
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	Geliş/Received 08.04.2017 Kabul/Accepted 21.04.2017	Doi 10.16984/saufenbilder.304887	

Faz kaydırıcı transformatörlerin güç sistemine etkileri

Salih Tosun^{*1}

ÖZ

Elektrik Enerjisine olan talebin giderek artması, elektrik enerjisinin daha ekonomik ve güvenli kullanımı ortaya çıkarmıştır. Güç sistemlerinin kararlı ve güvenilir bir şekilde işletilmesi konusu da çok önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Günümüzde güç sistemlerinin kontrolü ve işletilmesi açısından Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission Systems - FACTS) önemli rol oynamaktadırlar. FACTS cihazları ile güç sistemlerinin gerilim ve frekans kararlılığının iyileştirilmesinin yanında, hatlardaki güç transferinin de kontrolü söz konusudur. Faz Kaydırıcı Transformatörler de (FKT) bu FACTS araçları içerisinde sayılmaktadırlar. Bu çalışmada (IEEE) 6 baralı güç sistemine faz kaydırıcı transformatörün ilave edilmesiyle güç akış analizi yapılmıştır. FKT'nin değişik faz açılarındaki katkılarına göre güç sisteminin analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Faz Kaydırıcı Transformatörler, Güç Sistemi, Yük akışı

Effects of phase shifting transformers on power system

ABSTRACT

Increasing demand for electric energy has led to more economical and safe use of electric energy. The operation of power systems in a stable and reliable manner has been a very important work. Today, Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) play an important role in controlling and operating power systems. In addition to improving the voltage and frequency stability of power systems with FACTS devices, they also control the power transfer in the lines. Phase Shifting Transformers (PST) are also considered as FACTS instruments. In this study, power flow analysis was done by adding Phase Shifting Transformer to IEEE 6-bus power system. The analysis of the power system was made according to the contributions of the PST to the various phases.

Keywords: Phase Shifting Transformers, Power System, Load Flow

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik tüketiminin hızlı artması ve dengesiz kullanımına bağlı olarak son yıllarda güç sisteminin oldukça etkilendiği ve yapısal değişikliklere uğradığı görülmüştür. Bu durumda güç sisteminin çalışma şartlarının iyileştirilmesine ve yapısal değişikliklere gereksinimi vardır. Güç sistemlerinin yapılandırılmasında dağıtım ve iletim seviyesinde düzenlemeler genel olarak generatörlerin güç üretimi ile sağlanmaktadır.

Ancak son zamanlarda mevcut güç sistemi üzerine ilave sistemler ile sistemin kararlılığı artırılmaya başlanmıştır[1]. Elektrik piyasasının serbestleşmesi güç sistemlerinde önemli değişikliklere neden olmuştur. Üreticiler ve tüketiciler farklı ülkelerde olabilir. Buda kontrolsüz yük akışına neden olabilir[2]. Güç sistemlerinde kontrolsüz güç akışından dolayı hatlar aşırı yüklenebilirler, bu güç akışı doğrudan iletim hatlarının empedansları ile ilgilidir[3]. Bu kontrolsüz güç akışı ve aşırı yüklenme

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Düzce Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, Düzce, Türkiye - salihtosun@duzce.edu.tr

problemlerinden dolayı aktif güç kontrol edilmelidir. FKT'ler bu sorunların çözümü için uygun elemanlardır[2]. Güç sistemlerinde enerji iletim hatlarından en uygun fayda elde edebilmek için faz değiştirici transformatörler kullanılabilir[4]. FKT transformatörler birkaç ülkede uygulanmakta veya planlama aşamasına gelmiştir ve böylece güç sistemlerindeki iletim hatlarının güç yoğunluğunu azaltmakta veya kapasitesinde çalıştırmaktadırlar [5-8]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde;

Tunus- Cezayir sınır hattında bulunan yüksek gerilim hattında FKT vasıtasıyla gerilim iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda güç akışında iyileşmeler sağlanırken gerilim konusunda yeterince iyileştirme sağlanamamıştır[9]. Bir başka çalışmada FKT'lerin optimal yerleştirilmeleri konusu ele alınmıştır. Simülasyon büyük boyutlu sistemlerden 24, 118, 300 baralı sistemin yanı sıra 904 baralı sisteme uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir[10]. Yapılan bu çalışmada ise optimal yük akışı FKT ile birleştirilerek güç sisteminin güvenirliliği genişletilmiştir. Sürekli çalışma durumlarında hatların aşırı yüklenmesi çeşitli test yöntemleri ile kontrol edilmiştir[11]. Değişik araştırmacıların yaptığı analizlerde ise, güç sisteminin kararlılığın göstergesi olan gerilim ile maksimum yüklenme parametresinin geliştirilmesinde Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazları kullanılmıştır. FACTS cihazları vasıtasıyla maksimum yüklenme parametrelerinin çeşitli güç sistemlerindeki etkileri incelenmiştir[12-15]

