

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

Mehmet TÜMAY¹, Tuğçe DEMİRDELEN², Selva BAL³, Burcu Doğru⁴

Abdullah CİCİBAŞ⁵, Ahmet Kerem KÖSEOĞLU⁶, Mahmut AKSOY⁷

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Çukurova Üniversitesi, Adana, Turkey

mtumay@cu.edu.tr, tdemirdelen@cu.edu.tr,

³Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

İskenderun Teknik Üniversitesi Hatay, Turkey

selva.bal@iste.edu.tr,

⁴Elektrik Üretim A.Ş. – Seyhan HES/ADANA

burcu.dogru@euas.gov.tr

^{5,6,7}Best Transformer, Turkey

abdullah.cicibas@besttransformer.com, kerem.koseoglu@besttransformer.com, mahmut.aksoy@besttransformer.com

Özet

Son yıllarda enerji tüketiminin artması ile birlikte enerji kaynaklarının ekonomik ve güvenli bir şekilde kullanımı önem kazanmıştır. Bu durum, gücün güvenli ve kontrollü olarak aktarılması, kullanılması ve güç sistemlerinin sağlıklı işletilebilmesine bağlıdır. Faz kaydırıcı transformatörler (FKT), iletim hattı üzerinde güç akışı kontrolünü sağlamaya yarayan özel tip transformatörlerdir. Bu çalışmada, FKT'nin dünyadaki durumu ve uygulama alanları ile ilgili literatür incelemesi ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışma, FKT teknolojisinin durumu ve güç akışı sorunları ile ilgili uygulama mühendisleri ve araştırmacılara geniş bir perspektif sunmayı amaçlamıştır. Konuyla ilgili 30'dan fazla araştırma yayınının bir listesi de hızlı bir başvuru için eklenmiştir.

Anahtar Kelimeler-Faz Kaydırıcı Transformatör, güç akışı, literatür taraması, uygulamalar.

Abstract

In recent years, the economically and safely usage of energy resources become important with increasing energy consumption. This case is concerned with transporting and using energy in safely and controlled, operating the power systems in safely. Phase shifting transformers (PSTs) are special type transformers supplied to control power flow through the distribution lines. This paper presents a comprehensive review of the current status of PST around the world and applications areas. It is aimed at providing a broad perspective on the status of PST's technology to the researchers and the application engineers dealing with power quality issues. A list of more than 30 research publications on the subject is also appended for a quick reference.

Keywords-Applications, literature survey, phase shifting transformer, power flow.

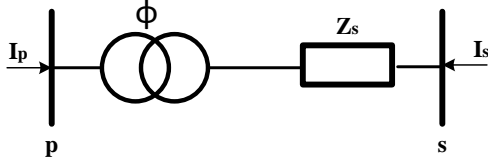
1. Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte hızlı bir sanayileşme ve şehirleşme ortamının olması, nüfusun hızla artması, enerji tüketiminin vazgeçilmez bir şekilde büyümesi, teknolojinin yaygınlaşmasını ve mevcut enerji kaynaklarının ekonomik ve güvenli bir şekilde kullanılmasını gerekli kılar. Bu durum, gücün güvenli ve kontrollü olarak aktarılması, kullanılması ve güç sistemlerinin sağlıklı işletilebilmesine bağlıdır.

Güç sistemlerinde gerilim düzenleyici transformatörler kullanılarak aktif ve reaktif güç akışı kontrolü sağlanmaktadır. Gerilim düzenleyici transformatörler içerisinde kademe ayarını değiştirerek bara gerilimini istenilen değerde tutup reaktif güç akışını düzenlemek için kademe değiştirici transformatörler ile hat sonundaki gerilimin faz açısını ayarlamak suretiyle aktif güç akışını düzenleyen çeşitli cihazlar kullanılmaya başlamıştır. Bu transformatörlerden biri de Faz Kaydırıcı Transformatörlerdir [1-34]. Bu tip transformatörler, iletim hattı üzerinde güç akışı kontrolünü sağlamaya yarayan özel tip transformatörlerdir. Giriş gerilimini içerisindeki özel sargı yapısı sayesinde çıkışta farklı faz açısına sahip bir gerilim olarak sisteme verir. Bu durum, sisteme farklı faz açısına sahip bir gerilim enjekte etmek olarak da nitelendirilebilir. FKT transformatörleri, yüksek gerilim şebekelerinin bağlantı noktalarında, enerji akış yönünü belirlemek için kullanılırlar. Bunun için özel bir sargı yapısıyla çıkışlarında girişlerinden farklı bir faz açısı elde edilmeye çalışılır. Bu transformatörlerde güç ve gerilim en başta

kullanılan şalterin kapasitesiyle sınırlıdır. Ayrıca şebekede üstlendikleri rolden ötürü, müşteri ve şebeke talepleri iyi anlaşılmalıdır.

FKT'nin temel fonksiyonu, faz açısını değiştirerek bir iletim hattı üzerindeki güç akışını kontrol etmektir. Bu faz kaydırma işlemi, hattın faz gerilimine bir değiştirilebilir gerilim bileşeni ilave edilerek veya çıkarılarak yapılır. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğeri Şekil 1'de gösterilmiştir. Burada ϕ faz kaydırıcı transformatörün açısıdır.



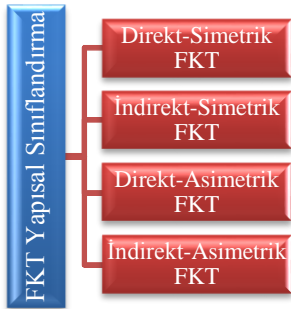
Şekil 1. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğeri

Bir FKT tasarımında, cihazın kullanılacağı sistemin oldukça iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Böylece, özellikle farklı bölgelerde yer alan birbirinden bağımsız şebekeler için yapılan uygulamalarda oldukça etkin sonuçlar elde edilebilir. Bu, uygulama yapılacak sistemin parametrelerinin, FKT'nin aktif güç akışı kontrolündeki etkinliği için oldukça önemli olduğu anlamına gelir.

