

SÜREKLİ ÇALIŞMADA FAZ KAYDIRICI TRANSFORMATÖRLER

Hasan Basri ÇETİNKAYA¹

Ayşen BASA ARSOY²

Bora ALBOYACI³

^{1,2,3}Elektrik Mühendisliği Bölümü

Mühendislik Fakültesi

Kocaeli Üniversitesi, 41050, Veziröğlu Kampüsü, Kocaeli

¹e-posta: cetinkaya@kou.edu.tr ²e-posta: aba@kou.edu.tr ³e-posta: alboyaci@kou.edu.tr

Anahtar sözcükler: Faz Kaydırıcı Transformatör, Yük Paylaşımı, Güç Kontrolü

ABSTRACT

As power systems get more complex and more stressed, appropriate tools to control the power flow within a given network are increasingly needed. Phase shifting transformers can serve as such tools. They can control power flow in a complex power network in a very efficient way.

This paper presents how phase shifting transformers operate, how they are modelled in steady state operation and how they can control and regulate the power flow. Simulation studies are performed to show power flow control and regulation of a phase shifting transformer in steady state. Two simulation packages SIMPOW and PSAT are used to simulate phase shifting transformer's benefits.

1. GİRİŞ

Uygulama alanı geliştirmekte olan faz kaydırıcı transformatörler (FKT), karmaşık elektrik şebekelerinde güç akışı kontrolünü sağlama yönünde geliştirilen yöntemlerden biridir[1]. Faz kaydırıcı bir transformatör birincil ve ikincil sargıları arasında (kaynak ve yük uçlarında) bir faz kayması oluşturur. Çok özel uygulamalar dışında faz kaymasının amacı şebekedeki güç akışını kontrol etmektir. Bu olayı anlamak için toplam yükü paralel iki hat üzerinden taşıyan basit bir sistem göz önüne alalım. Doğal akım dağılımı hatların empedansına bağlıdır. Hat empedansları birbirinden çok farklı ise bu akım dağılımı çok etkin olmayacaktır. Hatlardan birine yerleştirilecek ek bir gerilim kaynağı ile paralel hatlardaki akımların eşitliği sağlanabilir.

Güç akışını arttırmak için, ek gerilim kaynağının hat geriliminde ileri yönde bir faz kaydırma oluşturmaları gerekir. Hat empedansının endüktif karakteristikli olmasından dolayı, hat gerilimi ile aynı fazda ya da tam ters fazda bir gerilim eklenmesi (gerilim genliğinin değişimi) sadece reaktif güç akışında etkisi

olurken, faz açısına dik açıda bir arttırıcı gerilim uygulanması (faz kayması), aktif güç akışını etkiler.

FKT'lerin etkisini inceleme amaçlı başka bir metod olarak çok büyük bir şebeke gözönüne alalım ve bu şebekede ele alınan iki bara yük akımından bağımsız ve gerilimi sabit olsun. Bu iki bara arasındaki yük akışı (P), doğal olarak bara gerilim genlikleri (V_1, V_2), açı farkı (δ) ve iki bara arasındaki hattın empedansına (X) bağlıdır. Bu durum aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P = \frac{V_1 * V_2}{X} * \sin \delta \quad (1)$$

Hat geriliminin 90 derece ilerisinde gerilim veren bir kaynak bu iki bara arasına yerleştirilirse, hat gerilimi ile aynı fazda bir hat akımı oluşturur ve aktif güç akışını artırır. Bu durum FKT'lerin çalışma prensibine karşılık gelir: Birinci ve ikincil sargılar arasına koyulan, faz-nötr geriliminin açısını yaklaşık doksan derece kaydıran değişken genlikli, arttırıcı bir gerilim ile faz kaydırma oluşturulmuş olur. Böylece, istenilen bir şebeke dalında, etkin bir şekilde güç akışı kontrolü sağlanmış olur.

