

İletim Hatlarında Güç Akışının Bulanık Mantık Tabanlı Birleşik Güç Akış Kontrolcüsü ile Denetimi

Power Flow Controlling with Fuzzy Logic Based Unified Power Flow Controller in the Transmission Lines

Lütfü SARIBULUT¹, İlyas EKER², Mehmet TÜMAY³

Çukurova Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 01330, Balcalı, Adana/Türkiye

E-posta: lsaribulut@cu.edu.tr, e-posta: ilyas@cu.edu.tr, e-posta: mtumay@cu.edu.tr

Özet

İletim hatlarında güç akışının kontrolü ve sistem kararlılığının artırılmasında kullanılan en yaygın Esnek (Flexible) Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) cihazı Birleşik Güç Akış Kontrolcüsü (UPFC)'dür. UPFC'nin iletim hatlarında güç akışının kontrolü üzerindeki etkisinde, kontrol mekanizmasında kullanılan kontrolcü önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada Oransal (P), Oransal - Entegral (PI) ve bulanık mantık (FL) kontrolcülerine dayalı farklı kontrol mekanizmaları kullanılarak, çeşitli durum çalışmaları için UPFC'nin performansı incelenmiştir. Geliştirilen bulanık mantık kontrolcüsünün karar alma mekanizması "Takagi-Sugeno Çıkarım" metodu kullanılarak oluşturulmuştur. Kontrolcülerin, UPFC'nin performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için iki durum çalışması uygulanmıştır. Sistemin modellenmesi ve durum çalışmaları sonuçlarının elde edilmesinde PSCAD/EMTDC simülasyon programı kullanılmıştır.

Abstract

The most widely used FACTS device for controlling the power flow in the transmission line and enhancing the system stability is Unified Power Flow Controller (UPFC). The controller used in the control mechanism has an important role in the effectiveness of UPFC on controlling the power flow in the transmission lines. In this study, the performance of UPFC for several case studies was observed by using different control mechanisms based on Proportional, Proportional - Integral (PI) and fuzzy logic controllers. The decision making of developed fuzzy logic controller (FLC) was created by using "Takagi-Sugeno Inference System". Two case studies were applied to prove the effectiveness of controllers on the performance of UPFC. PSCAD/EMTDC program is used to be modeled of the system and to obtain the results of the case studies.

1. Giriş

Günümüzde, endüstriyel büyüme ve toplumsal gelişmelerden dolayı güç talepleri hızla artmaktadır. Bununla birlikte, yeni enerji üretim merkezlerinin ve iletim şebekelerinin kurulması çevresel etkenler ve ekonomik nedenlerden dolayı daha da zorlaşmaktadır [1]. Dolayısıyla kullanıcıların mevcut iletim

hatlarından en verimli şekilde faydalanmaları gerekmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalarla birlikte, mevcut iletim hatlarından daha verimli faydalanılması için yeni yöntemler geliştirilmiş ve uygulanmıştır. İletim şebekelerindeki güç akışının kontrolü ve reaktif güç kompanzasyonu büyük önem taşımaktadır. Güç elektroniği alanındaki hızlı gelişmeler, kullanılan güç sistemlerinden daha verimli yararlanılabilmesi için yeni donanımların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. 1980'lerin sonlarına doğru, güç elektroniğe dayalı Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) teknolojisi geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır [2]. FACTS teknolojisi, mekaniksel kontrolcülerin yerine güç elektroniği elemanlarına (IGBT, transistör, tristör....vb) dayalı yüksek frekanslarda çalışma hızına sahip cihazlardan meydana gelmektedir. Buna göre, FACTS cihazları; güç kontrolünde, gerilim regülasyonunda, geçici kararlılığı arttırmada ve sistem osilasyonlarının azaltılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylelikle, FACTS cihazları mevcut güç sistemlerinden yararlanılmayı en uygun hale getirmekle birlikte, sistemlerin kontrol edilebilirliğini de arttırmaktadır.