Belçika'da iletim operatörü, güç sistemi üzerine "akıllı" cihazlar kurarak güç akış kontrol çalışmaları yapmıştır. Sistemde güç akışı yeni iletim hatları kurulmadan esnek bir şekilde yönetilmiştir. Bu sistemin koordinasyonu sayesinde Belçika enerji sistemindeki güç akışı yaklaşık olarak 2500 MW etkilenmiştir[16]. Meksika ile Kaliforniya, Baja arasındaki güç sistemi üzerine -180 den +180 dereceye sınırları olan FKT'ler kullanılarak geçici durum ve kararlılık analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 132MVA_r reaktif güç tüketimi sırasında sistemin kararlılığını sürdürdüğü belirlenmiştir[17]. Diğer bir çalışma ile ise FKT, uzun iletim hatlarına sahip şebekelerdeki aşırı ve düşük gerilimlerin eliminasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir. Burada faz açısının dikkatle seçilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır. Transformatör güç sisteminin

işletmesinde daha kötü bir durumun oluşmasına izin vermemelidir. Bu durumda FKT'lerin primer sargıları doğrudan tüketicilere bağlanmamalıdır[18].

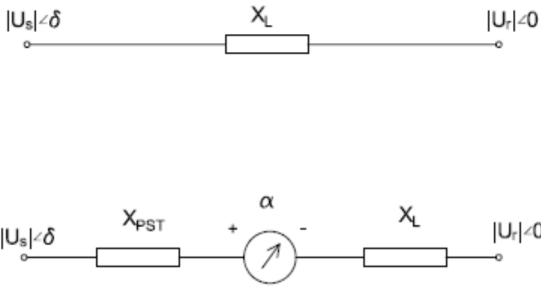
Yapılan bu çalışmada IEEE'nin 6 baralı test sistemi üzerine incelemeler yapılmıştır. Sisteme FKT ilave edilerek yük akışı ve sürekli yük akışı analizi Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) üzerinden yapılmıştır. Sürekli yük akışı ile Gerilim-Maksimum Yüklenme Parametresi (G_MYP) ilişkisi üzerinde durulmuştur. Sistemde ayrıca FKT ile kayıp ilişkisi analiz yapılmıştır. Ayrıca sisteme ilave edilen FKT belli faz açısı sınırları arasında tutularak hattan akan gücün değişimi de incelenmiştir.

2. TEORİK ALTYAPI (THEORITICAL BACKGROUND)

2.1. Faz Kaydırıcı Transformatörler (Phase Shifter Transformers)

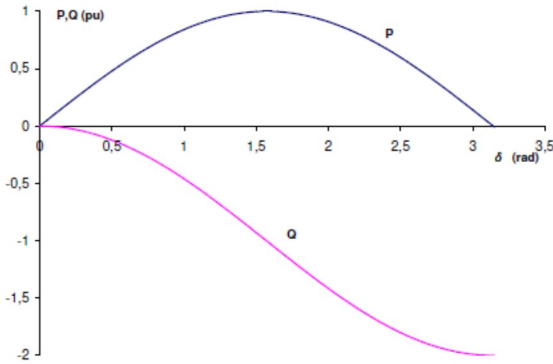
FKT, iletim hattı üzerinde güç akışı kontrolünü sağlamaya yarayan özel tip transformatörlerdir. Yapısındaki özel sargı sayesinde çıkış gerilimi, giriş geriliminden farklı faz açısına sahip olur. Bu durum, güç sistemine farklı faz açısına sahip bir gerilim vermek olarak da ifade edilebilir. Bunun sonucunda FKT transformatörleri, güç sistemleri iletim hatlarında enerji akış yönünü belirlemek için kullanılırlar[19]. FKT'nin ana işlevi, faz açısını değiştirerek enerji iletim hattı üzerinde akan gücü kontrol etmektir. Bu faz kaydırma işlemi, hattın faz geriliminin birine genliği değiştirilebilir bir gerilim bileşeni ilave ederek veya çıkararak yapılır. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğeri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekil 1'de ifade edilen, U_s ve U_r gönderici ve alıcı gerilim değerleridir. δ ise güç açısıdır. α açısı ise FKT'un açısıdır. X_L hattın reaktansı ve X_{PST} ise sisteme bağlanan FKT'ün kaçak reaktansıdır ve hatta seri olarak bağlanmaktadır.



Şekil 1. Enerji iletim hattının FKT'lı ve FKT'sız modeli (Model of a transmission line with and without a PST)[2]

Enerji iletim hattı üzerinden akan aktif ve reaktif gücün değişimi δ 'ya olarak değişmektedir. Bu durum Şekil 2'de verilen grafikte de görülmektedir. Şekil 2'deki eğri δ açısının fonksiyonu olduğu görülmektedir.



Şekil 2. Enerji iletim hattı üzerindeki aktif ve reaktif gücün δ 'ya bağlı değişimi (Active and reactive power over a transmission line as a function of δ)[2]

Bu durumda enerji iletim hattı üzerinden taşınan aktif ve reaktif güç denklemleri Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'deki formüllerle verilmiştir.