FKT için kullanılan hesaplama parametreleri bağlantı şekli gibi faktörlere göre farklılık gösterse de iletilen aktif güç değişimi kayma açısı ile kontrol edilir ve genel olarak bu aktif güç miktarı aşağıdaki (1) nolu formülle ifade edilebilir:

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

FKT'ler genellikle 420 kV ve üzeri yüksek gerilim seviyesi ve 1630 MVA'dan daha yüksek güçteki iletim hatlarında kullanılırlar ve seri FACTS cihazları arasında yer alırlar.



Şekil 2. FKT Yapısal Sınıflandırması

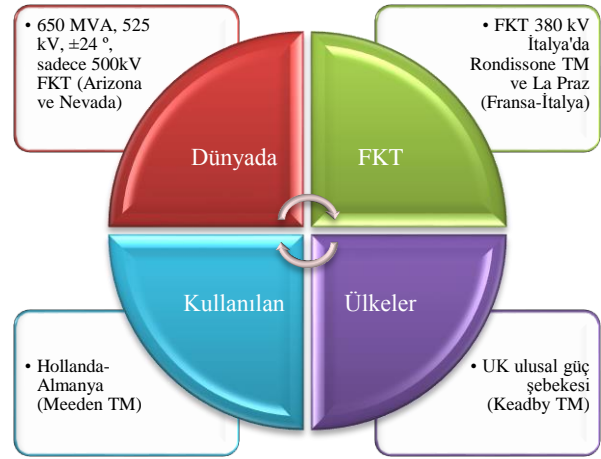
Şekil 2'de FKT yapısal sınıflandırması görülmektedir. İlk yapı olan Direkt-Simetrik FKT yapıda tek bir nüve bulunmaktadır. Giriş gerilimi ile aynı genlikte fakat farklı bir faz açısına sahip bir çıkış gerilimi üretilir. İndirekt-Simetrik FKT yapıda ise iki ayrı transformatör bulunmaktadır. Bu transformatörlerden biri uyarım transformatörü, diğeri ise seri transformatördür. Uyarım transformatörü, karesel gerilim genliğini regüle etmek için, seri transformatör ise bu karesel

gerilimi uygun faza uygulamak için vardır. Yapının simetrik olmasından dolayı giriş gerilimi ile aynı genlikte fakat farklı bir faz açısına sahip bir çıkış gerilimi üretilir. Bir diğer yapı olan Direkt-Asimetrik FKT, direkt yapıda olduğu için bu transformatörde de tek nüve bulunur. Ancak asimetrik yapıda olması simetrik yapıdan farklı bir çıkış gerilimi sonucu ortaya çıkarır. Bu durumda çıkışta farklı genlik ve farklı faz açısına sahip bir gerilim elde edilir. Son yapı olan İndirekt-Asimetrik FKT transformatörler bir ikaz ve bir seri transformatörden oluşur. Sistemin durumuna göre tek bir hazne veya iki ayrı hazne içinde olabilirler. Asimetrik yapıdan dolayı çıkışta farklı genlik ve farklı faz açısına sahip bir gerilim elde edilir.

FKT'ler AC iletim sistemlerinde kullanıldığı gibi DC güç kaynakları için de kullanılır. Herhangi bir filtre kullanılmadığı takdirde şebeke gerilim ve akımındaki ve aynı zamanda yük gerilimindeki harmonikleri büyük ölçüde azaltırken, bir LC filtresi kullanıldığında harmonik azaltımının yanı sıra işletme koşullarına etkiyen parametrelerde de iyileşme sağlayabilir.

FKT'lerde çeşitli sargı düzenleri görülür. Yıldız, üçgen ve zigzag sargı düzeninin yanında son zamanlarda altgen düzen üzerine çalışmalar da yapılmaktadır.

Son yıllarda dünyada da çok yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Şekil 3'de dünyadaki kullanımı görülmektedir.



Şekil 3. Dünyada FKT'nin durumu

Ülkemizde de FKT'nin önemi yeni yeni ortaya çıkmış olup ilgili çalışmalar devam etmektedir.

Bu çalışmada, FKT hakkında genel bir bilgi verilerek uygulandığı alanlar hakkında literatür incelemesi ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışmada, FKT teknolojisinin durumu ve güç akışı sorunları ile ilgili uygulama mühendisleri, araştırmacıları üzerinde geniş bir perspektif sunmayı amaçlamıştır. Konuyla ilgili 30'dan fazla araştırma yayınının bir listesi de hızlı bir başvuru için eklenmiştir.

2. Uygulama Alanları

Faz kaydırmalı transformatörler, güç sistemlerinde güç akışı kontrolü, çift yönlü güç akışı, dinamik güç akışı denetleyicisi, birleşik güç akışı denetleyicisi, uluslararası güç iletim şebekesinde kapasite artırımı ve arıza durumlarında uluslararası güç hatlarını koruma, yük geçişlerinde uluslararası şebeke sorunlarını çözme, fiderlerin gerilim ve yüklenmesinin iyileştirilmesi, çok yüksek gerilim enterkonnekte iletim hatları,

çok seviyeli evirici, konvertör faz arası transformatör, gerilim kontrolü ve regülasyonunun iyileştirilmesi, dinamik gerilim düzenleyicisi, statik frekans konvertörü, değişken frekanslı sürücülerin ve çok modüllü matris konvertörünün beslemesi, değişken frekanslı transformatör, yüksek gerilim hatlarında buz çözme, çamaşır suyu üretim tesislerinde harmoniklerin azaltılması uygulamalarında kullanılmaktadır.