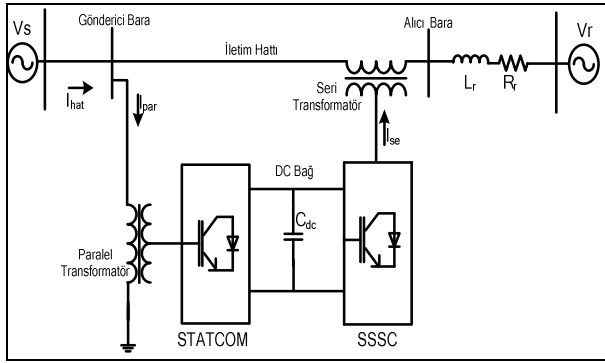
Elektrik iletim hatlarında güç akışının kontrolü ve optimizasyonu için geliştirilen, FACTS ailesi üyelerinden UPFC, sahip olduğu özellikler bakımından ön plana çıkmaktadır [3]. UPFC, iletim hattına seri olarak bağlanan Statik Seri Senkron Kompansatör (SSSC), paralel olarak bağlanan Statik Senkron Kompansatör (STATCOM) ile doğru akım (DA) bağ yardımı ile birleşmesinden oluşmaktadır. İletim hattının aktif/reaktif güç kontrolünü yapabilmekle birlikte UPFC, iletim hattına bağlandığı baranın gerilim kontrolünü de gerçekleştirmektedir [4]. Literatürde yapılan çalışmalarda, farklı kontrol mekanizmaları geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu kontrolcülerin içinde bulanık mantık kontrolcü (FLC) yeni bir bakış açısı getirmiştir. UPFC için yeni bulanık mantık çıkarım sistemi matrisel formda önerilmiş ve aktif/reaktif gücün dinamik kontrolünü geliştirmek amacıyla kullanılmıştır [5]. Mamdani metoduna dayalı iki adet FLC kullanılmıştır. Kullanılan kontrolcülerden biri oransal FLC (PF-UPFC), diğeri hibrit FLC' dür (HF-UPFC) [3]. UPFC için uygun konum seçimi için çalışma yapılmıştır. Sistem, olasılık sıralamasını değerlendirmek için birleşik ölçüt tabanlı FLC kullanılmıştır [6]. Kontrol mekanizmasında güç geribildirimli kontrol şeması kullanılmıştır [7]. Güç dalgalanmaları kolaylıkla bastırılmış ve çeşitli zaman sabitleriyle reaktif güç değeri mümkün

olduğunca minimum değere çekilmiştir. Ancak aktif gücün değerinde bir değişim olmamıştır. UPFC'nin kontrol mekanizmasında değişken aralıklı FLC kullanılmıştır [8]. Üç faz hata durum çalışmasında hem aktif güç hem de bara geriliminde yüksek değerlerde aşmalar olmuştur. Simülasyon sonuçlarında, aktif gücün değerinde artış olmakla birlikte reaktif güç değerinde azalma yönünde bir değişim olmamıştır. UPFC'nin performansı üç farklı kontrolcü kullanılarak gözlemlenmiştir [9]. Simülasyon sonuçlarında, aktif gücün akış yönünün değişmesi kolaylıkla sağlamış, ancak sistemde reaktif güç akışı olmadığından, reaktif güç sıfır değerde kalmıştır. Darbe Genişlik Modülasyon (PWM) tabanlı UPFC'nin performansı incelenmiştir [10]. Durum çalışmaları sonuçlarında, düşük bara gerilim değerinden, aktif/reaktif güçlerde büyük oranlarda değişim olmuştur.

Bu çalışmada, P, PI ve FLC kontrolcülere dayalı farklı kontrol mekanizmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrol mekanizmaları kullanılarak oluşturulan sistem, değişik durumlar çalışmaları altında incelenmiştir. Oluşturulan bulanık mantık modelinin karar alma mekanizmasında "Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi" metodu kullanılmış ve durulaştırma sürecinde "Mamdani modelinin" özel bir durumu olan "ortalama ağırlık metodu" kullanılmıştır [11-12]. Bulanık mantık modelinin oluşturulması ve çalışma durumlarının sonuçlarının elde edilmesinde PSCAD/EMTDC simülasyon programı kullanılmıştır [13].

2. Sisteminin Modellemesi

UPFC iletim hattına paralel olarak bağlanan STATCOM ve seri olarak bağlanan SSSC'nin doğru akım (DA) bağ yardımı ile birleşimlerinden oluşmaktadır. Yapısal olarak UPFC, iki adet üç faz çeviricinin DC kapasitör yardımı ile arka arkaya birleşimleriyle meydana gelmektedir. Çeviriciler kuplaj transformatörler yardımı ile paralel ve seri olarak iletim hattına bağlanmaktadır. DA kapasitörün bağlandığı ortak bağ yardımı ile STATCOM'un çıkış terminali ile SSSC'nin giriş terminali arasında çift yönlü aktif güç akışı gerçekleşmektedir. UPFC'nin temel yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