Bu çalışmada, önce bir FKT'nin çalışma prensibi, daha sonra da eşdeğer devre modeli verilecektir. Bir FKT'nin güç kontrolündeki etkisi simülasyon çalışmaları ile gösterilecektir.

2. FKT ÇALIŞMA PRENSİBİ

Transformatör empedansından dolayı yük akımındaki bir değişim normal bir transformatörde yük tarafı gerilimini değiştirirken, FKT'de hem gerilim genliğini hem de faz açısını etkiler.

FKT güç akışını arttırmak için kullanıldığında, birincil ve ikincil sargılar arasındaki faz açısının değeri, yüksüz durumda aynı kademe pozisyonundaki açı değerinden daha düşük olur. Yük akımından dolayı faz açısındaki değişim şu şekilde ifade edilebilir.

$$\Delta\alpha = \arctan \frac{i_{fkt} * x_{fkt} * \cos\varphi}{1 + i_{fkt} * x_{fkt} * \cos\varphi} \quad (2)$$

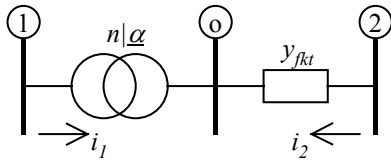
Bu ifadede $\Delta\alpha$ yük akımından dolayı açı değişimini, i_{fkt} FKT'den akan akımı (pu), x_{fkt} FKT empedansı (pu), ve φ yük gerilimi ve akımı arasındaki açıyı gösterir. Düşük değerli x_{fkt} bu etkiyi azaltır. Yüksüz durumda faz açıları aynı olan, empedansı düşük ve yüksek iki FKT'yi karşılaştırılacak olursak empedansı düşük olan, yük altında daha yüksek faz kayması sağlayacaktır. Ya da belirli bir yük açısı verilmişse düşük empedanslı FKT, yüksüz durumdaki faz açısını düşürecektir.

FKT güç akışını azaltma amacı ile kullanıldığında, yüklü durumda faz açısı, FKT empedansı üzerindeki gerilim düşümü ile artırılır. Bu durumda FKT empedansı FKT verimliliğini artırıcı yönde olur. Fakat bu durum FKT geriliminin yüksüz durumdaki gerilime göre daha yüksek olmasını gerektirir ki bu da çekirdeğin aşırı uyarılmasına neden olur. Tasarım aşamasında bu durumun gözönünde bulundurulması gerekir.

Sıfır faz açılı FKT'nin koyulması normal yük akışını düşürür. Bunu arttırmak için bir açı farkı yaratmak gerekir. Belirli durumlarda FKT'ler bypass yapılabilir.

3. SÜREKLİ DURUMDA FKT MODELLEMESİ

Sürekli halde bir FKT, karmaşık sayı dönüştürme oranına sahip ideal bir transformatör ile $y_{fkt}=1/x_{fkt}$ olan bir admittansın seri bağlantısından oluşmuş bir devre ile modellenir[2]. Bu model Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 FKT Eşdeğer Devre Modeli

İdeal transformatörün dönüştürme oranı $v_1/v_0=n|\alpha = n (\cos\alpha + j\sin\alpha) = a + jb$ olsun. İdeal trafo güç eşitliği olan $v_1 i_1^* = -v_0 i_0^*$ ifadesini kullanarak aşağıdaki denklem sistemi kurulabilir.

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{a - jb} i_0 = \frac{1}{a - jb} i_2 = \frac{1}{a - jb} y_{fkt} (v_0 - v_2) \\ i_1 &= \frac{1}{a - jb} y_{fkt} \left(\frac{v_1}{a + jb} - v_2 \right) \\ &= \frac{y_{fkt}}{a^2 + b^2} [v_1 - (a + jb)v_2] \\ i_2 &= -(a - jb)i_1 = y_{fkt} \left[v_2 - \frac{1}{a + jb} v_1 \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Böylece FKT'lerin birincil ve ikincil uç akımlarının gerilimler cinsinden ifadelerini yazmış oluruz. Bu ifadeleri matrisel olarak gösterirsek aşağıdaki denklem sistemini elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{fkt}}{a^2 + b^2} & \frac{-y_{fkt}}{a - jb} \\ \frac{-y_{fkt}}{a + jb} & -y_{fkt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Dönüştürme oranının karmaşık bir sayı olması durumunda admitans matrisi simetrik değildir. Böyle bir durum PI eşdeğer devresi ile gösterilemez. Eğer dönüştürme oranı reel bir sayı olursa PI eşdeğer değeri kullanılabilir.

