and dynamic load analysis in the multi-machine wind farms using UPFC," *Elektronika Ir Elektrotehnika*, c. 117, sayı 1, ss. 59-64, 2012.
- [11] M. A. Abido, A. T. Al-Awami ve Y. L. Abdel-Magid, "Analysis and design of UPFC damping stabilizers for power system stability enhancement," *In 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2006, c. 3, ss. 2040-2045.
- [12] M. K. Döşoğlu ve A. B. Arsoy, "Investigation of transient stability of multi machine power systems with multiple UPFC," *In 2011 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2011, ss. 137-

- [13] M. R. Qader, "Design and simulation of a different innovation controller-based UPFC (unified power flow controller) for the enhancement of power quality," *Energy*, c. 89, ss. 576-592, 2015.
- [14] Y. U. A. N. Yubo, L. I. Peng, K. O. N. G. Xiangping, L. I. U. Jiankun, L. I. Qun ve W. A. N. G. Ye, "Harmonic influence analysis of unified power flow controller based on modular multilevel converter," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, c. 4, sayı 1, ss. 10-18, 2016.
- [15] N. Dizdarević, "Unified power flow controller in alleviation of voltage stability problem," Doktora tezi, Elektrotehnike Fakulteti, I računarstva Zagreb Üniversitesi, Sveučilište, Zagrebu, Hırvatistan, 2001.
- [16] N. Dizdarević, S. Tešnjak ve G. Andersson, "Induction motor behaviour during voltage instability solved by unified power flow controller," *In The Second IASTED International Conference on Power and Energy Systems EuroPES 2002*, 2002.
- [17] Y. Xiaohui, C. Chuanbao, L. Haifeng, S. Xinli, L. Wenzhuo, M. Hang ve Z. Yan, "Modeling and simulation of unified power flow controller based on modular multilevel converters," *In IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, ss. 4967-4971.
- [18] L. Jiankun, Z. Ningyu, Z. Xinyao, X. Ke ve C. Zhe, "Method of calculating the maximum transmission capability with unified power flow controller," *The Journal of Engineering*, c. 2017, sayı 13, ss. 1963-1968, 2017.
- [19] B. Xu ve A. Abur, "State estimation of systems with UPFCs using the interior point method," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 19, sayı 3, ss. 1635-1641, 2004.
- [20] T. Masood, S. K. Shah, M. Tajammal, S. A. Qureshi, A. J. Khan, N. Jameel ve D. P. Kothari, "Unified power flow controller modeling and analysis technique on the GCC power grid," *In 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 2018, ss. 1-6.
- [21] K. S. Verma, S. N. Singh ve H. O. Gupta, "Location of unified power flow controller for congestion management," *Electric Power Systems Research*, c. 58, sayı 2, ss. 89-96, 2001.
- [22] C. V. Suresh ve S. S. Raju, "Mathematical modeling and analysis of a generalized unified power flow controller with device rating methodology," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, c. 7, sayı 1, ss. 59-78, 2015.
- [23] M. M. Hosseini-Biyouki, S. Jashfar, B. Vahidi ve H. Askarian-Abyaneh, "Impact of optimal unified power flow controller in electrical transmission systems in reducing transmission cost," *Electric Power Components and Systems*, c. 45, sayı 16, ss. 1762-1772, 2017.
- [24] K. Kaviarasu ve M. Lakshmi, "Single phase unified power flow controller without DC link," *International Journal of Technology and Engineering System*, c. 5, ss. 44-48, 2015.
- [25] B. Geethalakshmi ve P. Dananjayan, "Investigation of performance of UPFC