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

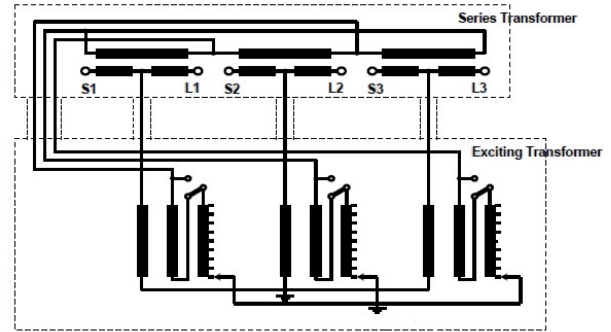
$$Q = \frac{|U_s||U_r|}{X_L} \left(\cos\delta - \frac{|U_r|}{|U_s|} \right) \quad (2)$$

Buradaki eşitliklere göre; aktif güç, gönderici ve alıcı uçlarındaki gerilimlerle ve her iki tarafın elektriki açı olarak $\sin\delta$ ile doğru orantılıdır. Hattın reaktansına ise ters orantılı olarak bağlıdır. Aktif güç, gerilimler değiştirilerek kontrol edilebilir. Fakat bu durum reaktif güç üzerinde oldukça büyük etki yaptığından bu metot verimli değildir. Bunun için hattın reaktansını düşürmek gerekir. FKT trafo modelinde reaktans, faza seri olarak bağlanması nedeniyle α açısının δ açısına ilave edilmesiyle güç akışı artırılır. Bu durumda faz açısı belli sınırlar içerisinde kontrol edilebilir[2].

Bu durumda Eşitlik 1 değişerek Eşitlik 3'deki gibi oluşur.

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

Şekil 3'de geleneksel faz kaydırıcı trafonun bağlantısı görülmektedir. FKT uyarma transformatörü ve yükseltici transformatörden oluşur ve sistemde mekanik anahtarlama vardır. FKT bu şekilde basit olarak güç akışını kontrol eder. Hatta seri bağlı trafo ile faz açısı değiştirilerek gerilime ilave edilir. Genliği kademe değiştirici trafo tarafından değiştirilen uyarma trafosu tarafından sağlanır.



Şekil 3. FKT'nun bağlantısı (Connection diagram of phase shifting transformer)[20]

2.2. Statik Gerilim Kararlılığı (Static Voltage Stability)

Güç sistemlerinde statik gerilim kararlılığı reaktif gücün değişimine bağlı olarak şekillenmektedir. Reaktif gücün artırılması ile yük barasının yüklenebilme kapasitesi artırılmış ve güç sisteminin çalışma şartları iyileştirilmiş olur. Reaktif güç değeri belli limitlerin altında kaldığında ve gerilim düşümü yaşanmaya başladığında sistem çökmeye kadar gidebilir. Bu istenmeyen durumu engellemek için reaktif güce bağlı gerilim dengelemesi önemli bir durumdur. Güç sisteminin Gerilim- Yükleme Parametresi ($V-\lambda$) ile baranın, aktif ve reaktif güç değeri arasındaki ilişki Eşitlik 4 ve 5'de ifade edilmiştir[21].

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

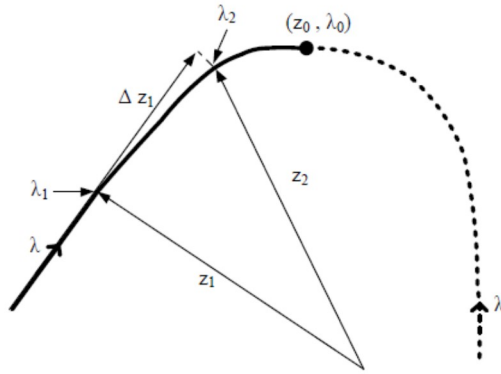
$$Q_L = Q_{L0} (1 + \lambda) \quad (5)$$

Eşitlikte 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 değeridir.

2.3. Sürekli Yük Akışı (Continuous Load Flow)

Gerilim ve maksimum yüklenme parametresi ($V-\lambda$) arasındaki ilişkiyi kurmak için sürekli yük akışı yapılması gerekmektedir. Sürekli yük akışı analizi ile belli bir sistem modeli olmaksızın belli zorlukları çözümlenmede kolaylık sağlar ilaveten sistemden elde edilen eşitliklerde tekil çözümlenme durumunda gerilimi değiştirme özelliğine de sahiptir. Ayrıca sistem eşitliklerindeki tekil çözümlenme durumunun oluşturacağı olumsuz durumlara karşı gerilimi otomatik olarak değiştirme özelliğine sahiptir. Sürekli yük akışındaki strateji kullanımı Şekil 4'de gösterilmiştir.



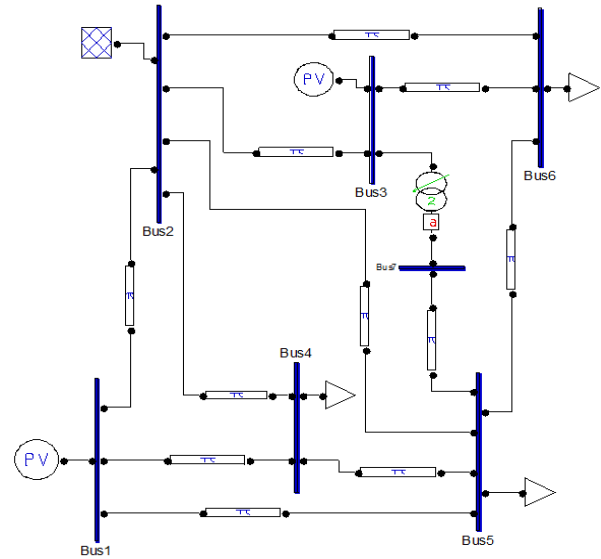
Şekil 2. Sürekli yük akışı metodu (Continuous load flow method)

Burada, (z_1, λ_1) denge noktaları olarak bilinen konumlardır, $\Delta\lambda_1$, sistemdeki parametrenin değer değişimi ve vektör çözümlenmesinde kullanılmaktadır. İlk adım tahmin etme işlemi olarak gerçekleştirilir. Başlangıçta $z_1 + \Delta z_1$, $\lambda_1 + \Delta\lambda_1$ değerleri üretilir. Bu üretilen yeni değerler sistemdeki yeni denge noktalarını oluşturmada kullanılır[22].

3. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Yapılan çalışmada IEEE'nin 6 baralı test sistemi kullanılmıştır. Sistemin toplam yükü 280 MW ve 190 MVar değerinde olup bu güçler 3 adet generatör tarafından sağlanmaktadır. FKT etkisini incelemek için önce sistemde yük akışı yaparak yoğun güç akışının olduğu hatlar belirlenmiştir. Benzetim çalışması Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ile gerçekleştirilmiştir[23, 24].

Bu hat üzerine FKT yerleştirilerek hattan akan aktif güç akışı gözlemlenmiştir. 6 baralı test sisteminde FKT 3-5 nolu baraları birbirine bağlayan hatta bağlanmıştır. Şekil 5'de incelemenin yapıldığı güç sistemi görülmektedir.



Şekil 5. 6 baralı sistem modellemesi (6 bus system modeling)

Güç akışı analizi sonucu elde edilen verileri gözlemleyebilmek için FKT'nın bağlı olduğu hat üzerine 7. bir bara ilave edilmiştir. FKT etkilerini inceleyebilmek amacıyla FKT'nın faz açısını sınırları -45° ile $+45^\circ$ arasında belirlenmiştir.

4. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI (RESULT OF SIMULATION STUDY)

4.1. Kayıplar (Losses)

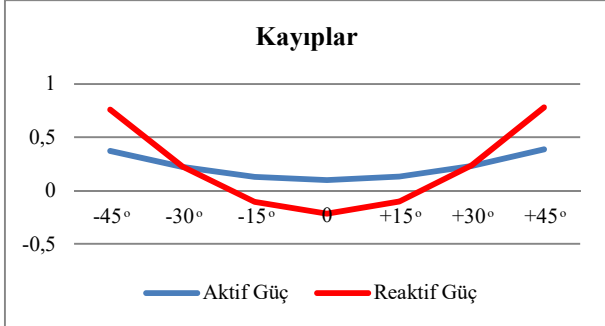
FKT 5 nolu bara ile 6 nolu bara arasında bağlanmıştır. -45° den başlayarak $+45^\circ$ kadar 15° lik açılarla FKT üzerinde değişim yapılarak sistemdeki toplam güç kayıplar incelenmiştir. Tablo 1'de kayıpların FKT faz açısına göre elde edilen değerler görülmektedir.

Tablo 1. Faz açılara göre kayıpların değişimi (Change of losses according to phase angles)

	-45°	-30°	-15°	0	$+15^\circ$	$+30^\circ$	$+45^\circ$
Aktif Güç (pu)	0.371	0.221	0.128	0.098	0.132	0.230	0.388
Reaktif Güç (pu)	0.761	0.224	-0.101	-0.210	-0.105	0.235	0.780

Tablo 1'e bakıldığında aktif güç kayıpları en düşük 0° , reaktif güç kayıpları ise $+15^\circ$ değerindedir. Diğer bütün değerlerde kayıplar artmaktadır. Reaktif güçte durum farklılık

göstermektedir. 0° üretilen güç reaktif güç 1.6841 pu, tüketilen reaktif güç 1,9 pu olmuştur. Yani üretim tüketimden az olmuştur. Aradaki fark FKT'nin yapısından kaynaklanmaktadır. Tablodaki (-) işaretler sisteme reaktif güç verildiğini ifade etmektedir. Şekil 6'da bu kayıpların değişim eğrileri verilmiştir.



Şekil 6. Faz açılarına göre kayıpların değişimi (Change of losses according to phase angles)

Grafik incelendiğinde faz açısı 0° olduğunda kayıplar en düşük değerdedir. Aktif kayıplar Faz açısı -45° veya $+45^\circ$ doğru değiştikçe artmaktadır. Ancak reaktif kayıplarda ise -15° ile $+15^\circ$ arasında kayıplar – yöndedir. Yani sisteme reaktif güç enjekte etmektedir. Aktif kayıplardan ziyade reaktif güç kayıplarındaki değişimler daha fazla olmaktadır.

