



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Dinamik Gerilim Kararlılığına Etkileri

Salih TOSUN^{a,*}, Ali ÖZTÜRK^b

^a Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^b Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: salihotosun@duzce.edu.tr

ÖZET

Günümüzde elektrik enerjisine olan talebin sürekli artması ve gelişen teknoloji ile birlikte güç sisteminde yapısal değişiklikler olmaktadır. Ayrıca güç sistemleri üzerinde sürekli değişiklikler olmaktadır. Bu değişiklikler, ilave sistemler olduğu gibi ek cihazlar bakımından da olmaktadır. Bu durumda sistemin yapısı değiştiği için kararlılık değerleri de değişebilmektedir. Oysa güç sisteminin dengeli bir çalışma durumunda olması ve bozucu bir etki sonrası tekrar eski haline dönmesi istenir. Bunun sonucunda, gerilim kararlılığı ve gerilim çökmesi olayları güç sistemlerinin kararlı ve güvenilir olarak işletilmesi konusunu ortaya çıkarmıştır. Güç sisteminin kararlılık sınırlarının tespiti açısından bu analizler önemlidir.

Bu çalışmada, Faz Kaydırıcı Transformatör (FKT), IEEE'nin 6 baralı güç sistemine ilave edilerek analizler yapılmıştır. İlk olarak sistemde yük akışı yapılarak FKT'nin etkileri incelenmiştir. Daha sonra sürekli yük akışı yapılarak sistemin kararlılık sınırları belirlenmiştir. Son olarak ise güç sistemlerinde istenmeyen bir durum olan kısa devre oluşturularak FKT'nin çeşitli faz açılarındaki etkileri araştırılmıştır. Analizler, Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ile gerçekleştirilmiştir. Yük akışı sonucunda, FKT'nin faz açısı değiştirilerek hatlar arası akan gücün değeri ve yönü kontrol altına alınabileceği bu sistemde üzerinde gösterilmiştir. Ayrıca FKT'nin kayıplar üzerinde de etkili olduğu görülmüştür. Sürekli yük akışında sonucunda sistemden yük baralarından çekilebilecek maksimum gücün ve baraların kritik gerilim değerlerinin de benzer şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Son olarak FKT'nin bağlandığı barada arıza oluşturulup bu arıza belli bir zaman sonra temizlenmiştir. Arıza sonrası bara gerilimleri yaklaşık olarak kendi değerlerine dönmelerine rağmen tüm bara gerilimlerinde dalgalanmalar gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güç Sistemi, Yük Akışı, Gerilim Kararlılığı, Faz Kaydırıcı Transformatörler

Effects of Phase Shifting Transformers on Dynamic Voltage Stability

ABSTRACT

Today, there is constant increase in demand for electricity and structural changes in the power system with developing technology. There are constant changes in power systems. These changes are in the form of

additional systems as well as additional devices. In this case, the stability values can change as the structure of the system changes. However, it is desired that the power system be in a balanced operating state and return to its original state after a disruptive effect. As a result, the stability of voltage and the phenomenon of voltage collapse have led to the steady and reliable operation of power systems. These analyzes are important for determining the stability limits of the power system.

In this study, the Phase Shifting Transformer (PST) was analyzed by adding to IEEE 6-bus power system. Firstly, the effects of PST were investigated by performing a load flow in the system. The stability limits of the system were determined by continuous load flow. Finally, unwanted short circuits are created in the power systems and the effects of various phases of the PST are investigated. Analizler, Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ile gerçekleştirilmiştir. It has been observed on this system that the value and direction of the flowing power can be controlled by changing the phase value of the PST as a result of the load flow. It has also been shown that PST is also effective on losses. It has been observed that the maximum power that can be withdrawn from the load bus from the system as a result of continuous load flow and the critical voltage values of the buses change in a similar way. Finally, a fault was created in the bus that the PST was connected to and this device was cleaned after a certain time. After the fault, the bus voltages have returned to their respective values, but fluctuations in all bus voltages have been observed.

Keywords: Power System, Load Flow, Voltage Stability, Phase Shifting Transformers