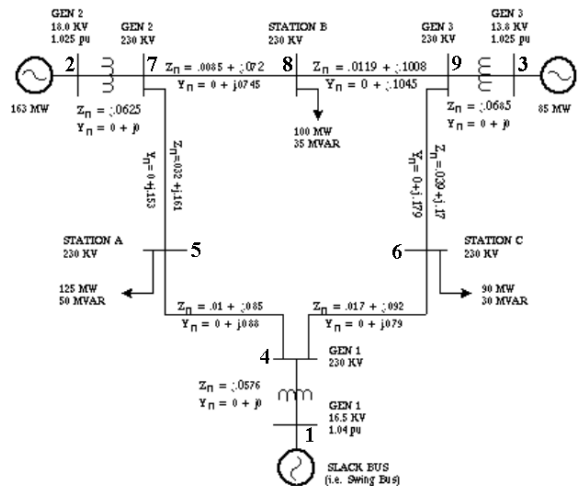
4. FKT'NİN GÜÇ KONTROLÜNE ETKİSİ

Faz kaydırıcı transformatörler hatta seri bağlı, genliği ve faz açısını değiştirebilen bir gerilim kaynağı gibi düşünülür. Bu nedenle sürekli çalışmada aşağıdaki işlevleri yerine getirme amaçlı uygulanabilir[3]:

1. İletim hattında güç akışı düzenlemesi yapar.
2. Gücün istenmeyen bir şekilde akması sonucu, çevrim oluşturmalarını önleyen bir kontrol sağlar.
3. Paralel hatlarda güç paylaşımı sağlar.

Bu uygulama alanlarını destekleyen bir dizi simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Şekil 3'te gösterilen 9 baralı IEEE test sistemi üzerinde yapılan çalışmalarda Güç Sistemleri Analizi yapabilen iki program (SIMPOW ve PSAT) kullanılmıştır.

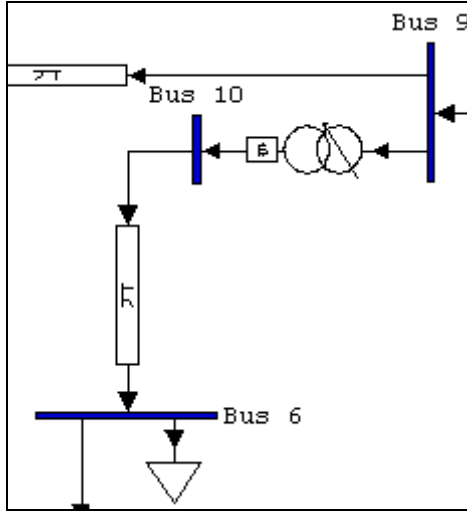
SIMPOW programı elektrik güç sistemlerinde dijital simülasyon ve analiz yapan ABB tarafından geliştirilen ve daha sonra STRI grubuna geçen bir güç sistemleri analiz programıdır [4]. PSAT programı ise Waterloo Üniversitesinden Federico Milano tarafından bir MATLAB alt programı olarak dizayn edilen ve gelişmekte olan bir güç sistemi analiz programıdır [5].