4.2. Baralar arası transfer edilen güç (Transferred power between buses)

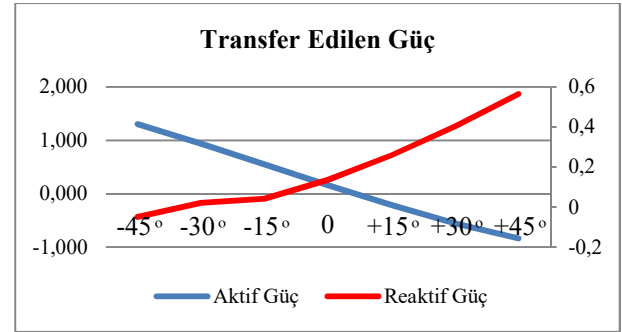
FKT 5 nolu bara ile 6 nolu bara arasında bağlanmıştır. -45° den başlayarak $+45^\circ$ kadar 15° lik açılarla FKT üzerinde değişim yapılarak sistemdeki 5.bara ile 7.bara arasında transfer edilen güç incelenmiştir. Tablo 2'de kayıpların FKT faz açısına göre elde edilen değerler görülmektedir.

Tablo 2. Faz açılarına göre 3-5 baralar arası transfer edilen güç (Power transferred between 3-5 bars according to phase angles)

	-45°	-30°	-15°	0°	$+15^\circ$	$+30^\circ$	$+45^\circ$
Aktif Güç(pu)	1.30	0.93	0.55	0.16	-0.21	-0.55	-0.83
Reaktif Güç(pu)	-0.04	0.02	0.04	0.13	0.25	0.40	0.56

Tablo 2'ye göre FKT'nin bağlı olduğu hat üzerinde aktif güç değişimi, -45° den itibaren faz açısı arttırıldıkça transfer edilen güç azalmaktadır. $+15^\circ$ den itibaren ise transfer edilen gücün yönü değişmektedir. Bu durum reaktif güçte tam aksi

yönde etki etmektedir. Bu durum Şekil 7'deki grafikte görüldüğü gibidir.



Şekil 7. Faz açılarına göre 3-5 baraları arası transfer edilen güç (Power transferred between 3-5 bars according to phase angles)

Şekil 7'de verilen grafikte de görüldüğü üzere FKT'nin faz açısını azaltıkça Aktif güç artmaktadır. Buna mukabil reaktif güç azalmaktadır. Ayrıca aktif güçte 15° den sonra güç akışının yönü değişmektedir. Reaktif güçte ise FKT'nin açısı -45° den daha küçük değerlerde güç akışının yönü değişmektedir.

4.3. Bara gerilim ve açı değerleri (Voltage and angle values of buses)

FKT 5 nolu bara ile 6 nolu bara arasında bağlanmıştır. -45° den başlayarak $+45^\circ$ kadar 15° lik açılarla FKT üzerinde değişim yapılarak sistemdeki 5.bara ile 7.bara arasında baraların gerilim genlik değerleri ve baraların faz açıları incelenmiştir. Tablo 3'de güç akışı sonucu elde edilen değerler görülmektedir.

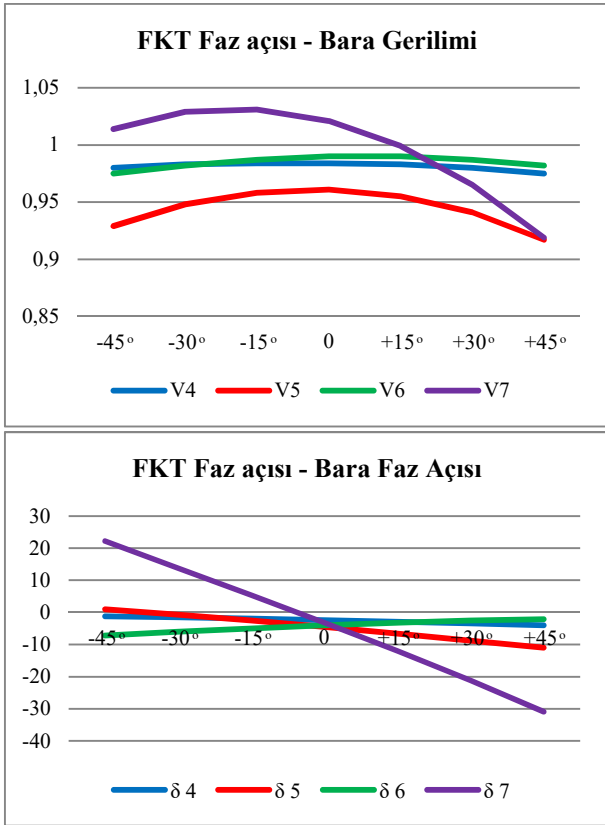
Tablo 3. Bara gerilim genlik ve faz açısı değerleri (V_{pu} , δ°) (Bus voltage amplitude and phase angle values)

	-45°	-30°	-15°	0°	$+15^\circ$	$+30^\circ$	$+45^\circ$
Bara 4	0.980	0.983	0.984	0.984	0.983	0.980	0.975
Bara 5	0.929	0.948	0.958	0.961	0.955	0.941	0.917
Bara 6	0.975	0.982	0.987	0.990	0.990	0.987	0.982
Bara 7	1.014	1.029	1.031	1.021	0.999	0.965	0.919

	-45°	-30°	-15°	0°	$+15^\circ$	$+30^\circ$	$+45^\circ$
Bara 4	-1.22	-1.55	-1.95	-2.41	-2.92	-3.45	-3.98
Bara 5	0.92	-0.69	-2.51	-4.48	-6.58	-8.75	-10.96
Bara 6	-7.21	-6.05	-4.96	-3.99	-3.17	-2.53	-2.09
Bara 7	22.17	13.75	5.351	-3.18	-11.97	-21.17	-30.94

Tablo 3'deki verilere göre; 4. ve 6. baranın gerilimi FKT'nin değişimlerinde çok az etkilenmektedir. 5. bara ve bilhassa 7. bara daha

fazla etkilenmektedir. Benzer durum açı değişimlerinde de görülmektedir. Bu durum görsel olarak Şekil 8’de açıklayıcı şekilde verilmiştir.