I. GİRİŞ

Gelişen teknolojiye bağlı olarak elektrik tüketimindeki artış ve elektrik enerjisinin kullanımındaki dengesizlikler güç sistemini etkilemektedir. Bunun sonucu olarak güç sisteminin çalışma şartlarının daha iyi hale getirilmesi ve sistemde yapısal değişiklikler yapmak gerekmektedir. Güç sistemlerinin oluşturulmasında dağıtım ve iletim kademesinde dengelemeler veya kararlılık, genellikle generatörlerin güç üretimi üzerinden yapılmaktadır. Ancak son zamanlarda var olan güç sistemi üzerine yeni sistemler eklenerek sistemin kararlılığı artırılmıştır [1]. Diğer yandan elektrik dağıtım sektörünün serbest ekonomi piyasasına geçmesi güç sistemlerini de önemli derecede etkilemiştir. Piyasa şartlarında üreticiler ve tüketiciler farklı ülkelerde olabilir. Bu durum ülkeler arasında kontrolsüz güç akışına neden olabilir [2]. Bu kontrol edilemeyen yük akışından dolayı enerji iletim hatları aşırı yüklenebilirler. Bu durum aslında iletim hatlarının empedansları (omik direnç ve endüktif reaktans) ile ilişkilidir [3]. Kontrolsüz yük akışı ve haddinden fazla yüklenme sorunlarından dolayı sistemdeki aktif güç kontrol edilmelidir. FKT'ler bu gibi problemlerin çözümü için uygun elemanlardan biridir [2]. İlave olarak enerji iletim hatlarından fazla güç taşıyabilmek için de FKT'ler kullanılabilir [4.] FKT'ler bazı ülkelerde uygulanmakta veya planlanıp uygulama aşamasına gelmiştir. Bunun sonucu olarak güç sistemlerindeki iletim hatlarının güç yoğunluğu azaltılmakta veya çalışma seviyelerinde çalıştırmaktadırlar [5-8].

FKT uygulamaları bakımından, Kuzey Afrika'da Tunus- Cezayir sınır bölgesinde bulunan yüksek gerilim iletim hattında gerilim bakımından iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmaya göre güç akışı konusunda iyileştirmeler alınırken gerilim konusunda yeterince verim elde edilememiştir [9]. Diğer bir çalışmada ise FKT'lerin optimal yerleştirilme konusu ele alınmıştır. Yapılan benzetim çalışmalar ile IEEE'nin 24, 118 ve 300 baralı sistemlere ilave olarak 904 baralı güç sistemine uygulanmış ve belli sonuçlar elde edilmiştir [10]. Yapılan başka bir çalışmada optimal yük akışı ile FKT'ler aynı anada kullanılarak güç sisteminin güvenilirlik değerleri incelenmiştir. Farklı bir

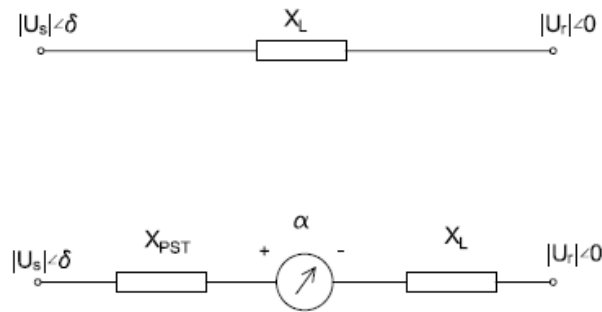
araştırmada ise güç sisteminin sürekli çalışma durumlarında iletim hatlarının aşırı yüklenmesi kontrol edilmiştir [11]. Belçika’da yapılan çalışmada iletim operatörü, güç sistemi üzerine “smart”(akıllı) cihazlar kullanılarak güç akış kontrol çalışmaları yapılmıştır. Sistemde güç akışı, yeni iletim hatları kurulmasına gerek duyulmadan esnek bir şekilde yönetilmiştir [12]. Meksika ile Kaliforniya arasındaki güç sistemi üzerine faz kaydırma sınırları -180 den +180 derece olan FKT’ler bağlanarak geçici durum ve kararlılık analizi yapılmıştır. Bu çalışmada, 132MVAr reaktif güç tüketimi sırasında da sistemin kararlılığını sürdürdüğü tespit edilmiştir [13]. Diğer bir çalışmada FKT, uzun iletim hatlarına sahip güç sistemlerindeki yüksek ve düşük gerilim genliklerinin yok edilmesinde kullanılabileceği gösterilmiştir. Ancak bu durumda faz açısının dikkatle seçilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır [14].

Yapılan bu çalışmada analizler IEEE’nin 6 baralı test sistemi üzerinde yapılmıştır. Sisteme FKT ilave edilerek sistem yeniden düzenlenmiştir. Güç sisteminde, yük akışı, sürekli yük akışı analizi ve dinamik analiz, Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ile gerçekleştirilmiştir. Güç sistemlerinde istenmeyen durumlar olan kısa devre ve hat açması şeklinde çeşitli senaryolar oluşturularak güç sisteminin dinamik gerilim kararlılık analizleri yapılmıştır.

II. MATERYAL VE METOD

A. FAZ KAYDIRICI TRANSFORMATÖRLER (FKT)

FKT, iletim hattı üzerinde faz açısını değiştirerek güç akışı kontrolünü sağlamaya yarayan farklı tip transformatörlerdir. Trafonun faz açısı, devresindeki özel sargılar ile çıkış gerilimi, giriş geriliminden farklı fazda oluşur. Bu şekilde, güç sistemine değişik faz açısına sahip gerilim uygulamış gibi olur. Bu durumda FKT’ler, güç sistemleri iletim hatlarında güç akış yönünü belirlemek için de kullanılabilirler [15]. Bunun sonucunda FKT’nin birinci görevi olarak; faz açısını değiştirerek enerji iletim hattı üzerinde akan gücü veya yükü kontrol etmektir. Bu faz kaydırma operasyonu, hattın faz geriliminin değiştirilebilir bir gerilim ilave edilerek veya çıkarılarak yapılmış olur. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğeri devresi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Enerji iletim hattının FKT’li ve FKT’siz hat modeli [2]