Şekil 2 Dokuz Baralı Test Sistemi

Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar, güç sistemleri analizi için kullanılan bu iki programın da FKT analizleri için kullanılabileceği ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

FKT'nin etkilerini detaylı inceleyebilmek için 9 ve 6 nolu baralar arasındaki hattın başına 0.02 pu empedansa sahip bir FKT eklenmiştir. Bu durum şekil 3'de gösterilmiştir. 9 baralı sistemde 1, 2 ve 3 nolu baralara bağlanmış trafoların FKT olarak düzenlenmemesinin nedeni, yük paylaşımını, yük düzenlemesini ve çevrim akışlarını kontrol edebilecek bir paralel sistem içinde bulunmayışlarıdır.



Şekil 3 FKT'nin 9 ile 6 nolu baralar arasına yerleşimi

A. İletim hattı güç akışı düzenlemesi

Sistemdeki güç akışları, 9 ve 10 nolu baralar arasına yerleştirilmiş FKT'nin dört farklı faz açısı için incelenmiş, elde edilen sonuçlar tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Faz açısı değişiminin yük akışına etkisi

BARA	AÇI (°)	0	5	10	15
		AKTİF GÜÇ (MW)			
Bus9	Bus8	25,709	38,448	51,157	63,787
Bus7	Bus8	74,844	62,052	49,356	36,803
Bus10	Bus6	59,291	46,552	33,843	21,213
Bus7	Bus5	88,157	100,948	113,644	126,197
Bus5	Bus4	-39,225	-27,173	-15,317	-3,702
Bus6	Bus4	-31,990	-44,241	-56,584	-68,971
Bus9	Bus10	59,291	46,552	33,843	21,213
Bus2	Bus7	163,000	163,000	163,000	163,000
Bus3	Bus9	85,000	85,000	85,000	85,000
Bus1	Bus4	71,642	71,933	72,600	73,640

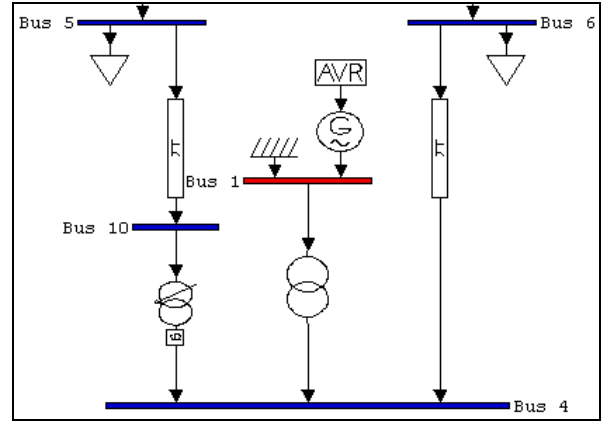
Tablo 1 incelendiğinde, FKT ile faz açısı değişiminin, 1,2 ve 3 nolu baralardaki üretimde önemli bir değişime neden olmadığı ve yük akışlarının açığa

bağlı olarak istenilen şekilde düzenlenebileceği görülmektedir.

Bu analizde FKT'nin reaktif güç akışlarına önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Reaktif güç değişimi ancak yük altında kademe değiştiricili transformatörler ile sağlanabilir.

B. Çevrim akışının kontrolü

Kompleks sistemlerde bir bölgedeki yük arttırımı sonucu ihtiyaç duyulan güç, sistem empedanslarına göre bu bölgeye değişik baralardan gelir. Bu da kontrolsüz bir şekilde güç akışına neden olur. FKT kullanarak bu güç tek bir noktadan sağlanarak diğer baralardaki güç akışları korunabilir. Bu durumu göstermek için FKT 5 ve 4 nolu baralar arasındaki hattın sonuna yerleştirilmiştir.