Şekil 8. Bara gerilim genlik ve faz açısı değerleri (Bus voltage amplitude and phase angle values)

Şekil 8’de verilen grafikler incelendiğinde, gerilim genliği açısından 0°’ye ayarlanmış FKT, 4., 5., 6. nolu baralar için en uygun değeri vermektedir. Ancak FKT en yakın olan bara 7 için ise en uygun değer -15° faz açısıdır. FKT’e en yakın yük barası olan 5 ve 7 nolu baralar faz açısı kaydırmadan en çok etkilenen baralar olduğu gözlemlenmiştir. Bara gerilim açısı olarak bakıldığında ise yine benzer görüntü ortaya çıkmaktadır. Yalnız burada sisteme ilave edilen 7 nolu baranın faz açısında FKT ile orantılı büyük değişiklikler gözlemlenmiştir. Bunun nedeni de FKT’e yakın bara olduğu için en fazla bu bara etkilenmektedir.

4.4. Statik Gerilim Kararlılığı (Static Voltage Stability)

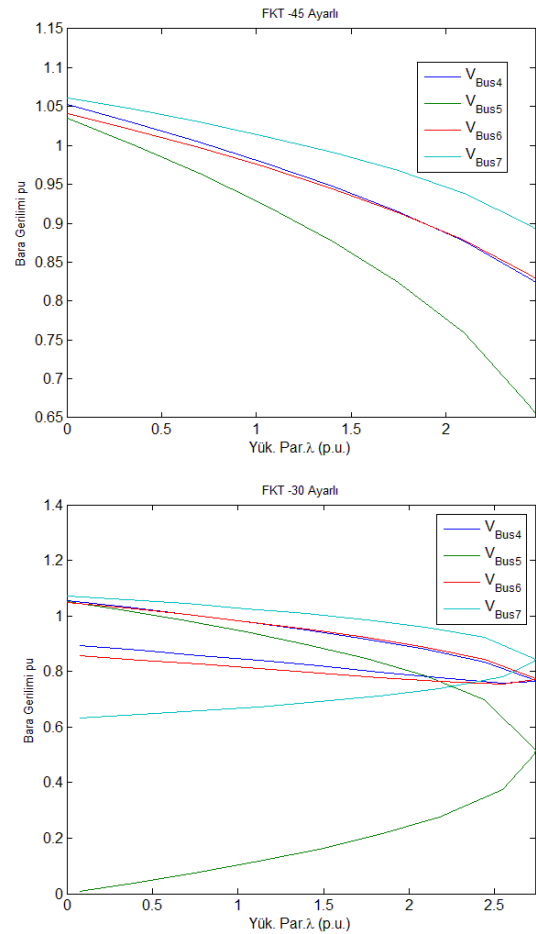
FKT 5 nolu bara ile 6 nolu bara arasında bağlanmıştır. -45°’den başlayarak +45°’kadar 15°’lik açılarla FKT üzerinde değişim yapılarak sistemdeki 5.bara ile 7.bara arasında statik gerilim kararlılığı incelenmiştir. FKT’ün ayarlandığı her kademe değeri için sürekli yük akışı yapılmış olup baraların maksimum yüklenme noktaları tespit

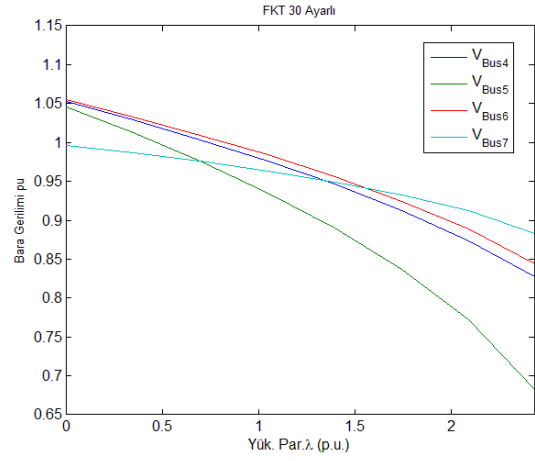
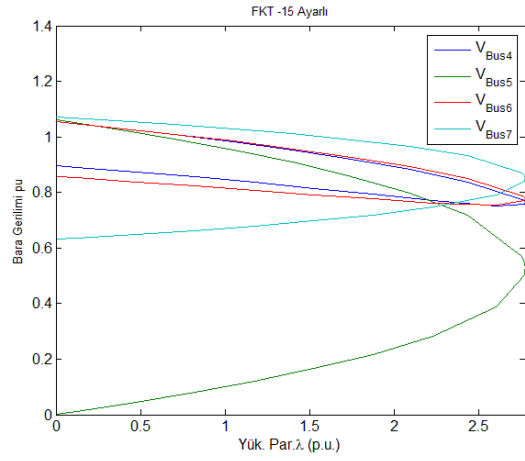
edilmiştir. Baraların maksimum yüklenme parametre değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 4. FKT açılara göre maksimum yüklenme parametreleri (Maximum load parameters according to PST angles)