Şekil 1’de ifade edilen, U_s ve U_r verici ve alıcı ucundaki gerilimin genlik değerleridir. δ ise güç açısının değeridir. α açısı ise FKT’un açısıdır. X_L hattın seri reaktansı ve X_{PST} ise sisteme bağlanan FKT’ün kaçak reaktansını temsil etmekte ve iletim hattına seri olarak bağlanmaktadır. Böylece enerji iletim hattı üzerinden taşınan aktif ve reaktif güç eşitlikleri Denklem 1 ve Denklem 2’deki bağıntılarla verilmiştir.

$$P = \frac{|U_s||U_r|}{X_L} \sin\delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{|U_s||U_r|}{X_L} \left(\cos\delta - \frac{|U_r|}{|U_s|} \right) \quad (2)$$

Bu bağıntılara göre; aktif güç, verici ve alıcı uçlarındaki gerilim genlikleri ve her iki tarafın faz açısı olarak $\sin\delta$ ile doğru orantılıdır. Hattın seri reaktansına ise ters orantılıdır. Bu eşitliklerde Aktif güç, gerilimler vasıtasıyla kontrol edilebilir. Fakat bu durum reaktif güç üzerinde de büyük etki yapacağından, bu durum tercih edilmez. FKT modelinde ise reaktans, faza seri olarak bağlanması nedeniyle α açısının δ açısına ilave edilmesiyle $\sin\delta$ 'nin değeri artırılarak, hattın taşınan gücün değeri artırılır. Bu durumda faz açısı belli sınırlar içerisinde kontrol edilebileceği de unutulmamalıdır.[2]. Bunun sonucunda Eşitlik 1 değişerek Eşitlik 3'deki gibi oluşur.

$$P = \frac{|U_s||U_r|}{X_L + X_{PST}} \sin(\delta + \alpha) \quad (3)$$

B. GERİLİM KARARLILIĞI

Enerji santrallerinin tüketim merkezlerine uzaklıklarından kaynaklanan kararsızlık, gerilim kararsızlığı olarak ifade edilmektedir. Bu kararsızlık, enerji iletim hattının maksimum yüklenebilir kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir [16]. Bu gerilim kararlılığının en kolay gözlemlendiği grafikler yük barasından elde edilen P-V eğrileridir. Bu değerler kritik bara gerilim değeri olarak ifade edilir. Bu esnada yükün çektiği aktif güçte kritik güç değeri olarak ifade edilir. Gerilim değeri azaldıkça sistemin çalışması zorlaşmaktadır [17]. Gerilim kararsızlığı ve bunun sonucunda gelişen olaylar dinamik bir süreçtir. Ancak sistem ve gerilim kararlılığı dinamik olmakla birlikte statik analiz yöntemleriyle incelenmektedir [18]. Güç sisteminin kararlılık değeri olan Gerilim- Yükleme Parametresi ($V-\lambda$) ile baranın, aktif ve reaktif güç değeri arasındaki bağıntı Eşitlik 4 ve 5'de gösterilmiştir.

$$P_L = P_{L0} (1 + \lambda) \quad (4)$$

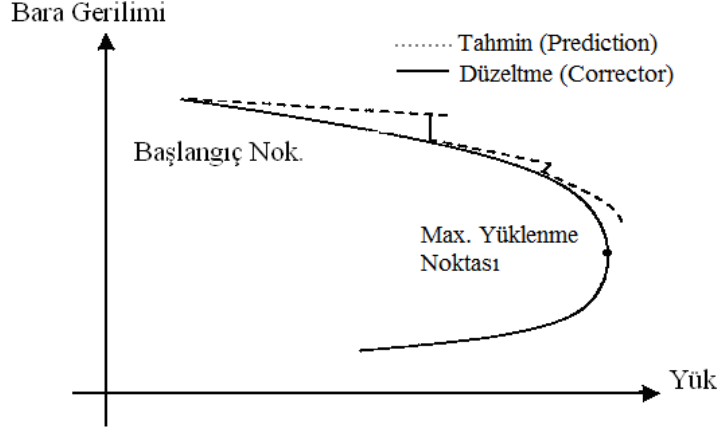
$$Q_L = Q_{L0} (1 + \lambda) \quad (5)$$

Eşitliklerde ifade edilen P_{L0} ve Q_{L0} değerleri başlangıç aktif güç ve reaktif güç değerleridir. P_L ve Q_L ise yükün aktif güç ve reaktif güç değerleridir. λ ise maksimum yüklenme parametre değerini ifade etmektedir.