Çok-modüllü evirici sistemlerde sinüzoidal olmayan gerilim sinyallerini, sinüs gibi merdiven dalga şekline çevirmek için, yuvarlak biçimli yeni bir FKT önerilmiştir. Standart FKT'lerin kurulum ve çalışma zorluklarından dolayı, indüksiyon motora benzer yuvarlak biçimli bir FKT sunulmuştur. Yeni FKT'nin nüve yapısı simetrik ve daha kompakttır. Sargı yapısı ve bağlantısı da standart FKT'lerden daha basittir. Yeni FKT'nin matematiksel modeli tasarlanarak benzetimi yapılmış ve bir prototip üzerinde uygulanmıştır. Sonuçların yeni yuvarlak biçimli FKT'yi doğruladığı ortaya konmuştur [1].

Çift yönlü güç akışı sağlamak, FKT'nin yapısını sadeleştirmek ve saf PWM eviriciye kıyasla maliyeti düşürmek için yeni kompozit kaskat bağlı çok seviyeli bir evirici sunulmuştur. PWM güç ünitelerinden tüm yenilenebilir enerjinin geri beslemesi için bypass yöntemi kullanılmıştır. Matlab/Simulink tabanlı benzetimler ve deneysel bir prototip önerilen tekniğin uygulanabilirliği ve geçerliliğini doğrulamaktadır. Önerilen yöntemin çift yönlü güç akışını, DC gerilimin güvenliğini ve kararlılığını, azaltılmış IGBT sayısı ve basitleştirilmiş FKT yapısı sayesinde maliyet düşüşünü sağlanabildiği ortaya konmuştur [2].

Bilinen 24-darbeleri diyot konvertörde ($24n \pm 1$), harmonikleri azaltmak için bir kompanzasyon yöntemi sunulmuştur. Üstelik önerilen yöntemin, iki FKT'nin oransız paylaşılan hat akımlarının üstesinden geldiği belirtilmiştir. 24-darbeleri konvertör faz-arası transformatörler (FAT) aracılığıyla DC tarafta paralel bağlıdır. Birinci-kademeli FAT'larda fazlardan bir sargı bulunur. Bu sargının, tüm AC hat akımlarındaki harmonikleri ortadan kaldırmak için kompanzasyon akımı enjeksiyonunu ve iki FKT'nin eşit-paylaşılan primer hat akımlarını sağladığından söz edilmiştir. Benzetim ve deney sonuçları önerilen yöntemi doğrulamaktadır [3].

Paralel çok yüksek gerilim (EHV) enterkonnekte hatlarında FKT'ler kullanılarak planlanmamış güç akışlarının kontrolü incelenmiştir. Boylamsal bir iletim şebekesinde FKT modellenmiştir. Tunus-Cezayir 400 kV/225 kV paralel iletim hatlarında bu modelin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çeşitli mekânlar, çalışma senaryoları ve kontrol alternatifleri test edilmiştir. FKT tabanlı çözümler güç akışı kontrolü, gerilim beslemesi ve maliyet açısından incelenmiştir. FKT'nin hattın aktif gücünü kontrol edebildiği ve gerilim kararlılık marjini azalttığı görülmüştür. Bununla birlikte, FKT'nin gerilim kararlılığını iyileştirmede yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yüzden, FKT'nin gerilim denetleyicisi olmak yerine, güç akışı denetleyicisi olarak kabul edildiği ortaya konmuştur [4].

Literatürdeki FKT uygulamaları güçlerine göre düşük, orta ve yüksek güçlü uygulamalar olmak üzere ayrıca üç sınıfa ayrılırlar.

2.1. Düşük Güçlü Uygulamalar

Anma gücü 100 kVA'dan küçük olan uygulamalar düşük güç sınıfına dahil edilmiştir. FKT'ler dinamik gerilim düzenleyicisi, dinamik güç akış denetleyicisi, statik frekans

konvertörü, laboratuvar ve test amaçlı FKT'lerde kullanılmaktadır.

FKT, AC-link ve vektör anahtarlama matris konvertörü içeren 0,225 kVA yük kapasitesine sahip yeni bir dinamik gerilim düzenleyicisinin dinamik modellemesi ve geri besleme denetleyici tasarımı sunulmuştur. Önerilen modeli bir prototiple doğrulamak amacıyla, kapalı çevrim için deneysel sonuçlara da yer verilmiştir. Gerilim yükselme/çökmelerini dengelemek için PI denetleyicinin iyi bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır [5].

Tristör anahtarlı reaktanslar ile bütünleşik halde bulunan, bilinen bir FKT içeren dinamik güç akış denetleyicisinin (DGAD) ilk donanımsal model uygulaması sunulmuştur. Kullanılan FKT düşük maliyetli büyük bir kontrol aralığı sağlamaktadır. Donanımsal model 1/1000 oranında ve faz-faz arası gerilim 380 V olarak küçültülmüştür. Ölçüm sonuçları gerçek bir test prototipinde elde edilmiştir. Önerilen model, DGAD modelinin parametre hesabı, tasarımı, DGAD denetleyicinin uygulaması, koruma cihazlarının kurulumu ve DGAD'nin dinamik analizi için uygun görülmüştür. Yine de bu prototip DGAD'nin ilk prototipi olduğundan dolayı bazı deneylerde tristör ayarlı reaktörlerin reaktif güç talebiyle ilgili bazı sorunlar ortaya çıkabileceği ve şebeke topolojisine bağlı olarak rezonans oluşabileceği belirtilmiştir [6].

45 KVA üretim kapasiteli bir pompalı hidrolik santralde senkron motora yol vermek için kullanılan kaskat bağlı çok seviyeli H-köprü tabanlı yeni bir statik frekans konvertörü (SFK) sunulmuştur. SFK sistemi, FKT, 27 özdeş güç hücresi (faz başına 9 güç hücresi) ve denetleyiciden oluşmaktadır. FKT her güç hücresine güç sağlamaktadır. Transformatörün sekonder sargılarında dokuz farklı faz grubu bulunmaktadır. Bu farklı faz grupları sayesinde, 54-darbeleri doğrultucu modu elde edildiği ve 53. mertebenin aşağısındaki harmoniklerin azaltıldığı tespit edilmiştir [7].