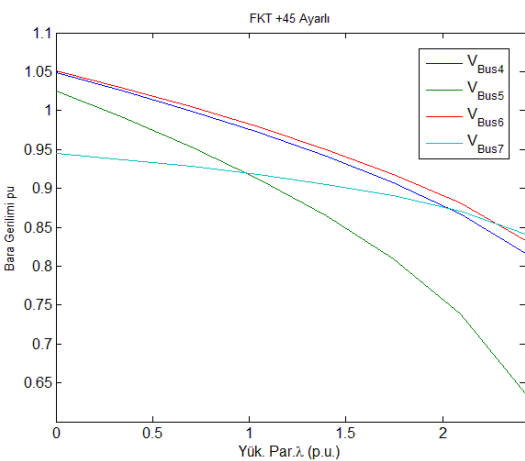
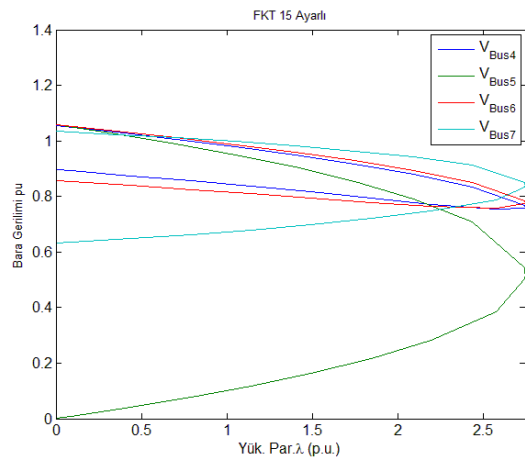
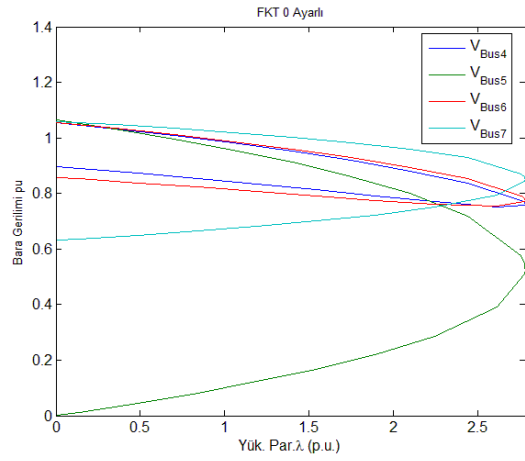
	-45 °	-30 °	-15 °	0	+15 °	+30 °	+45 °
Yük.Par	2.4	2.7	2.7	2.7	2.7	2.4	2.4
λ (pu)	7	3	7	7	4	3	2

Tablo 4’de elde edilen veriler göre güç sistemi en fazla 0 °’de yüklenmiştir. -15° ve +15 °’de ise maksimum yüklenme parametreleri yakın değerlerdedir. Ancak FKT’ün diğer açı değerlerinde λ değeri düşmektedir. Bu değerlere bağlı olarak λ -V eğrileri Şekil 9’da gösterilmiştir.

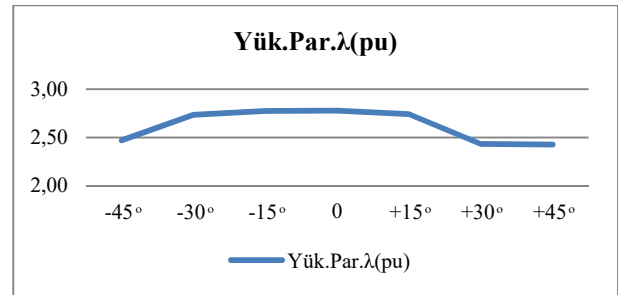




Şekil 9. Baraların λ -V ilişkisini gösteren eğriler (Curves showing the λ -V relationship of the buses)



FKT'ün farklı faz ayarları sonucunda güç sisteminin maksimum yükleme parametreleri incelendiğinde, -30° ile $+15^\circ$ arasında parametre değeri 2,7 pu'e yakın değerlerdedir. Fakat diğer açı değerlerinde ise maksimum yüklenme değerleri düşmektedir. λ parametresinin FKT'nün farklı açılara ayarlanması sonucu elde edilen değerleri gösteren grafik Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Yükleme parametresinin FKT açıları ile ilişkisi (Relation of loading parameter to PST angles)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan bu çalışmada IEEE'nin 6 baralı test sistemi kullanılmıştır. Sistemde en yoğun güç akışının yaşandığı hat üzerine FKT konulmuştur. -45° den başlayarak $+45^\circ$ kadar 15° lik açılarla FKT üzerinde değişim yapılarak sistemdeki analizler yapılmıştır. FKT'ün bulunduğu hat üzerindeki akan güç incelenmiştir. FKT'ün faz değeri değiştirilerek hattın akan gücün değeri ve yönü kontrol edilebileceği bu sistem üzerinde gözlemlenmiştir. Kayıplar bakımından incelendiğinde aktif kayıplar faz açısı -45° veya $+45^\circ$ doğru değıştikçe artmaktadır. Ancak reaktif kayıplarda ise -15° ile $+15^\circ$ arasında kayıplar (-) yöndedir. Yani sisteme reaktif güç enjekte edildiğini göstermektedir. Gerilim genliği açısından incelendiğinde 0° 'ye ayarlanmış FKT normal seviyelerdedir. FKT'e en yakın yük barası