C. SÜREKLİ YÜK AKIŞI

Gerilim ve maksimum yüklenme parametresi ($V-\lambda$) arasındaki ilişkiyi kurmak ve belirlemek için sürekli yük akışı yapılmalıdır. Sürekli yük akışı analizi tahmin ve düzeltme fonksiyonlarını iteratif olarak işleyen bir algoritmadır. Sürekli yük akışı tekniğinin arkasındaki temel prensip, tahmin düzeltme basamağı üzerine kurulmuştur. Şekil 2'de görüldüğü gibi tahmin basamağın, o anki çalışma noktasında teğet doğrultusu boyunca gerçekleştirilir. Düzeltme vektörü olarak da teğet doğrultusuna dik bir düzlem kullanılmıştır [19]. Bu işlemler yapılırken yük değerinin sabit olduğu kabul edilir.

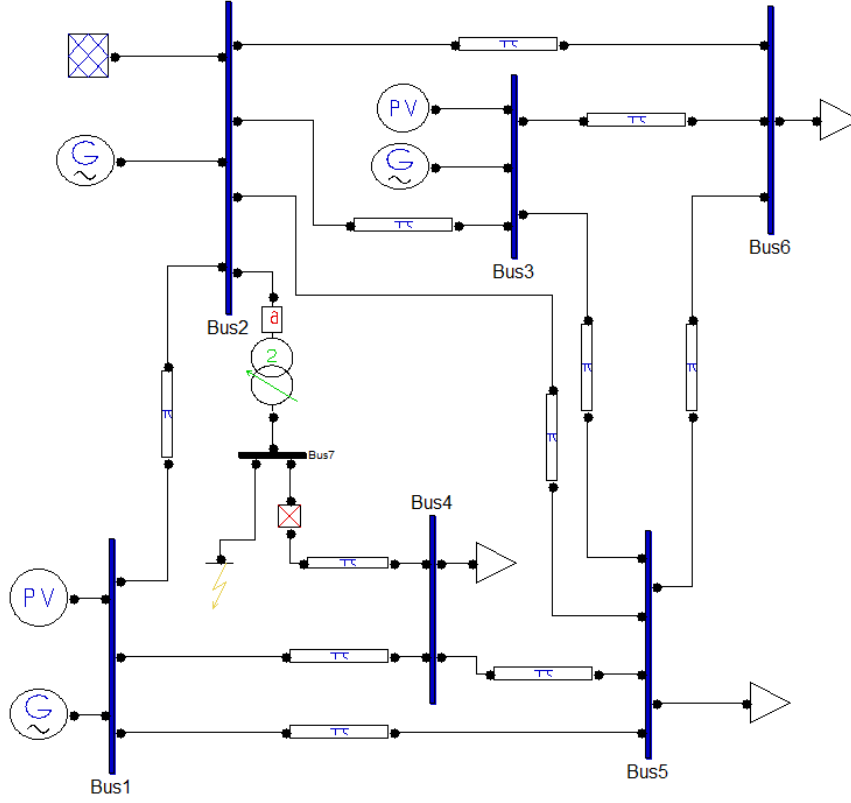
Sürekli yük akışı analizi ile belli bir sistem modeli olmaksızın belli güçlükleri çözümlenmede kolaylık sağlamaktadır. Buna ilave olarak, güç sisteminden elde edilen eşitliklerde tekil çözümlenmede gerilimi değiştirme özelliğini de gerçekleştirir. Ayrıca güç sistemindeki eşitliklerde tekil çözümlenme durumundaki olumsuz durumlara karşı gerilimi değiştirme özelliğine sahiptir.



Şekil 2. P-V eğrisi üzerinde tahmin ve düzeltme doğruları

D. BENZETİM ÇALIŞMASI

Yapılan bu çalışmada, IEEE'nin Şekil 3'de verilen 6 baralı test sistemi düzenlenerek kullanılmıştır. Sistemde yük baralarında çekilen güçler 280 MW ve 190 MVar değerindedir. Bu güçler 3 adet generatör tarafından sağlanmaktadır. FKT etkisini incelemeyi önce sistemde yük akışı yapılarak, güç bakımından en yoğun hat olarak 2 ve 4 nolu baralar arasındaki hat belirlenmiştir. Bu iki bara arasına 7. bir bara ilave edilmiştir. 7 nolu barada kısa devre yapılarak sistemin gerilim kararlılık analizi yapılmıştır. Bu çalışma Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ile gerçekleştirilmiştir [20,21].



Şekil 3. Yeniden düzenlenmiş 6 baralı sistem

FKT etkilerini inceleyebilmek amacıyla 2 ve 4 nolu baralar arasında bağlanan FKT'nin faz açısı sınırları -45° ile $+45^\circ$ arasında belirlenmiştir. -45° 'den başlayarak $+45^\circ$ 'ye kadar çeşitli kademelerde analiz tekrarlanmıştır. Her FKT'nin her faz açısında yük akışı, sürekli yük akışı ve arıza yaptırılan sistemin analizi gerçekleştirilmiştir.