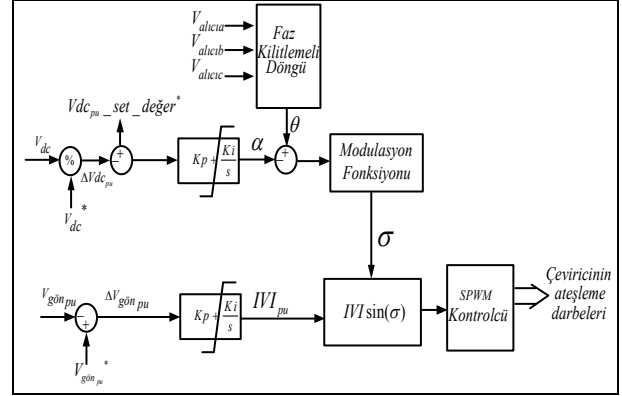


Şekil 1: UPFC sisteminin temel şeması

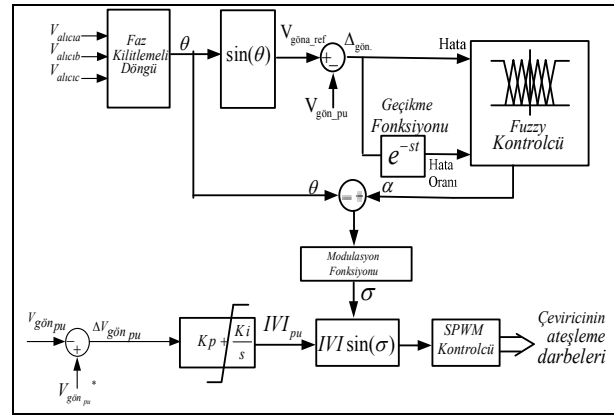
2.1.1. Paralel çeviricinin kontrol mekanizması

Paralel çevirici, UPFC sisteminin çalışmasında önemli rol oynamaktadır. Bununla birlikte yerine getirmesi gereken görevler bakımından STATCOM ile benzerlik göstermektedir [14]. Paralel çevirici tarafından iletim hattından kontrollü akım çekilmektedir. Böylelikle, çeviricilerdeki kayıplar ve seri çeviricinin gereksinim duyduğu aktif güç sağlanmış

olmaktadır. Böylelikle, çekilen aktif güç ekstra elektrik enerji kaynağı olmaksızın gerekli aktif/reaktif seri kompanzasyonu bağımsız olarak sağlayabilmektedir [15]. Paralel çeviricinin, yaygın olarak kullanılan kontrolcülerden PI ve bulanık mantık kontrolcüyeye dayalı geliştirilen kontrol mekanizmaları Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir.



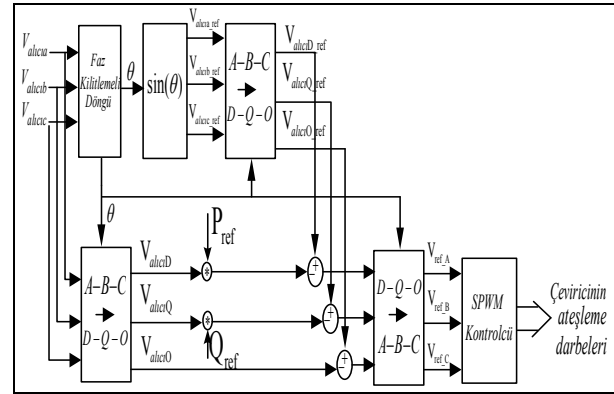
Şekil 2: PI kontrolcü tabanlı kontrol mekanizması



Şekil 3: FLC tabanlı kontrol mekanizması

2.1.2. Seri çeviricinin kontrol mekanizması

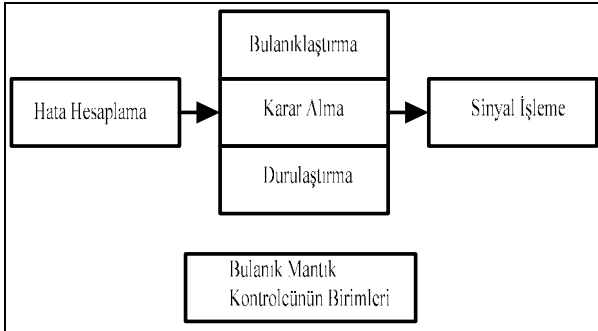
UPFC'nin temel fonksiyonu olan iletim hatlarındaki güç akışının kontrolü, seri çevirici tarafından seri olarak iletim hattına enjekte edilen gerilimin genliği ve faz açısı değiştirilerek yerine getirilmektedir [16]. Böylelikle, iletim hatlarında aktif/reaktif güç akışının kontrolü kolaylıkla yapılabilmektedir. Seri çevirici için geliştirilen kontrol mekanizması Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4: Seri çeviricinin kontrol mekanizması

3. FLC' nin UPFC' ye Uygulanması

FACTS cihazlarının kontrol mekanizmaları, matematiksel modellenmeleri açısından karmaşık bir işlem sürecine sahiptir. Bulanık mantık (FL) kontrol teorisi bu konuya yeni bir bakış açısı getirmiştir. Bulanık mantık, kontrol problemlerinin çözümlerinde, kontrol edilmek istenen sistemi matematiksel modellemekten daha çok “Eğer ($x_1=P$) ve ($x_2=S$) ise o halde ($y=S$)” dayalı, daha basit kurallarla problemi ilişkilendirerek çözmeye çalışır. Bu kurallar, kişilerin sistem hakkında bilgi ve deneyimlerini göz önüne alınarak tanımlanır. Kuralların doğru tespit edilmesi, sistemin performansı artırmaktadır. Her kural, FLC' nin fonksiyonu olan bir üyelikle tanımlar. Üyelik fonksiyon sayısının artırılması, kontrol mekanizmasındaki hassasiyetin artırılmasını sağlayacaktır [17-18]. Oluşturulan FLC' nin kontrol mekanizmasında hassasiyetin artması hedeflenerek sisteme hata ve hata oranı için giriş olarak 7 üyelik fonksiyonu atanmıştır. Böylelikle, FLC 49 kuraldan oluşmuştur. Genel olarak FLC, üç bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler Şekil 5’de gösterilmiştir ve alt başlıklarla açıklanmıştır.