olan 5 ve 7 nolu baralar, gerilim genliği bakımından faz açısı kaydırma işleminden en çok etkilenen baralar olduğu gözlemlenmiştir. Bara gerilim açısı olarak bakıldığında ise yine benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Sürekli yük akışı sonucunda elde edilen maksimum yüklenme noktası açısından incelendiğinde ise -30° ile $+15^\circ$ arasında parametre değeri 2,7 pu'e yakın değerlerdedir. Fakat diğer açı değerlerinde ise maksimum yüklenme değerleri düşmektedir. Bu analiz sonucunda FKT'nün sistemin parametrelerine önemli ölçüde etki ettiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] G. Verbič, M. Pantoš, F. Gubina, On voltage collapse and apparent-power losses, *Electric power systems research*, 76(9), 760-767, (2006).
- [2] J. Verboomen, et al. "Phase shifting transformers: principles and applications." *Future Power Systems*, 2005 International Conference on. IEEE, 2005.
- [3] IEEE Power Engineering Society, "C57.135 : IEEE Guide for the Application, Specification, and Testing of Phase-Shifting Transformers," May 2002
- [4] R. Tirupathi, et al. "Application of Phase Shifting Transformer in Indian Power System." *International Journal of Computer and Electrical Engineering* 4.2 (2012): 242
- [5] R. M. G. Castro, F. M. R. Batista, and J. M. M. Medeiros Pinto, "Application of FACTS in the Portuguese Transmission System : Investigation on the Use of Phase-Shift Transformers," in *IEEE Porto PowerTech2001*, Porto, 2001.
- [6] J. Bladow and A. Montoya, "Experiences with Parallel EHV Shifting Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1096–1100, July 1991.
- [7] P. Moore and P. Ashmole, "Flexible AC transmission systems part 4 : Advanced FACTS controllers," *Power Engineering Journal*, pp. 95–100, April 1998.
- [8] H. Saadat, *Power System Analysis*. McGraw-Hill, Singapore, 2004
- [9] El Hraïech, A., Ben-Kilani, K. ve Elleuch, M., "Control of parallel EHV interconnection lines using Phase Shifting Transformers", 11th International Multi-Conference on Systems, Signals&Devices (SSD), Barcelona, 2014, 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* 18.3 (2003): 1029-1034.
- [11] J. A. Momoh, et al. "Power system security enhancement by OPF with phase shifter." *IEEE transactions on power systems* 16.2 (2001): 287-293.
- [12] M. A. Kamarposhti, M. Alinezhad, H. Lesani, N. Talebi, Comparison of SVC, STATCOM, TCSC, and UPFC controllers for static voltage stability evaluated by continuation power flow method, *Electric Power Conference*, 2008. EPEC 2008. IEEE Canada, pp. 1-8.
- [13] A. Sode-Yome, N. Mithulananthan, K. Y. Lee, Static voltage stability margin enhancement using STATCOM, TCSC and SSSC, *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, 2005 IEEE/PES, 1-6
- [14] A. Sode-Yome, N. Mithulananthan, K. Y. Lee, A comprehensive comparison of FACTS devices for enhancing static voltage stability, *Power Engineering Society General Meeting*, 2007. IEEE, 1-8
- [15] M. Dogan, S. Tosun, A. Ozturk, M. K. Dosoglu, Investigation of TCSC and SSSC controller effects on the power system. 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011, IEEE, 127-131.
- [16] 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, Sept. 2013.
- [17] L. Contreras-Aguilar, et al. "Implementation of a VFT model in PSS/E suitable for power flow and transient stability simulations." *Power and Energy Society General Meeting*, 2012 IEEE. IEEE, 2012.
- [18] S. Sithole, M. Nhlanhla, and J. H. C. Pretorius. "Improvement of the Ulco network voltage regulation using a phase

- shifting transformer." AFRICON, 2011. IEEE, 2011
- [19] M. Tumay, et al. "Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Dünyadaki Durumu ve Uygulama Alanlarının Literatür İncelemesi The Current Status of Phase Shifting Transformers Around The World and a Literature Review of The Application Areas."
- [20] PJM Power Pool, Phase Shifter Application Workshop, Siemens Energy, Inc., March, 2015
- [21] N. Talebi, M. Ehsan, S.M.T. Bathaee, Effect of SVC and TCSC control strategies on static voltage collapse phenomen, IEEE Southeast Conference, 161-168, 2004.
- [22] A. Kazemi, B. Badrzadeh, Modeling and simulation of SVC and TCSC to study their limits on maximum loadability point, Journal of Electric Power and Energy Systems, 26, 381-388, 2004.
- [23] F. Milano, Documentation for PSAT version 1.3.4, 2005.
- [24] <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>, son erişim 10.04.2017.