6 baralı sisteme FKT bağlı iken yük akışı yapıldığında, FKT'nin faz açılarının değişimine göre sistemdeki kayıplar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Faz açılara göre aktif ve reaktif güç kayıpların değişimi

	-45°	-20°	0°	$+20^\circ$	$+45^\circ$
Aktif Güç(pu)	0.645	0.202	0.099	0.226	0.688
Reaktif Güç(pu)	1.349	0.105	-0.204	0.119	1.390

Tablo 1 incelendiğinde FKT'nin alt ve üst değerlerinde hem aktif ve hem de reaktif kayıplar artmaktadır. Kayıplar bakımından bakıldığında ideal çalışma açısı olarak 0° olarak görülmektedir. Buradaki negatif değer sistemde reaktif kayıp olmadığını, hatta sistemin reaktif güç ürettiğini göstermektedir. Yük akışı sonucunda baralar arasında transfer edilen güçlerin değişimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Faz açılarına göre 2-7 baralar arası transfer edilen güç

	-45 °	-20 °	0°	+20 °	+45 °
Aktif Güç(pu)	-1.026	-0.266	0.515	1.400	2.56
Reaktif Güç(pu)	1.351	0.663	0.328	0.232	0.512

FKT'lerin esas kullanım amaçlarından biri gücün akış yönüne müdahale etmektir [15]. Tablo 2'de bu durum 2 ile 7 nolu bara arasında görülmektedir. Tablo incelendiğinde aktif gücün -45° ve -20° 'de gücün yönü ile diğer faz açılarında gücün yönünün değiştiği görülmektedir. Tablo 3'de ise yük akışı sonucunda baraların gerilim genlik değerleri ve faz açısı değerleri verilmiştir.

Tablo 3. Bara gerilim genlik ve faz açısı değerleri (V_{pu} , δ°)

	-45 °		-20 °		0°		+20 °		+45 °	
	$V(pu)$	$\delta (^\circ)$	$V(pu)$	$\delta (^\circ)$	$V(pu)$	$\delta (^\circ)$	$V(pu)$	$\delta (^\circ)$	$V(pu)$	$\delta (^\circ)$
Bara 4	0.928	-31.0	0.966	-15.5	0.973	-3.4	0.959	8.2	0.908	22.2
Bara 5	0.947	-12.7	0.963	-8.1	0.966	-4.5	0.960	-1.2	0.940	1.9
Bara 6	0.984	-7.8	0.989	-5.8	0.990	-4.3	0.990	-3.1	0.986	-1.9
Bara 7	0.984	-41.4	1.015	-19.0	1.029	-1.4	1.032	15.9	1.018	37.4

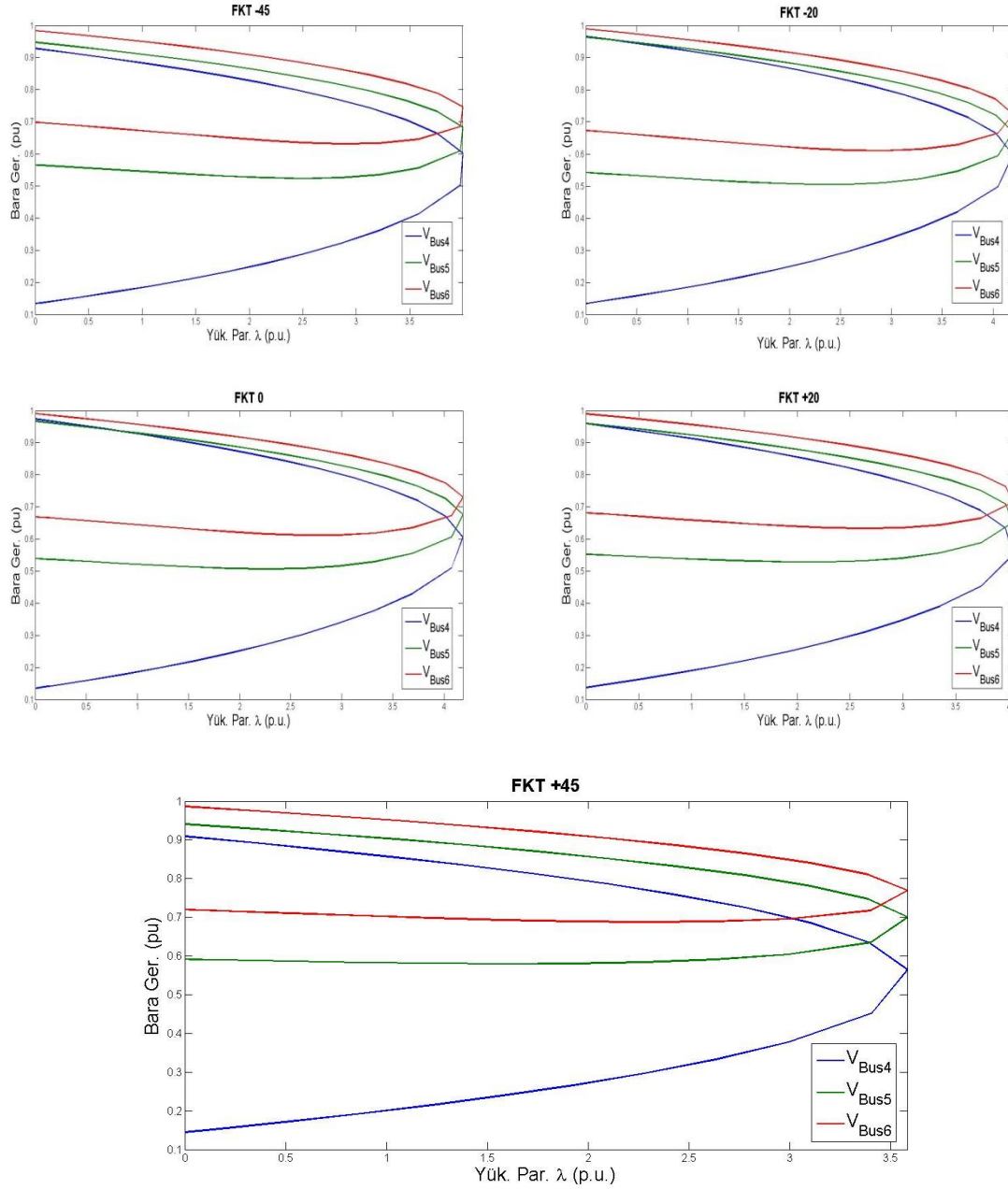
Tablo 3'de FKT'nin arasına bağlandığı, 4 ve 7 nolu baralar en fazla etkilenmektedirler. Diğer baralar FKT'nin açı değişiminden daha az etkilenmektedir. Burada gerilim genlik ve faz açısı bakımından en ideal çalışma noktasının 0° olduğu görülmektedir.