Özel transformatörlerde faz kaymasının önemi ve özel transformatörler olarak FKT'lerin saha testleri sunulmuştur. 0,5 kVA gücünde bir transformatör prototipi üretilmiş ve test edilmiştir [8].

Güç sistemi laboratuvarında eğitim ve araştırma amaçlı kullanılmak üzere, çift nüveli asimetrik 10 KVA gücünde bir FKT'nin kademe değiştiricisinin üretimi sunulmuştur [9].

2.2. Orta Güçlü Uygulamalar

Orta güç sistemleri, anma gücü 100 KVA ile 10 MVA arasında olan uygulamalar için kullanılmaktadır. Orta güç seviyesinde, FKT'ler değişken frekanslı sürücülerin ve çok modüllü matris konvertörünün beslemesinde kullanılmıştır.

Petrol tesislerinde, değişken frekanslı sürücülerin (DFS) beslemesinde yaygın olarak kullanılan FKT'lerin bakım ve onarımı için frekans cevabı analizi (FRA) yöntemi ortaya konmuştur. Petrol tesisinde üç adet 12-darbeleri DFS'yi besleyen 2 MVA gücünde bir FKT ve laboratuvar testlerinde FRA analizi için poligon sargılı 150 KVA gücünde bir FKT sunulmuştur. Bu testlerde, test gruplarının frekans cevabındaki etkisinin, kademe değiştiricinin konumunun etkisinden daha önemli olduğu belirtilmektedir. Belirli bir kademedeki sağlıklı bir FKT'nin üç fazı için empedans karakteristikleri birbirine benzerken, transfer fonksiyonunun genliğinin daha farklı olduğu görülmektedir [10].

Çok modüllü bir matris konvertöründe (MMC) yüksek gerilim ve yüksek güç seviyesine ulaşmak için, MMC'nin modülleri FKT'nin yalıtılmış sekonder sargılarıyla

beslenir. FKT ile beslenen MMMC için yeni bir modülasyon yöntemi olarak faz kaymalı modülasyon tekniği önerilmiştir. Önerilen yöntem, çok seviyeli çıkış gerilimi dalga şekillerine yoğunlaşmasına rağmen, sinüzoidal giriş akımının da iyi şekilde elde edilebildiği görülmüştür. Önceki yöntemlere kıyasla önerilen yöntemin, giriş güç katsayısını ayarlayamayacağı, bunun yanı sıra güç kayıplarının daha az indirildiği elde edilmiştir. Simülasyon için sistemin anma gücü 1 MVA, deneysel prototipin anma gücü ise 5 kVA olarak belirlenmiştir. Bu güç değerleriyle bu çalışma hem orta hem de düşük güçlü uygulamalara örnek gösterilebilir [11].

2.3. Yüksek Güçlü Uygulamalar

Anma gücü 10 MVA'dan yüksek olan uygulamalar yüksek güçlü olarak sınıflandırılabilir. Yüksek güçlü sistemlerde birçok uygulaması bulunan FKT'ler, güç sistemlerinde güç akışı kontrolü, birleşik güç akışı denetleyicisi, uluslar arası güç iletim şebekesinde kapasite artırımı ve arıza durumlarında uluslar arası güç hatlarını koruma, yük geçişlerinde uluslar arası şebeke sorunlarını çözüme, fiderlerin gerilim ve yüklenmesinin iyileştirilmesi, değişken frekanslı transformatör, yüksek gerilim hatlarında buz çözme, çamaşır suyu üretim tesislerinde harmoniklerin azaltılması, gerilim kontrolü ve regülasyonunun iyileştirilmesi uygulamalarında kullanılmaktadır.

Hollanda'da uluslararası mevcut iletim kapasitesini artırmak amacıyla FKT'ler kurulmuştur. Alternatif tasarımlar için Meeden'da 1000 MVA gücündeki FKT'lerin tasarımına ilişkin teknik özellikler ve bu özelliklere dair kısıtlamalar ortaya konmuştur. FKT'nin primer ve sekonder sargılarında diferansiyel koruma yöntemi uygulanmıştır. Tek fazlı bir transformatör ve işletme özellikleri de sunulmuştur [12].

FKT'ler Simetrik/Asimetrik, Direkt/İndirekt özelliklerine göre türlere ayrılmıştır. Daha önce de bahsedilen Hollanda, Meeden'daki FKT uygulamaları diğer araştırmacılar tarafından da incelenmiştir. Aynı zamanda FKT'nin becerilerini göstermek için gerçek zamanlı dijital simülatörde (RTDS) bir model tasarlanmıştır. Asimetrik FKT'nin Simetrik FKT'ye göre daha basit olduğu, değişken gerilimli olduğu; İndirekt FKT'nin de Direkt FKT'ye göre daha basit yapıda fakat daha yüksek maliyetli olduğu görülmüştür [13].

Fransa şebekesindeki FKT uygulamaları ve Fransız imalatçıların diğer şebekeler için özel FKT uygulamaları tanıtılmıştır. Şartname, tasarım ve test aşamaları detaylıca sunulmuştur. Bunların sonucunda, FKT'nin seri empedansının sistem empedansından çok küçük olduğunu ve kısa devre geriliminin yüksek olacağı ortaya çıkmıştır. Üstelik FKT'nin bağlantıları daha karmaşıktır ve şebekeyi trip durumuna karşı korumak için gereklidir. 312 MVA, 400 MVA, 1181 MVA, 61 MVA, 438 MVA, 438 MVA güçlerinde FKT'ler ve 125 MVA, 675 MVA güçlerinde özel FKT uygulamaları gerçekleştirilmiştir [14].