- without DC link capacitor,” *Electric Power Systems Research*, c. 78, sayı 4, ss. 736-746, 2008.
- [26] S. Yang, Y. Liu, X. Wang, D. Gunasekaran, U. Karki ve F. Z. Peng, “Modulation and control of transformerless UPFC,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 31, sayı 2, ss. 1050-1063, 2015.
 - [27] F. Z. Peng, Y. Liu, S. Yang, S. Zhang, D. Gunasekaran ve U. Karki, “Transformerless unified power-flow controller using the cascade multilevel inverter,” *IEEE transactions on Power Electronics*, c. 31, sayı 8, ss.5461-5472, 2015.
 - [28] P. A. Pour, A. L. Ara ve S. N. Niaki, “Enhancing power system transient stability using optimal unified power flow controller based on lyapunov control strategy,” *Scientia Iranica. Transaction D, Computer Science & Engineering, Electrical*, c. 24, sayı 3, ss. 1458-1466, 2017.
 - [29] S. Kamel, F. Jurado ve J. P. Lopes, “Comparison of various UPFC models for power flow control,” *Electric Power Systems Research*, c. 121, ss. 243-251, 2015.
 - [30] M. Pakdel, H. Eliasi ve M. Ebadian, “Dynamic sliding mode control for power flow control with UPFC,” *In Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*, 2018, ss. 1286-1291.
 - [31] H. Ambriz-Perez, E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel ve A. De la Torre, “Incorporation of a UPFC model in an optimal power flow using Newton's method,” *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, c. 145, ss. 336-344, 1998.
 - [32] X. P. Zhang, E. Handschin ve M. Yao, “Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 16, sayı 3, ss. 367-373, 2001.
 - [33] M. A. Kamarposhti ve H. Lesani, “Effects of STATCOM, TCSC, SSSC and UPFC on static voltage stability,” *Electrical Engineering*, c. 93, sayı 1, ss. 33-42, 2011.
 - [34] M. A. Kamarposhti, M. Alinezhad, H. Lesani ve N. Talebi, “Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC controllers for static voltage stability evaluated by continuation power flow method,” *In 2008 IEEE Canada Electric Power Conference*, 2008, ss. 1-8.
 - [35] R. Natesan ve G. Radman, “Effects of STATCOM, SSSC ve UPFC on voltage stability,” *In Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory*, 2004. ss. 546-550.
 - [36] P. Kundur, N. J. Balu ve M. G. Lauby, *Power System Stability And Control*, c.7, New York: McGraw-Hill, 1994.
 - [37] C. A. Canizares, F. L. Alvarado, C. L. DeMarco, I. Dobson ve W. F. Long, “Voltage collapse and transient energy function analyses of AC/DC systems,” Doktora tezi, Wisconsin Üniversitesi, Madison, USA, 1991.
 - [38] H. D. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah ve N. Balu, “CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 10, sayı 2, ss. 623-634, 1995.
 - [39] V. Ajjarapu ve C. Christy, “The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis,” *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 7, sayı 1, ss. 416-423, 1992.

- [40] O. B. Bekdikhan, "Voltage stability analysis of grid connected wind farms: a case study in trakya transmission system," Yüksek lisans tezi, Elektrik–Elektronik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bahçeşehir Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2014.
- [41] N. G. Hingorani, "Flexible AC transmission," *IEEE Spectra*, c. 30, sayı. 4, ss. 40–45, 1993.
- [42] N. G. Hingorani "High power electronics and flexible AC transmission system," *Proceedings of the American Power Conference; USA*, 1988.
- [43] N. Talebi ve M. Ehsan, "An efficient Power injection modeling and sequential power flow algorithm for FACTS devices," *Southeast Conference, Proceedings. IEEE*, 2004, ss. 97-104.
- [44] M. K. Döşoğlu, "Rüzgar santralinde gerilim ve güç kontrolünün FACTS cihazları ile incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2010.
- [45] A. Haleem ve R. Malgireddy, "Power flow control with static synchronous series compensator (SSSC)," *International Conference on Science and Engineering (ICSE)*, 2011.
- [46] M. Sarkar, "Load Flow Studies With UPFC Power Injection Model," Yüksek lisans tezi, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, Hindistan, 2013.
- [47] B. Yildirim ve M. T. Gencoglu, "Oscillatory stability and eigenvalue analysis of power system with microgrid," *Electrical Engineering*, c. 100, sayı 4, ss. 2351-2360, 2018.
- [48] F. Milano, "An open source power system analysis toolbox," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 20, sayı 3, ss. 1199-1206, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Tuba Emine BOZKURT

Doğum Tarihi ve Yeri : 29.03.1993 / GEBZE

Yabancı Dili :İngilizce

E-posta : tek.kilic@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2020
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2017
Lise	Bilişim Teknolojileri	Denizyıldızları Meslek Lisesi	2011

YAYINLAR

[1] M. Kenan Döşoğlu, Tuba Emine Kılıç “Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı analizinin UPFC-EDS ile incelenmesi”, *3rd International Engineering Research Symposium (Iners'19)*, Düzce, Turkey, 2019.