Sistemde sürekli yük akışı yapıldığında sistemin maksimum çalışma noktaları olan kritik gerilim ve kritik aktif güç noktaları bulunur. Sistemde FKT'nin ayarlandığı değer için ayrı ayrı sürekli yük akışı yapılmıştır. Sürekli yük akışı sonucunda yük baralarının maksimum yüklenme parametre ve kritik bara gerilim genlik değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. FKT açılarına göre maksimum yüklenme parametreleri ve bara gerilimleri

	-45 °	-20 °	0	+20 °	+45 °	
Yük.Par. λ (pu)	3.995	4.193	4.185	4.038	3.58	
V_{kri} (pu)	V_4	0.60	0.59	0.60	0.55	0.56
	V_5	0.63	0.66	0.67	0.65	0.70
	V_6	0.74	0.72	0.60	0.71	0.77

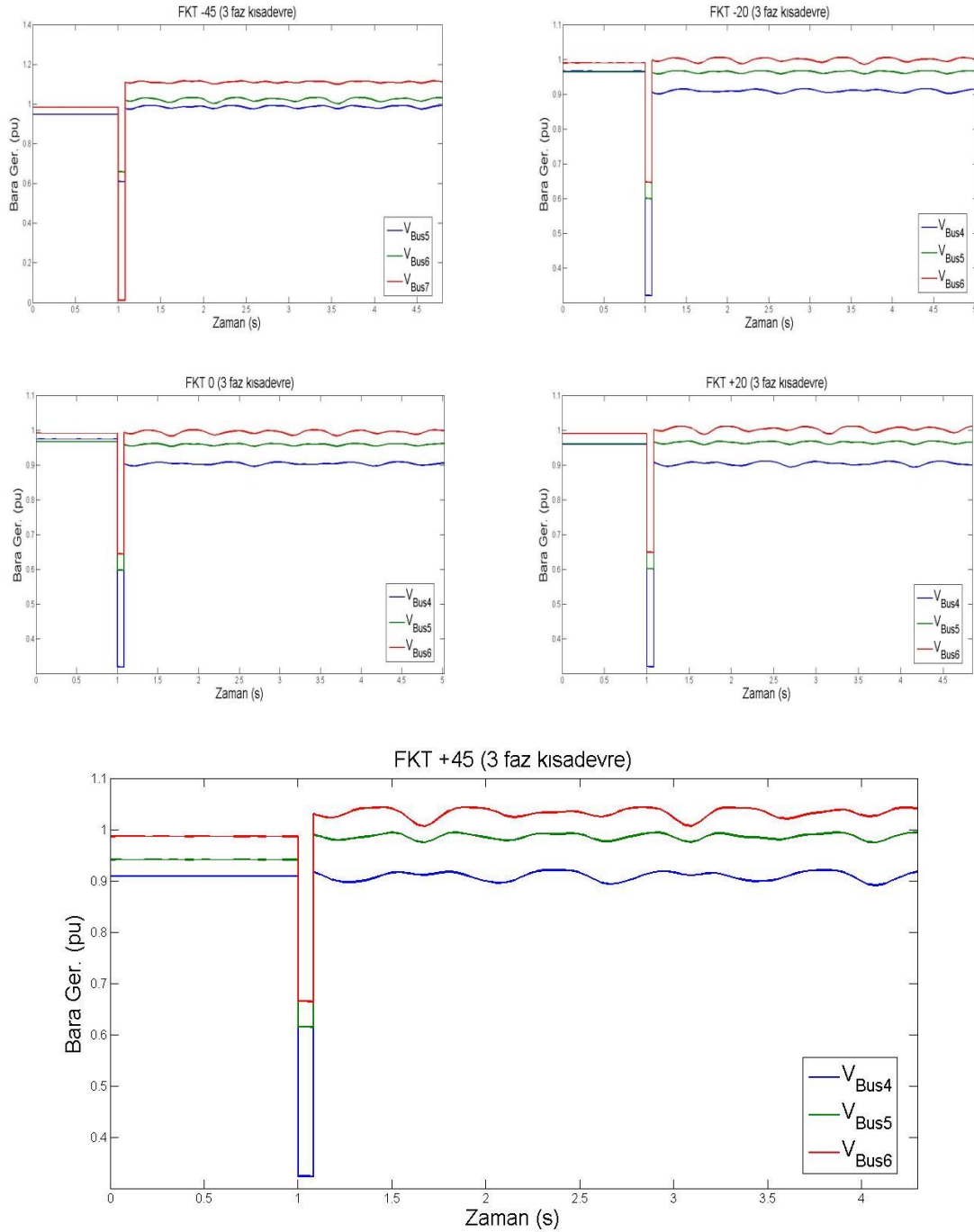
Tablo 4'e göre sistemin en fazla güç taşıyabileceği değer FKT'nin -20° 'ye ayarlandığı değer olarak görülmektedir. Diğer değerlerde ise taşınabilecek maksimum güç azalmaktadır. Bu durum Şekil 4'de grafiklerle gösterilmiştir.