Belçika ve Fransa sınır bölgesinde, Monceau transformatör merkezinde (TM), uluslararası güç hatlarında ya da komşu enterkonnekte şebekelerde bir arıza olması durumunda, aşırı yüklenmeye karşı güç hatlarını korumak için FKT uygulanmıştır. Belçika şebekesindeki güç akışının kontrolü için 400 MVA gücünde bir FKT ve işletme özellikleri sunulmuştur [15].

Belçika şebekesinde beklenmeyen yüksek güç geçişleri gibi sınır ötesi kapasiteyi etkileyebilecek uluslar arası şebeke sorunlarını çözmek için büyük güçlü FKT'lerin fiili kullanımı ve saha uygulamaları incelenmiştir. Belçika şebekesi

kuzey sınırında 1400 MVA gücünde İndirekt-Simetrik 3 adet FKT'nin tasarım ve performansı sunulmuştur. Bu sayede, FKT'nin modellenmesi ve diğer FKT'ler ile koordinasyon sağlanması hakkında bilgi verilmiştir. Belçika'da FKT'lerin şebeke güvenliği ve verimliliğinde önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır [16].

Belçika güç sisteminde bir vaka çalışması için yatırım, planlama, zamanlama ve güç akışı kontrol cihazlarıyla yapılan çalışmalar sunulmuştur. Bu inceleme bilinen FKT ve gerilim kaynağı dönüştürücüsü (GKD) HVDC olarak iki yöntemden oluşur. İlk durumda, tam sınır kontrolünü sağlamak için üç adet 1400 MVA gücünde İndirekt-Simetrik FKT kurulmuştur. Dolayısıyla bu yolla güç akışları daha esnek bir biçimde kontrol edilebilir. Bu FKT'lerin koordine edilmesiyle de 2500 MW güç akışının Belçika güç şebekesini etkileyeceği belirtilmiştir [17].

Güç akışı ve asenkron bağlantıları geçici kararlılık çalışmaları için uygun olduğundan dolayı, $\pm 180^\circ$ arasında ayarlanabilen faz kayma açısıyla 100 MVA gücünde FKT şeklinde gösterilen, değişken frekanslı transformatör (DFT) modeli sunulmuştur. Geçici benzetimlere göre önerilen DFT modelinin arıza durumunda bile güç akışını kontrol edebildiği görülmüştür. Baja Kaliforniya (BK) ve Meksika ulusal enterkonnekte sistemini (MUES) bağlamak ve DFT tabanlı bir çözümün güç akışı kontrolünde uygulanabilirliğini göstermek için üç adet DFT içeren asenkron bağlantı test durumu sunulmuştur. Daha da önemlisi, DFT üniteleri yakınındaki bir üç faz hatasından sonra, BK ve MUES sistemlerinin kararlılığını sürdürdüğü görülmüştür [18].

Bilinen FKT'ler seri reaktif elemanlarla kullanıldığında, TM yükseltme/kaynak paylaşma, şebeke ayırma, desteklenmiş FKT (Assisted PST) kullanarak güç akışı kontrolü ve yüksek gerilim hatlarında buz çözme gibi yeni FKT uygulamaları ortaya çıkmaktadır. Analitik yöntem olarak güç denetleyicisi düzlem yöntemi de önerilmiştir. 240 MVA gücünde, Arizona ve Kaliforniya arasında Mead-Phoenix Projesi'nde iki tane paralel bağlı 650 MVA gücünde, Newyork ve Vermont arasında Plattsburgh TM'de 175 MVA gücünde FKT'lerden söz edilmektedir [19].

Rio de Janeiro'da gerilim kontrolünü iyileştirmek, iletim hatlarındaki elektrik kayıplarını azaltmak ve enerji güvenliğini sağlamak amacıyla yeni bir bağlantı noktası oluşturmak için 400 MVA gücünde çift nüveli FKT ile seri bağlı bir transformatöre dayanan bir çözüm önerilmiştir. Faz açısı değişimiyle güç akışını kontrol eden FKT'nin sargı bağlantıları ve performansı da sunulmuştur [20].

İtalya şebekesinde güç akışı kontrolünü sağlamak için kullanılan FKT'lerin özellikleri, çalışma ve bakım ayarları sunulmuştur. Yük altında kademe değiştiricinin (YAKD) maksimum anahtarlama gücü, kısa devre dayanımı ve nakliyesi gibi tasarım kısıtlarından söz edilmiştir. Dielektrik testleri ve termal fabrika testlerinde karşılaşılan birtakım zorluklardan bahsedilmiştir. FKT'lerin koordinasyonu ve dünyadaki FKT uygulamaları anlatılmıştır. İtalya şebekesinde önemli bir konumdaki Rondissone TM'de yer alan 528 MVA gücünde iki FKT uygulaması detaylıca sunulmuştur. Bakım, durum izleme, Kuzey İtalya enterkonnekte şebekesinde FKT'nin etkisi, La Praz'daki FKT ile diğer üç FKT'nin koordinasyonu da anlatılmıştır. Avrupa'da ülkeler arasında güç akışını optimize etmek için Hollanda-Almanya enterkonnekte şebekesinde Meeden TM'de, Fransa-İtalya enterkonnekte şebekesinde La Praz TM'de ve UK ulusal şebekesinde Keadby TM'de FKT uygulanmıştır [21].

İtalya iletim şebekesinde güç akışını optimize etmek ve sistem güvenliğini artırmak amacıyla yeni FKT'lerin tasarım, imalat, test ve modellemesi sunulmuştur. Fransa şebekesiyle güç alış veriş için Camporosso TM'de 450 MVA gücünde bir FKT, Adriyatik Omurgasında güç akışını kontrol etmek için Foggia TM'de 1800 MVA gücünde dört FKT, Villanova TM'de iki FKT kurulmuştur. Simetrik ve çift yönlü FKT'ler iki ayrı haznede seri ve uyarım birimleri ile çift nüveli yapıya sahiptir. Uyarım birimindeki yük altında kademe değiştirici faz kayması regülasyonunu sağlarken, seri birimdeki ileri-geri anahtar regülasyonu tersine çevirir. Villanova ve Foggia FKT'lerinin dielektrik ve elektromanyetik özellikleri detaylıca incelenmiştir. Ayarlama açısının büyük olması gerektiğinde, Simetrik, çift nüveli, çift hazneli FKT'ler yüksek güç, daha az nakliye yükü ve sıfır derece faz kaymasında bile sıfırdan farklı kısa devre empedansı elde etmek için en iyi çözüm olarak kabul edilmelidir [22].