Şekil 4 FKT'nin 5 ile 4 nolu baralar arasına yerleşimi

Bara 6'daki yükün %50 azaltılması ve %50 arttırılma durumundaki yük akışları incelenmiş ve sonuçlar tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Yük değişiminin güç akışlarına etkisi

BARA	YÜK(%)	50	100	150
		AKTİF GÜÇ (MW)		
Bus9	Bus8	31,637	25,709	19,700
Bus7	Bus8	68,883	74,844	80,899
Bus9	Bus6	53,363	59,291	65,300
Bus7	Bus5	94,117	88,157	82,101
Bus5	Bus10	-33,595	-39,225	-44,972
Bus6	Bus4	7,330	-31,99	-71,269
Bus10	Bus4	53,363	59,291	65,300
Bus2	Bus7	163	163	163
Bus3	Bus9	85	85	85
Bus1	Bus4	26,502	71,642	117,388

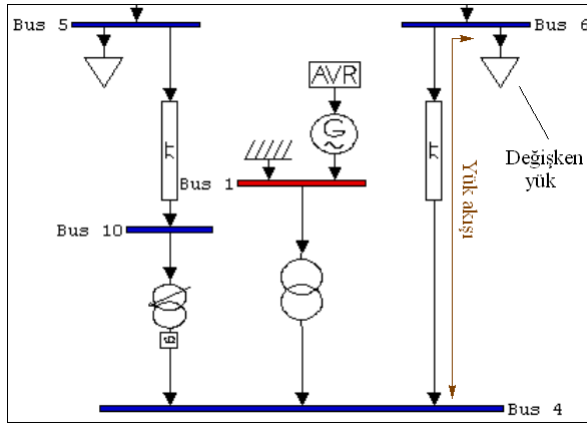
Tablo 2'den görüldüğü gibi tüm baralarda güç akışları değişmektedir. Bir noktadan kaynaklanan güç değişimi hat empedanslarına bağlı olarak tüm sistemi etkilmektedir. Sistemde kontrollü bir güç akışı için

yük değişimin sadece 6 ile 4 nolu baralar üzerinden sağlanması amaçlanmıştır. Bunu sağlamak için %50 fazla yükte faz açısı değişimi 2.4° , %50 az yükte ise -2.3° olması gerektiği hesaplanmış ve bu durumlar için güç akışları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Yük değişiminde çevrim akışlarının faz açısı değişimi ile önlenmesi

YÜK ve AÇI		normal yük 0° faz açısı değişimi	%50 fazla yük ve 2.4° faz açısı değişimi	%50 az yük ve -2.3° faz açısı değişimi
BARA		AKTİF GÜÇ (MW)		
Bus9	Bus8	25,709	25,772	25,757
Bus7	Bus8	74,844	74,780	74,796
Bus9	Bus6	59,291	59,228	59,243
Bus7	Bus5	88,157	88,220	88,204
Bus5	Bus10	-39,225	-39,170	-39,179
Bus6	Bus4	-31,99	-77,067	12,969
Bus10	Bus4	59,291	59,228	59,243
Bus2	Bus7	163	163	163
Bus3	Bus9	85	85	85
Bus1	Bus4	71,642	117,486	26,499

Yük akışları ve gerekli faz kaydırma açı değerleri 2 nolu denklemde de görüleceği gibi doğrudan FKT’nin reaktansı ile ilgilidir.