Şekil 5: Bulanık mantık kontrolcüsü sisteminin birimleri

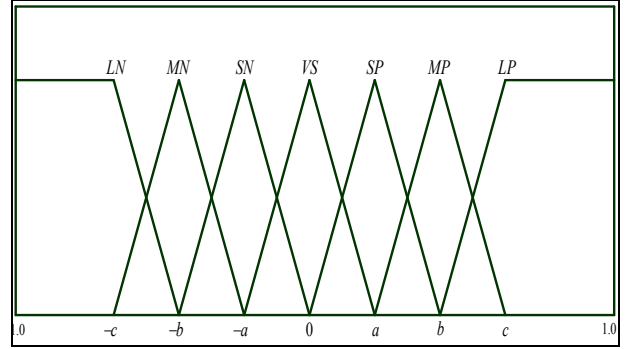
Hata Hesaplama: Kaynak geriliminin her bir fazından ölçülen sinyaller, birim değere (pu.) çevrilir. Kaynak gerilimin değeri ile faz kilitlemeli döngüden (PLL) elde edilen referans değeri arasındaki farktan hata (err_A) sinyali elde edilir. Hata oranı (Δerr_A), anlık hata ile hatanın bir önceki örnekleme arasındaki farktan oluşmaktadır. A fazı için hata ve hata oranı aşağıdaki denklemler kullanılarak elde edilir.

$$err_A = V_{\sin(\theta)_{pu}} - V_{gön_{pu}} \quad (1)$$

$$\Delta err_A = err_A(n) - err_A(n-1) \quad (2)$$

$V_{\sin(\theta)_{pu}}$: PLL'den elde edilen A fazına ait referans gerilim değeri. $V_{gön_{pu}}$: gönderici kısmın A fazına ait anlık gerilim değeri, n : örnekleme zamanı.

Bulanıklaştırma: Nümerik olarak ölçülen giriş değişkenleri bulanıklaştırma sürecinde dilsel değişkenlere çevrilir. Bu çalışmada, hata ve hata oranı için kullanılan sözel değişkenleri Şekil 6’ da gösterilmiştir.



Şekil 6: Hata ve hata oranında kullanılan sözel değişkenler

Karar Alma: Oluşturulan bulanık mantık kontrolcüsünün karar alma mekanizmasında “Sugeno Bulanık Çıkarım” sistemi kullanılmış. Sugeno sisteminde, I_{th} kural, aşağıda verilen denklemlerden yararlanılarak elde edilmiştir [11].

$$L^{(I)} : \text{If } x_1 \text{ is } F_1^I \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^I, \text{ then} \quad (3)$$

$$y^I = c_0^I + c_1^I x_1 + c_2^I x_2 + \dots + c_n^I x_n \quad (4)$$

F_i^I : I_{th} bulanık mantık terimi, c_i^I : gerçek değerli parametre terimleri, Y_L : I_{th} kurala bağlı olarak alınan çıkış değeri, $X_1, \dots, X_N$: gerçek değerli giriş terimleri.

Bulanık mantık sisteminde, giriş değerleri “Eğer ($x_1=P$) ve ($x_2=S$) ise o halde ($y=S$)” biçiminde kurallar oluşturularak belirlenir. Belirlenen giriş değişkenleri sözel değişkenlere atanır. Çalışmada kullanılan sözel değişkenlere değişkenleri örnek olarak sıfır (Z), büyük negatif (LN), orta negatif (MN), küçük negatif (SN), küçük pozitif (SP), orta pozitif (MP) ve büyük pozitif (LP) verilebilir.

Bulanık mantık kontrolcüsünde, giriş değerleri ile çıkış değerleri arasındaki ilişkilendirilme Sugeno Bulanık Çıkarım sistemi kullanılarak sağlanılmıştır. Çıkış değerleri üyelik fonksiyonu olarak tanımlanmış ve sözel değişkenler olarak ifade edilmiştir. Çıkış değişkeni olarak atanan sözel değişkenlere, sıfır (Z), negatif büyük (NB), negatif orta (NM), negatif küçük (NS), pozitif küçük (PS), pozitif orta (PM) ve pozitif büyük (PB) değişkenleri örnek verilebilir. Çıkış değişkenleri üyelik fonksiyonlarının kullanımı ve karar alma tablosu Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1: FLC' nin karar alma tablosu