Çek Cumhuriyeti güç şebekesinde FKT'nin uygulanma olanakları, FKT'ler için uygun cihaz tipleri, ana parametreler ve yer tespiti komşu şebelere etkisiyle birlikte incelenmiştir. İlk kademede 800-1000 MVA anma gücünde, ikinci kademede 400 MVA anma gücünde FKT uygulanması önerilmiştir. FKT'lerin bu bölgede etkin bir şekilde kullanılabilmesi, diğer aktif güç akışı kontrol cihazlarından daha etkili olduğu, güç elektroniği tabanlı FACTS cihazlarından daha düşük maliyetli fakat daha yavaş olduğu da belirtilmektedir. Bu nedenle hızlı tepki süresinin şart olmadığı durumlarda, FKT'lerin güç akışı kontrolü için çok kullanışlı olduğu ortaya konmuştur. Bunun yanı sıra, FKT'lerin maliyetinin bilinen transformatörlere göre daha yüksek olduğu sunulmuştur [23].

Polonya 400/220/110 kV güç şebekesinde FKT'lerin sınır ötesi iletim kapasitesindeki etkileri, Avrupa'da 2014-2020 yılları arasındaki enterkonnekte güç sistemi modelleri ve güç akışı hesapları ile birlikte incelenmiştir. FKT kullanımının acil durumlarda etkin yararlılık sağladığı ve Almanya-Polonya sınır ötesi bölgede aktif güç akışı regülasyonu için Krajnik ve Mikulowa TM'lerde FKT kurulması planlandığı ortaya konmuştur. FKT'lerin gücü en az 750-1000 MVA olarak önerilmiştir. Kurulan FKT'lerin, sınır ötesi hatlarda yük açısının $\pm 40^\circ$ regülasyonu ile Polonya'ya aktif güç akışını 1100 MW azalttığı belirtilmiştir. FKT olmadan aynı sonucun elde edilmesi, Polonya şebekesinde üretimin 2200 MW artmasına yol açarken, Almanya şebekesinde aynı oranda üretimde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, Orta Avrupa'da, Polonya ve Almanya arası sınır ötesinde FKT ile birleşik güvenli sistemlerin istendiği ve kabul edildiği sonucuna varılmıştır. Polonya şebekesinin kuzey sınırında FKT olmaması halinde, Polonya sisteminin ithal edilen gücü senkron bağlantıyla yönetebileceği ve enterkonnekte akışları sınırlarda tutmak için elektrik ihraç etmeye yönelmesi gerektiği sunulmuştur [24].

Hindistan güç şebekesinde güç akışını kontrol etmek amacıyla uygulanan ilk FKT'nin tasarım, imalat, test ve devreye alma işlemleri sunulmuştur. Önerilen çift nüveli, çift hazneli FKT; dört sargılı 400/220/55/33 kV 315 MVA gücünde seri transformatör ve 35/55 kV 105 MVA gücünde şönt transformatörlerden oluşmaktadır. Yük akışı ve benzetim sonuçlarının transformatör tasarımında kısa devre akımlarını elde etmek için faydalı olduğu ifade edilmiştir [25].

100 MVA gücünde 12 baralılık iletim şebekesinin güç akışını kontrol etmek için 48-darbeli çok seviyeli GKD tabanlı birleşik güç akış denetleyicisi (BGAD) sunulmuştur. Önerilen BGAD sekiz adet 3-seviyeli nötr noktası kenetli GKD ve tek

fazlı 3 sargılı FKT'lerden oluşmaktadır. Gerilim ve güç akışı kontrolünde, geliştirilmiş tahmini akım kontrol yasasına dayanan bir modelin kullanılması yenilikçi bir yön taşımaktadır. Önerilen modelin harmonik performansı gibi faz kayması ve nötr noktası kenetli GKD'nin anahtarlama açısı kontrolünü de iyileştirdiği tespit edilmiştir. Toplam üçün katı harmonikleri azaltmak için bir sıfır-bileşen engelleme transformatörü kullanılmıştır [26].

Çamaşır suyu üretim tesislerinde yüksek miktarda dc güç gerektiğinden dolayı harmonik üreten çok sayıda doğrultucu bulunmaktadır. Harmonik azaltma yöntemlerinden FKT ve çok kademeli harmonik filtre grubu ortak bağlantı noktasına bağlanmaktadır. Önerilen beş-kademeli harmonik filtrenin normal çalışma ve hata durumlarında etkili sonuç verdiği görülmüştür [27].

Sağlıksız bir fiderin gerilim ve yüklenmesinin iyileştirilmesi ayrıca tüm sistem kayıplarının azaltılması için, Güney Afrika'da Glencowie (sağlıklı fider) ve Matlala (sağlıksız fider) 22kV fiderleri 10 MVA gücünde bir FKT ile bağlanarak incelenmiştir. FKT'nin faz açısı ayarlanarak güç akışı, çeşitli noktalardaki gerilim ve iki fiderin toplam aktif güç kayıplarının değiştirilebildiği görülmüştür [28].