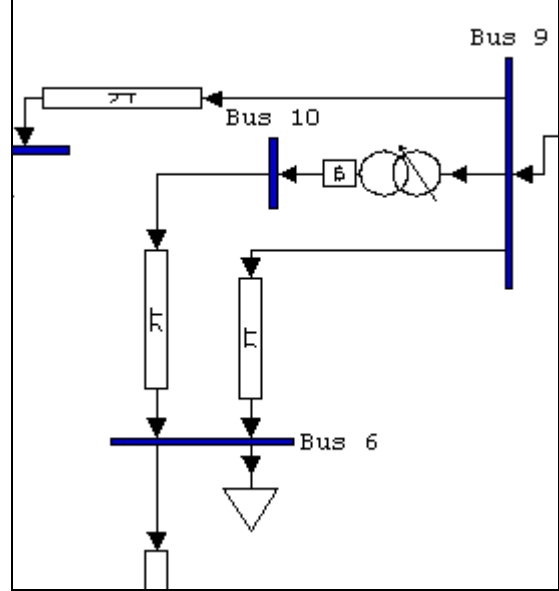


Şekil 5 Yük değişiminde FKT kullanımı ile gerçekleştirilen yük akışı

Yukarıdaki şekil Tablo 3’ü açıklamaktadır. Tablo 3 değerleri yukarıdaki şekilde bulunan 6 nolu baradaki yük değişimi sırasında, yükün yalnız 1-4-6 nolu baralar arasında akmasını sağlayacak faz kaydırma açılarındaki yük akışlarıdır. Faz kaydırmanın değişken yüke göre doğru ayarlanması ile 6 nolu baraya, 9 nolu baradan gelen yük akışı ve 10 nolu baradan 4 nolu bara yardımı ile gelebilecek yük akışları değişmemiştir. Böylece yük değişimi sırasında yükün çevrim akışlarını oluşturmayacak yerden sağlanması mümkün olur. Bu da hatların optimum dizayn edilmesini sağlar.

C. Paralel hatlarda güç paylaşımı

9 baralı test sisteminde güç paylaşımını analiz edebilmek için 9 ile 6 nolu baralar arasındaki hat iki hat olarak düzenlenmiş ve reaktansı düşük olan hatta FKT yerleştirilmiştir. Bu durumda elde edilen yük akışları ve eşit yük paylaşımı için FKT’nin 0° ve 5° ’lik faz kaydırma durumlarındaki yük akışları tablo 4’de verilmiştir.



Şekil 6 FKT’nin güç paylaşım özelliğini göstermek için 9 baralı sistemde yapılan düzenleme

Tablo 4. 0° ve 5° faz kaymasındaki yük akışları

BARA NO		0° Faz kaydırmada yük akışı	5° Faz kaydırmada yük akışı
Bus9	Bus8	29,5605	39,9991
Bus7	Bus8	71,0664	60,586
Bus10	Bus6	41,2549	22,6371
Bus7	Bus5	91,9336	102,414
Bus5	Bus4	-35,5444	-25,6639
Bus6	Bus4	9,1987	-1,0983
Bus9	Bus6	14,1845	22,3638
Bus9	Bus10	41,2549	22,6371
Bus2	Bus7	163	163
Bus3	Bus9	85	85
Bus1	Bus4	27,2262	27,6388

Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi, 9-10 ve 9-6 baraları arasındaki paralel hatlarda yükler, 5° faz kayması durumunda eşitlenmektedir. Böylece hatlar termal değerlerine kadar kontrollü bir şekilde yüklenebilirler. Ancak bu kontrol sağlanırken diğer hatlardaki yük değişimlerinin de sınırlar içinde olmasına dikkat edilmelidir.

5. SONUÇ

Varolan iletim sistemleri, en yüksek verim alabilmek için performans kapasitelerinin sınırlarına kadar yüklenirler. Böyle bir sistemde ekonomik olarak güvenli ve güvenilir bir işletme sağlanabilmesi için güç akış düzenleme gerekliliği kaçınılmazdır. Bu çalışmada FKT'lerin iletim sistemindeki aktif gücün kontrol edilmesine yardımcı olduğu, yük arttırımı durumlarında da, ihtiyaç duyulan gücün istenilen bölgeden alınabilmesini sağladığı görülmüştür. Böylece güç istenmeyen noktalarda dolaşmamakta ve iletim sisteminin optimum kullanılması sağlanmaktadır. Çalışmada ayrıca FKT'lerin paralel sistemlerde güç paylaşımındaki etkinliği kanıtlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Setlinger W, Phase Shifting Transformers, VATECH TRANSMISSION AND DISTRIBUTION, 2001
- [2] Kundur, P. Power System Stability and Control, 1994
- [3] Review of Semiconductor Controlled Phase Shifters for Power System Applications, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 9, No.4, Nov. 1994
- [4] SIMPOW Power System Simulation & Analysis Software, Release 10.2, Copyright(c) STRI AB, 2004
- [5] M. Federico, Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 1.3.0 May 1, 2004