Hata Oranı /Hata	LP	MP	SP	VS	SN	MN	LN
LP	PB ¹	PB ²	PB ³	PM ⁴	PM ⁵	PS ⁶	Z ⁷
MP	PB ⁸	PB ⁹	PM ¹⁰	PM ¹¹	PS ¹²	Z ¹³	NS ¹⁴
SP	PB ¹⁵	PM ¹⁶	PM ¹⁷	PS ¹⁸	Z ¹⁹	NS ²⁰	NM ²¹
VS	PM ²²	PM ²³	PS ²⁴	Z ²⁵	NS ²⁶	NM ²⁷	NB ²⁸
SN	PM ²⁹	PS ³⁰	Z ³¹	NS ³²	NM ³³	NM ³⁴	NB ³⁵
MN	PS ³⁶	Z ³⁷	NS ³⁸	NM ³⁹	NM ⁴⁰	NB ⁴¹	NB ⁴²
LN	Z ⁴³	NS ⁴⁴	NM ⁴⁵	NM ⁴⁶	NB ⁴⁷	NB ⁴⁸	NB ⁴⁹

Durulaştırma: Sözel değişkenlerle temsil edilen kontrolcü çıkışları gerçek sinyallere durulaştırma sürecinde çevrilir. Çalışmada, bu süreç için Mamdani modelinin özel bir durumu olan “Sugeno Ağırlık Ortalama” metodu seçilmiştir [12]. Durulaştırma, aşağıdaki denklemler kullanılarak gerçekleştirilir.

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M w^l y^l}{\sum_{l=1}^M w^l} \quad (5)$$

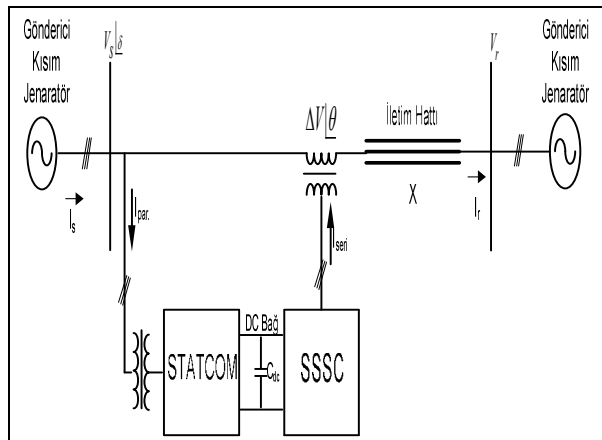
$$w^l = \prod_{i=1}^n M_{F_i^l}(x_i) \quad (6)$$

$w^l : L^{(1)}$ ’ninci kuralın tüm değerleri, $M_{F_i^l}$: sözel değişken (F_i^l) olarak tanımlanan üyelik fonksiyonu.

Sinyal işleme: Kontrol sinyalleri bulanıklaştırma, karar alma ve durulaştırma süreçleri sonucunda üretilmektedir. Üretilen sinyaller Sinüzoidal Darbe-Genişlik-Modülasyon (SPWM) tekniği kullanılarak çeviricilerde bulunan IGBT’ler için anahtarlama sinyalleri üretilir. SPWM tekniği kullanılarak çeviriciler için anahtarlama sinyallerinin üretilmesi Şekil 2’ de ve Şekil 3’ de gösterilmiştir.

4. Durum Çalışmaları

Bulanık mantık modelinin oluşturulması ve durum çalışmalarının sonuçlarının elde edilmesinde PSCAD/EMTDC simülasyon programı kullanılmıştır. UPFC sisteminin ileriki çalışmalarda laboratuvar ortamında uygulanabilirliği açısından sistemin parametreleri düşük değerlerde seçilmiştir. Test sisteminin şeması Şekil 7’ de ve sistem parametreleri Ek 1’de verilmiştir.



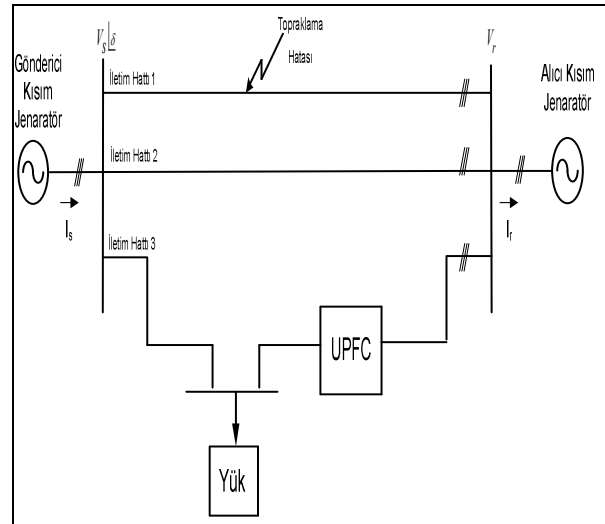
Şekil 7: Durum (1) çalışması için test sistemi

Test sisteminde gönderici ve alıcı kısım olarak isimlendirilen iki kaynak jeneratörü kullanılmış ve UPFC gönderici kısmına bağlanmıştır. P, PI ve FLC tabanlı kontrol mekanizmalarına sahip UPFC’ nin performansı, her model için iki durum çalışması oluşturularak test edilmiştir. İlk durum çalışmasında, alıcı kısım jeneratörü gönderici kısım jeneratörüne göre çeşitli faz açılarda geciktirilmiş ve UPFC’ nin sistemde bağlı bulunup ve bulunmaması durumlarına göre aktif ve reaktif güç değerleri karşılaştırılmıştır.. Sonuçlar Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2: Farklı faz değerlerine göre iletim hattındaki güç değerleri.