Avrupa güç şebekesinin, Kuzey Afrika'nın büyük elektrik ithalatının üstesinden gelebilmesinde ve bu elektrik ithalatının 2030 yılında Avrupa ve İtalya güç şebekeleri (5 adet 1800 MVA gücünde FKT içeren) üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla iki stratejinin birleşimine dayanan bir tekno-ekonomik analiz gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşım Avrupa'da elektrik tarifelerinde azalma elde edildiğini göstermektedir. Aynı zamanda İtalya şebekesinde seçilen destek uygulamasının etkisi de ortaya konmuştur [29].

Talebin yüksek ve düşük olduğu zamanlarda, FKT kullanılarak Ulco şebekesinin gerilim regülasyonunun iyileştirilmesi ve gerilim sınır ihlalini ortadan kaldırmak için 50 MVA gücünde FKT'nin kullanımı sunulmuştur. FKT'nin faz açısı belirlenirken transformatörün primer gerilimini bozabileceği için dikkatli olunması gerektiği belirtilmiştir [30].

Yeni bir yöntem ideal faz kaydırma (IFK) yöntemi kullanılarak tasarlanan güç denetleyici cihazların ön tasarımı gerçekleştirilmiştir. Güç denetleyicisi olarak tristör anahtarlama seri kapasitör/tristör anahtarlama seri reaktör veya 350 MVA gücünde çift nüveli simetrik tip FKT kullanılmıştır. 26 baralılık bir sistemde iki farklı güç denetleyicisini boyutlandırmak için IFK yönteminin uygulaması sunulmuştur. Önerilen yöntem karmaşık bir güç şebekesinde güç denetleyicisinin tasarımı ve seçimini kolaylaştırabilir [31].

FKT gibi özel güç transformatörleri için 87T diferansiyel koruma standardının uygulama ve testi sunulmuştur. 1630 MVA, 400 MVA ve 1400 MVA gücünde FKT'ler tasarlanmıştır. Gerçek özel güç transformatör tesislerinde elde edilen bozulma verileri ya da çift nüveli Simetrik FKT için gerçek verilere dayanan RTDS benzetimleri test durumlarını göstermektedir [32].

Çok az farklı FKT tasarımından dolayı hangi durumlarda [33] IEEE yayınının yanlış olduğunu göstermek, çift nüveli FKT için 87T diferansiyel korumanın, 87P ve 87S fonksiyonlarının modern sayısal diferansiyel koruma esnasında tasarım ve ayar kılavuzunu sağlamıştır. 600 MVA gücündeki iki çift nüveli FKT'de uygulanan koruma şeması $\pm 40^\circ$ 'de toplam 64 kademe pozisyonunda (32 ileri ve 32 geri) sunulmuştur [34].

3. Sonuç

FKT'ler, iletim hattı üzerinde güç akış kontrolünü sağlamaya yarayan özel tip transformatörlerdir ve literatürde güç akışı kontrol cihazları olarak yer alırlar. Ülkemizde de FKT'nin önemi yeni yeni ortaya çıkmış olup ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmada, FKT hakkında genel bir bilgi verilerek uygulandığı alanlar hakkında literatür incelemesi ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışma, FKT teknolojisinin durumu ve güç akışı sorunları ile ilgili uygulama mühendisleri ve araştırmacılara yönelik geniş bir perspektif sunmayı amaçlamıştır.

4. Teşekkür

Bu çalışma Çukurova Üniversitesi BAP tarafından FDK-2016-5828, FYL-2016-7616, FBA-2016-7666 nolu projeler ile desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] Wang, T., Wu, X., Rao, X. ve Fang, F., "A novel strategy for composing staircase waveform in multi-module inverters", *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, Yichang, 2011, pp. 963-966, doi:10.1109/ICECENG.2011.6057987
- [2] Yao, J., Liu, F., Gong, J. ve Li, S., "A novel partial units energy feedback cascaded multilevel inverter with bypass control", *1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, Tainan, 2013, pp. 494-499, doi: 10.1109/IFEEC.2013.6687556
- [3] Shih, D. C., Hung, L. C. ve Young, C. M., "The harmonic elimination strategy for a 24-pulse converter with unequal-impedance phase-shift transformers", *1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEC)*, Tainan, 2013, pp. 783-788.
- [4] 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.
- [5] Garcia-Vite, P. M., Mancilla-David, F. ve Ramirez, J. M., "Dynamic modeling and control of an AC-link dynamic voltage restorer", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Gdansk, 2011, pp. 1615-1620, doi: 10.1109/ISIE.2011.5984402
- [6] Häger, U., Görner, K. ve Rehtanz, C., "Hardware model of a Dynamic Power Flow Controller" *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, Trondheim, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2011.6019397
- [7] Wang, F., Jiang, J., "A novel static frequency converter based on multilevel cascaded H-bridge used for the startup of synchronous motor in pumped-storage power station", *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 5, May 2011, Pages 2085-2091, ISSN 0196-8904, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.018>.
- [8] Jeyaraj, S. G., Milne, R. ve Mitchell, G., "On-site testing of special transformers", *10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012)*, Birmingham, 2012, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2012.1992
- [9] Page, S. et al., "Tap changer for an asymmetrical phase shifting transformer", *North American Power Symposium (NAPS), 2012*, Champaign, IL, 2012, pp. 1-5, doi: 10.1109/NAPS.2012.6336438
- [10] Liang, X., El-Kadri, A., Stevens, J. ve Adedun, R., "Frequency response analysis for phase-shifting transformers in oil field facilities", *Industrial & Commercial Power Systems Technical Conf (I&CPS), 2013 IEEE/IAS 49th*, Stone Mountain, GA, 2013, pp. 1-10.
- [11] Wang, J., Wu, B., Xu, D. ve Zargari, N. R., "Phase-Shifting-Transformer-Fed Multimodular Matrix Converter Operated by a New Modulation Strategy", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 10, pp. 4329-4338, Oct. 2013.
- [12] Kling, W.L., Klaar, D.A.M., Schuld, J.H., Kanters, A.J.L.M., Koreman, C.G.A. Reijnders, H.F., Spoorenberg, C.J.G., "Phase shifting transformers installed in the Netherlands in order to increase available international transmission capacity", *CIGRE, C2_207_2004*, 2004.
- [13] Verboomen, J., Van Hertem, D., Schavemaker, P. H. Kling W. L. ve Belmans, R., "Phase shifting transformers: principles and applications", *2005 International Conference on Future Power Systems*, Amsterdam, 2005, pp. 6 pp.-6, doi: 10.1109/FPS.2005.204302
- [14] Hurllet, P., Riboud, J.-C., Margoloff, J., Tanguy, A., "French Experience In Phase-Shifting Transformers", *CIGRE, A2-204*, 2006.
- [15] Rimez, J., Wiot, D., Jottrand, E., Van Der Planken, R., Claessens, G., Declerco, J., "Grid Implementation Of A 400mva 220/150kv $-15^{\circ}/+3^{\circ}$ Phase Shifting Transformer For Power Flow Control In The Belgian Network: Specification And Operational Considerations", *CIGRE, A2-202*, 2006.
- [16] Warichet, J., Leonard, J.-L., Rimez, J., Bronckart, O., Van Hecke, J., "Grid Implementation And Operational Use Of Large Phase Shifting Transformers In The Belgian Hv Grid To Cope With International Network Challenges", *CIGRE, C2-207*, 2010.
- [17] Van Hertem, D., Rimez, J. ve Belmans, R., "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, doi:10.1109/TSG.2013.2249597
- [18] Contreras-Aguilar, L., García, N., Islas-Martínez, M. A. ve Adame-Ortiz, R., "Implementation of a VFT model in PSS/E suitable for power flow and transient stability simulations", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 2012, pp. 1-8, doi: 10.1109/PESGM.2012.6345395
- [19] Brochu, J., Beaugard, F., Cloutier, R., Bergeron, A., Garant, L. Sirois, F., Henderson, M. I., "Innovative Applications Of Phase-Shifting Transformers Supplemented With Series Reactive Elements", *CIGRE, A2-203*, 2006.
- [20] Vita, A.L.N., Bastos, G.M., Mendes, Dr. J.C., Neto, F.C., "Phase Shifting Transformer on Power Control", *CIGRE, A2_202_2014*, 2014.
- [21] Carlini, E. M., Manduzio, G., Bonmann, D., "Power Flow Control on the Italian network by means of phase-shifting transformers", *CIGRE, A2-206*, 2006.
- [22] Iuliani, V., Di Giulio, A., Palone, F., Rebolini, M., Zunino, S.; Ubal dini, M.; Badini, S., Cannavale, G., Del Carro, M., Lombini, L.; Caprio, G., Vitiello, A., Albani, P.L., Ferrari, F., "New Phase Shifting Transformers in the Italian transmission network. Design, manufacturing, testing and