Şekil 4. Baraların maksimum yüklenme (λ - V) ilişkisini gösteren eğriler

Şekil 4’de verilen eğrilerine göre; aktif güç bakımında sistem en fazla gücü -20° ve 0° ‘de transfer etmektedir. Bütün grafiklerde, 4 nolu yük barasının gerilim bakımından en dayanıklı bara olduğunu göstermektedir. Bunun en büyük nedeni ise FKT’nin bağlı olduğu yük barası olarak söylenebilir.

FKT sistemde 2 ve 4 nolu baralar arasında bağlanmıştır. Bu iki bara arasında FKT’nin kısa devredeki davranışını incelemek için 7 nolu bara ilave edilmiştir. Sistem bu bara üzerinden kısa devre edilmiştir. 7 nolu barada 1.saniye kısa devre oluşturulmuş 1,07. saniyede ise arıza temizlenmiştir. Kısa devre oluşumu ve arızanın temizlenmesi sonucunda gerilim bakımından elde edilen eğriler Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Baraların arıza sonrası gerilim genlik değerlerindeki değişimler ve arızanın temizlenme süreleri

Şekil 5’de elde edilen eğriler incelendiğinde kısa devreye en yakın olan 4 nolu yük barası en fazla etkilenmiştir. FKT’nin her açı değerinde gerilim 0 V.’a kadar düşmektedir. Arızanın temizlenmesi sonrasında -45° ve $+45^\circ$ ’de gerilim arıza öncesi genlik değerlerine ulaşmaktadır. Diğer açı değerlerinde ise yaklaşık olarak %10’luk bir gerilim düşümü yaşanmaktadır. Bu açı değerlerinde arıza sonrası gerilim dalgalanmaları -45° ve $+45^\circ$ ’nazarın daha az olmaktadır. 5 ve 6 nolu baralar incelendiğinde ise kısa devre anında gerilim 0,6-0,7 pu değerlerine kadar düşmektedir. Arıza temizlenme sonrasında ise -45° ve $+45^\circ$ açı değerlerinde gerilimin genlik değerinde %5-%10 arasında yükselme yaşanmaktadır. Yine aynı şekilde Arıza sonrası gerilim dalgalanmaları bu baralarda da devam etmektedir.

III. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada IEEE'nin 6 baralı test sistemi yeniden düzenlenerek kullanılmıştır. Sistemde en yoğun yük akışının yaşandığı hat üzerine FKT konulmuştur. -45° den başlayarak $+45^{\circ}$ ye kadar değişik açılarda FKT üzerinde değişiklik yapılarak sistemdeki analizler yapılmıştır. Sistem önce normal çalışma şartlarında çalıştırılarak güç akışı yapılmıştır. Daha sonra sistemin maksimum yüklenme şartlarının belirlenmesi için sürekli yük akışı yapılmıştır. Son olarak ise sistemde kısa devre yapılarak yük baralarının davranışı analiz edilmiştir.

Yük akışı sonucunda, FKT'ün faz değeri değiştirilerek hattan akan gücün değeri ve yönü kontrol edilebileceği bu sistem üzerinde gözlemlenmiştir. Aktif güç -45° ve -20° 'de bir yönde iken diğer faz açılarında gücün yönünün değiştiği görülmektedir. Ayrıca FKT'ün kayıplar üzerinde de etkili olduğu görülmüştür. FKT 0° açığa ayarlı iken kayıplar en düşük değerde iken diğer faz açılarında kayıpların arttığı gözlemlenmiştir.