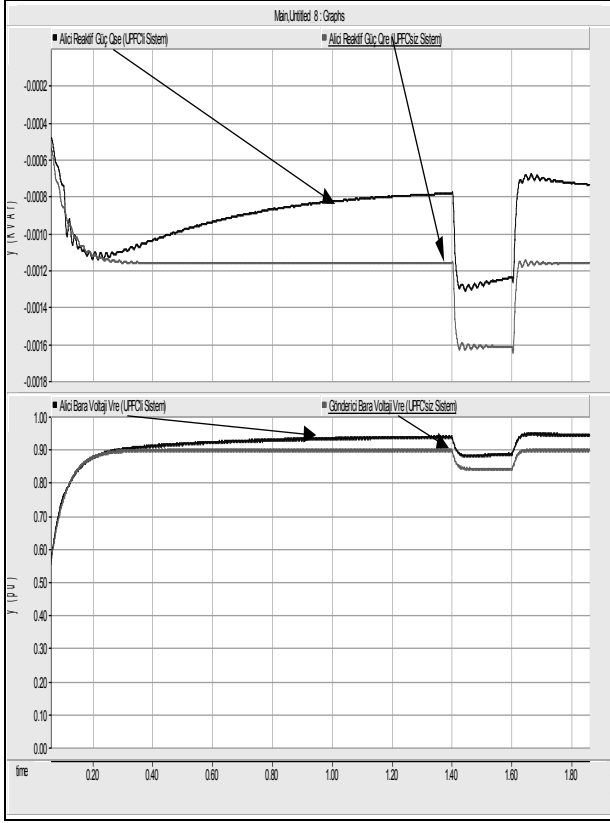
Gönderici Kısım Jeneratörün faz aç değerleri (°)		60°	40°	30°	15°
UPFC’ siz Sistem	P(KW)	3.44	2.67	2.11	1.11
	Q(KVAR)	-1.4	-0.97	-0.72	-0.34
P Kontrolcü Tabanlı UPFC’ li Sistem	P(KW)	4.00	2.95	2.29	1.21
	Q(KVAR)	-0.62	-0.42	-0.37	-0.036
PI Kontrolcü Tabanlı UPFC’ li Sistem	P(KW)	4.14	3.09	2.43	1.37
	Q(KVAR)	-0.42	-0.15	-0.09	0.04
FLC Tabanlı UPFC’ li Sistem	P(KW)	4.33	3.14	3.14	1.41
	Q(KVAR)	-0.07	-0.08	-0.08	0.07

İkinci durum çalışmasında, birden fazla baralı bir sisteme üç faz topraklama hatası uygulanarak, UPFC’ nin; hata durumundaki reaktif güce ve bağlı bulunduğu bara gerilimine etkisi incelenmiştir. İkinci durum çalışmasında hatanın uygulandığı test sistemi Şekil 8’de verilmiştir.

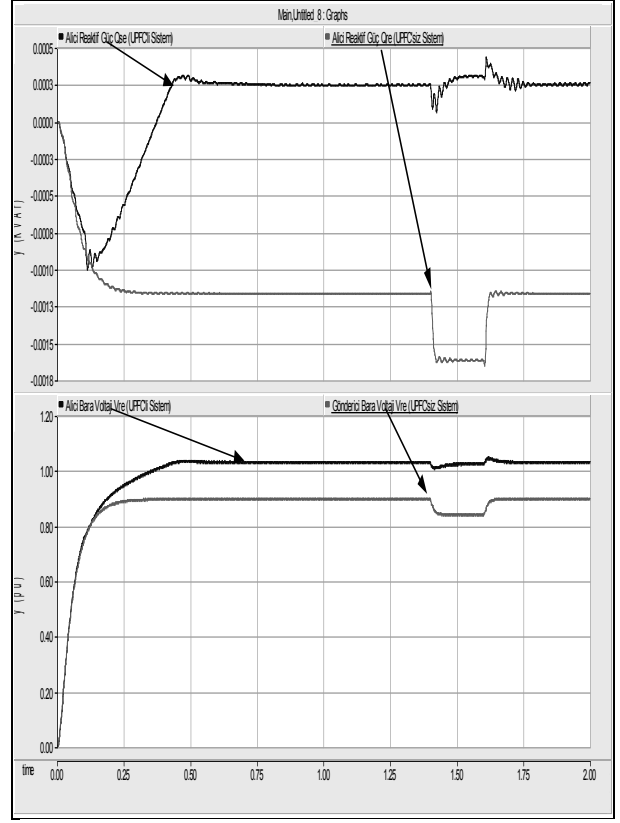


Şekil 8: Durum (2) çalışması için test sistemi

UPFC’ nin iletim hattında bulunup bulunmaması durumlarına göre, P, PI ve FLC kontrolcülere sahip kontrol mekanizmaların hata esnasında reaktif güce ve bağlı bulunduğu bara gerilimine etkisi grafiksel olarak Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 9. P kontrolcülü UPFC 'nin 2. durum çalışması sonuçları.