- electromagnetic transients modeling", *CIGRE*, A2-207, 2014.
- [23] Ptacek, J., Modlitba, P., Vnoucek, S., Cermak, J., "Possibilities Of Applying Phase Shifting Transformers In The Electric Power System Of The Czech Republic", *CIGRE*, C2-203, 2006.
- [24] Lubicki, W., Kocot, H., Korab, R., Przygodzki, M., Tomasik, G., Żmuda, K., "Improving The Cross-Border Transmission Capacity Of Polish Power System By Using Phase Shifting Transformers", *CIGRE*, C1-108, 2014.
- [25] Jithin Sundar, S.V.N., Yuvaraju, A., Radhakrishna, C., Kumar, M., Sachdeva, S., "Design, Testing and Commissioning of First Phase Shifting Transformer in Indian Network", *CIGRE*, A2_205, 2014.
- [26] Zhang, L., Kokkinakis, M. ve Chong, B. V., "Generalised predictive control for a 12-bus network using a Neutral-Point Clamped voltage-source-converter UPFC," *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, Manchester, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2014.0365.
- [27] Pragale, R., Dionise, T. J., ve Shipp, D. D., "Harmonic Analysis and Multistage Filter Design for a Large Bleach Production Facility," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 3, pp. 1201-1209, May-June 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2125938
- [28] Makhathini, D., Mbuli, N., Sithole, S. ve Pretorius, J., "Enhancing The Utilization Of The Matlala And Glencowie 22kv Radial Feeders By Interconnecting Them Using A Phase Shifting Transformer", *11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Venice, 2012, pp. 844-848.
- [29] Brancucci Martínez-Anido, C., L'Abbate, A., Migliavacca, G., Calisti, R., Soranno, M., Fulli, G., Alecu, C., de Vries, L.J., "Effects of North-African electricity import on the European and the Italian power systems: a techno-economic analysis", *Electric Power Systems Research*, Volume 96, March 2013, Pages 119-132, ISSN 0378-7796, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2012.11.001>.
- [30] Sithole, S., Mbuli, N. ve Pretorius, J., "Improvement of the Ulco network voltage regulation using a phase shifting transformer", *AFRICON, 2011*, Livingstone, 2011, pp. 1-6.
- [31] Johansson, N., Angquist, L. ve Nee, H. P., "Preliminary Design of Power Controller Devices Using the Power-Flow Control and the Ideal Phase-Shifter Methods", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1268-1275, July 2012. doi: 10.1109/TPWRD.2012.2196449
- [32] Gajic, Z., "Use of Standard 87T Differential Protection for Special Three-Phase Power Transformers—Part II: Application and Testing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1041-1046, July 2012. doi: 10.1109/TPWRD.2011.2178273
- [33] IEEE Special Publication, "Protection of Phase Angle Regulating Transformers (PAR)", *A report to the Substation Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee prepared by Working Group K1*, 1999.
- [34] Gajić, Z., Podboj, M., Traven B., ve Krašovec, A., "When existing recommendations for PST protection can let you down", *11th International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012)*, Birmingham, UK, 2012, pp. 1-6. doi: 10.1049/cp.2012.0040.