Sürekli yük akışında sonucunda sistemden yük baralarından çekilebilecek maksimum gücün değiştiği ve baraların kritik gerilim değerlerinin de benzer şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Yük baralarından çekilebilecek maksimum güç -20° ve 0° 'de olmaktadır. Kritik gerilim bakımından, 4 nolu yük barasının gerilim bakımından en dayanıklı bara olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bu baranın FKT'ye en yakın bara olduğu söylenebilir.

Sistemde FKT'nin bağlandığı barada arıza oluşturulup bu arıza belli bir zaman sonra temizlenmiştir. Sistemde oluşturulan kısa devre arızası ve arızanın temizlenmesi sonrasında arızadan gerilim bakımından en fazla etkilenen 4. bara olmuştur. Bunun nedeni arızaya en yakın yük barası olmasından kaynaklanmaktadır. Arıza sonrası tüm bara gerilimlerinde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar 0° 'de az olmakla beraber diğer faz açısı değerlerinde artmaktadır. Arıza sonrası gerilim genlik değerlerinde FKT'nin faz açısı değerine bağlı olarak %5-%10'luk gerilim değişimleri yaşanmıştır. Bu analiz sonucunda FKT'nin güç sistemine önemli ölçüde etki ettiği gözlemlenmiştir.

IV. KAYNAKLAR

- [1] G. Verbič, M. Pantoš, and F. Gubina, "On voltage collapse and apparent-power losses," *Electric power systems research*, vol. 76, no. 9, pp. 760-767, 2006.
- [2] J. Verboomen, D. Van Hertem, P.H. Schavemaker, W.L. Kling and R. Belmans, "Phase shifting transformers: principles and applications," In Future Power Systems, 2005 International Conference on IEEE, pp. 6.
- [3] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformers," C57.135, 2002.
- [4] R. Tirupathi, et al., "Application of Phase Shifting Transformer in Indian Power System," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 242, 2012.

- [5] R.M. Castro, F.M. Batista and J.M. Pinto, "Application of FACTS in the Portuguese transmission system: investigation on the use of phase-shift transformers," In Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, vol. 4, pp. 4, IEEE.
- [6] J.K. Bladow and A.H. Montoya, "Experiences with parallel EHV phase shifting transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no.3, pp. 1096-1100, 1991.
- [7] P. Moore and P. Ashmole, "Flexible AC transmission systems. Part 4: Advanced FACTS controllers," *Power Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 95-100, 1998.
- [8] H. Saadat, *Power System Analysis*. McGraw-Hill, Singapore, 2004.
- [9] A. El Hraiech, K. Ben-Kilani, and M. Elleuch, "Control of parallel EHV interconnection lines using Phase Shifting Transformers," In Systems, Signals and Devices (SSD), 2014 11th International Multi-Conference on IEEE, pp. 1-7.
- [10] L. Flavio GM, et al. "Phase shifter placement in large-scale systems via mixed integer linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1029-1034, 2003.
- [11] J.A. Momoh, J.Z. Zhu, G.D. Boswell and S. Hoffman, "Power system security enhancement by OPF with phase shifter," *IEEE transactions on power systems*, vol. 16, no. 2, pp. 287-293, 2001.
- [12] D. Van Hertem, J. Rimez and R. Belmans, "Power flow controlling devices as a smart and independent grid investment for flexible grid operations: Belgian case study," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no.3, pp. 1656-1664, 2013.
- [13] L. Contreras-Aguilar, N. García, M.A. Islas-Martínez and R. Adame-Ortiz, "Implementation of a VFT model in PSS/E suitable for power flow and transient stability simulations," In Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE, pp. 1-8.
- [14] S. Sithole, N. Mbuli and J.H.C. Pretorius, "Improvement of the Ulco network voltage regulation using a phase shifting transformer," In AFRICON, 2011, IEEE pp. 1-6.
- [15] M. Tümay T. Demirdelen S. Bal, B. Doğru, A. Cicibaş, A.K. Köseoğlu, ve M. Aksoy, "Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Dünyadaki Durumu ve Uygulama Alanlarının Literatür İncelemesi," Güç Sistemleri Konferansı, CIGRE Türkiye, Kasım2016.
- [16] C.W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, Mc Graw-Hill, Inc., 1994.
- [17] S. Johansson, "Long-term Voltage Stability in Power Systems-Alleviating the Impact of Generator Current Limiters," Doctor of Philosophy, School of Electrical and Computer Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden, 1998
- [18] M.K. Pal, "Voltage stability: analysis needs, modelling requirement, and modelling adequacy," In IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, vol. 140, no. 4, pp. 279-286, 1993.

- [19] C.A. Canizares and F.L. Alvarado, "Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems," IEEE transactions on Power Systems, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, 1993
- [20] F. Milano, Documentation for PSAT version 1.3. 4. Power System Analysis Toolbox, 2005.
- [21] Anonim, (4 Ekim 2017). [Online]. Erişim: 10.04.2017, <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>.