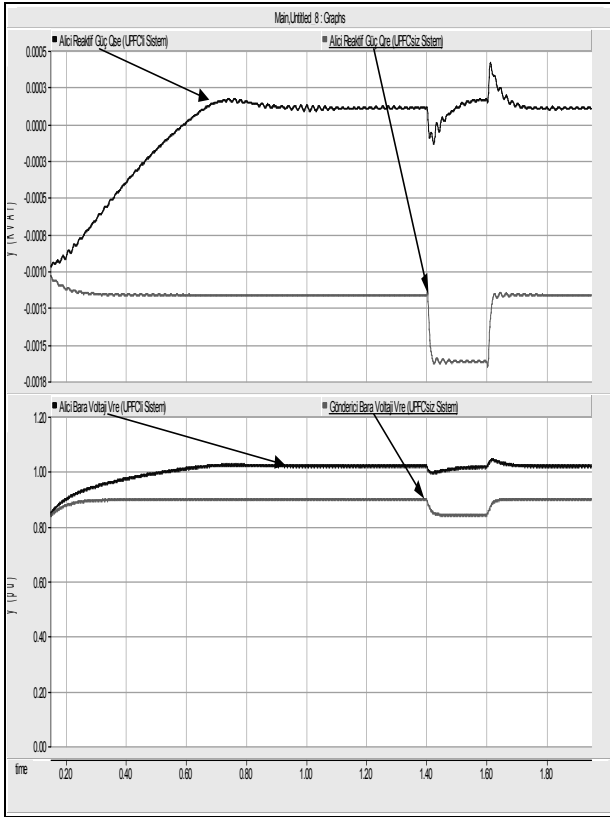
Şekil 11. FL kontrolcülü UPFC 'nin 2. durum çalışması sonuçları

5. Sonuçlar

Bu çalışmada P, PI ve FLC kontrolcülerin kullanıldığı farklı kontrol mekanizmaların, UPFC'nin iletim hatlarındaki aktif/reaktif güç akışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarında, UPFC'nin geçici ve normal koşullarda iletim sisteminin performansını artırdığı görülmüştür. Çalışma kapsamında geliştirilen UPFC modelinin testi için iki durum çalışması uygulanmıştır. İlk durum çalışmasına göre FLC'ye sahip kontrol mekanizması, P ve PI kontrolcülerine sahip kontrol mekanizmalardan daha iyi performans sergilemiştir. Durum çalışmalarından alınan sonuçlara göre iletim hattındaki aktif güçte artış olduğu, reaktif güçte ise azalma olduğu gözlemlenmiştir.

İkinci durum çalışmasında, iletim sistemine uygulanan hata esnasında UPFC tarafından hem reaktif güç hem de bara gerilimi nominal değerde tutulmaya çalışılmıştır. Durum çalışmalarından alınan sonuçlara göre, P kontrolcüyeye sahip kontrol mekanizmasında iyi sonuç elde edilmezken, PI ve FLC kontrolcülerine sahip kontrol mekanizması daha iyi ve birbirleriyle benzer sonuçlar elde etmiştir. Ancak FLC kontrolcülü sistem, hata esnasında oluşan aşırı gerilim ve reaktif yükselmelerin daha az olduğu görülmüştür.

UPFC'nin iletim hattının güç akışı üzerindeki önemli etkisi durum çalışmalarının sonuçlarında görülmektedir. Bunun yanı sıra bulanık mantık kontrolcünün durum çalışmalarında daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Çalışmada, P ve FLC kontrolcülerini oluşturularak PSCAD/EMTDC programının ana kütüphanesine eklenmiş ve UPFC modelinde kullanılmıştır.



Şekil 10. PI kontrolcülü UPFC 'nin 2. durum çalışması sonuçları

Ek 1

Alıcı ve gönderici jeneratörlerin tekniksel detayları:

Güç MVA (3-faz)	: 0.01 [MVA]
Gerilim (faz-faz)	: 0.380 [kV]
Frekans	: 50.0 [Hz]
Faz açısı	: 0.0 [°]

Paralel kuplaj transformatörün tekniksel detayları:

Güç MVA (3-faz)	: 0.003 [MVA]
Primer gerilimi (faz-faz)	: 0.380 [kV]
Sekonder gerilimi (faz-faz)	: 0.040 [kV]
Frekans	: 50.0 [Hz]

Seri kuplaj transformatörün tekniksel detayları:

Güç MVA (3-faz)	: 0.003 [MVA]
Primer gerilimi (faz-faz)	: 0.110 [kV]
Sekonder gerilimi (faz-faz)	: 0.110 [kV]
Frekans	: 50.0 [Hz]

Sistem parametreleri:

V_{dc}	: 0.042 [kV]
C_{dc}	: 20 mF
R_r	: 4 Ω
L_r	: 10 mH

V_{dc} gerilim kontrolcüsü (PI) parametreleri:

K_p	: 4.6
K_i	: 0.0001

Bara gerilim kontrolcüsü (PI) parametreleri:

K_p	: 4.05
K_i	: 0.005

Kaynaklar

- [1] Aggarwal R.K., Wang, H.F. and Zhou X.Y., "Detailed modeling and simulation of UPFC using EMT", Universities Power Engineering Conference, UPEC 2004. 39th International, Volume 1, Page(s):256 - 260 Vol. 1, 6-8 Sept. 2004.
- [2] Jons Allan T. and Song Yong H., "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", IEE Power and Energy Series 30, 1999.
- [3] Aboreshaid S., Eldamaty A.A. and Faried S.O., "Damping power system oscillations using a fuzzy logic based unified power flow controller", Electrical and Computer Engineering, 2005. Page(s):1950 - 1953 Digital Object Identifier 10.1109/CCECE.2005.1557364, Canadian Conference, 1-4 May 2005.
- [4] Jayaram S., Kannan S. and Salama M.M.A., "Real and reactive power coordination for a unified power flow controller", Power Systems, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 3, and Page: 1454 - 1461 Digital Object Identifier 10.1109 / TPWRS. 2004.831690, Aug. 2004.
- [5] Alves R. and Orizondo R., "UPFC Simulation and Control Using the ATP/EMTP and MATLAB/Simulink Programs", Transmission & Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES, Page(s):1 - 7 Digital Object Identifier 10.1109/TDCLA.2006.311458, Aug. 2006.
- [6] Jenkins L., Thukaram D. and Visakha K., "Improvement of system security with unified-power-flow controller at suitable locations under network contingencies of interconnected systems", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-Volume 152, Issue 5, Page(s):682 - 690 Digital Object Identifier 10.1049/ip-gtd:20045235, 9 Sept. 2005.
- [7] Akagi H., Fujita H. and Watanabe Y., "Control and analysis of a unified power flow controller", Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 14, Issue 6, Page(s):1021 - 1027 Digital Object Identifier 10.1109/63.803395, Nov. 1999.
- [8] Hou Li, Lu Baochun, Li Baoguo and Liu Yi, "A New Unified Power Flow Fuzzy Control Method", Innovative Computing, Information and Control, 2007. ICICIC '07. Second International Conference, Page(s): 479 - 479 Digital Object Identifier 10.1109 /ICICIC.2007.57, 5-7 Sept. 2007.
- [9] Qing Yu, Norum L., Round S. and Undeland T., "Investigation of dynamic controllers for a unified power flow controller", Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996, Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on Volume 3, Page(s):1764-1769 vol.3 Digital Object Identifier 10.1109 /IECON.1996.570729, 5-10 Aug. 1996.
- [10] Kadir Abdul A.F., Mustafa M.W. and Mohd A.A. Zin, "Steady state analysis of power transmission using unified power flow controller", Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002, Asia Pacific. IEEE/PES Volume 3, Page(s):2049 - 2053 vol.3 Digital Object Identifier 10.1109/TDC. 2002.1177776, 6-10 Oct. 2002.
- [11] Sugeno M. and Takagi T., "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control." IEEE Transaction on Systems, Man and Sybern, 1: 116-132, 1985.
- [12] Ross Timothy J., "Fuzzy Logic with engineering application", ISBN 0-07-053917-0.
- [13] Visual Power System Simulation, <http://www.pscad.com>
- [14] Gao Yanli, Kang Yong, Liu Xiaoyuan, Liu Liming, Zhang Yonggao and Zhu Pengcheng, "Double closed loop control and analysis for shunt inverter of UPFC", Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on Volume 2, Page(s):1118 - 1123 Vol. 2, 27-29 Sept. 2005.
- [15] Chen Jian, Kang Yong, Liu Liming and Zhu Pengcheng, "Design and dynamic performance analysis of a unified power flow controller", Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 32nd Annual Conference of IEEE. 2005 Page(s):6 pp. Digital Object Identifier 10.1109/IECON.2005.1569093, 6-10 Nov.
- [16] Papic I., Povh D., Weinhold M. and Zunko P., "Basic control of unified power flow controller", Power Systems, IEEE Transactions on Volume 12, Issue 4, Page(s):1734 - 1739 Digital Object Identifier 10.1109/59.627884, Nov. 1997.
- [17] Chung C.Y., Chung T.S., Fang D.Z. and Xiaodong Yang, "Development of adaptive UPFC supplementary fuzzy controller for power system stability enhancement", Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004. (DRPT 2004). Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Volume 1, Page(s):216 - 221 Vol.1, 5-8 April 2004.
- [18] Lu-Sheng Ge, Sheng Liu and Yu-Lin Wang, "Research on Flexible Power Supply System for Arc Furnace Based on UPFC", Industrial Electronics and Applications, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference, Page(s):227-230 Digital Object Identifier 10.1109/ICIEA.2007.4318404, 23-25 May 2007.