



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## Çeşitli Yük Durumlarında Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Güç Sistemine Etkileri

 Salih TOSUN <sup>a,\*</sup>,  Ali ÖZTÜRK <sup>b</sup>,  Beytullah BOZALI <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Elektrik Elektronik Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

<sup>c</sup> Elektrik ve Enerji Bölümü, Meslek Yüksek Okulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

\* [salihertosun@duzce.edu.tr](mailto:salihertosun@duzce.edu.tr)

DOI: [10.29130/dubited.825738](https://doi.org/10.29130/dubited.825738)

### ÖZET

Son yıllarda elektrik enerjisine olan ihtiyaç devamlı artmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte ise güç sistemine yeni ve farklı yük çeşitleri eklenmektedir. Bunun sonucunda, elektrik güç sisteminin işletilmesinde yeni sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu sorunlardan biri de güç sisteminin güvenilir ve kararlı şekilde çalıştırılmasıdır. Geleneksel yüklerin yanı sıra farklı karakteristik yükler sistemde istenmeyen etkiler oluşturabilmektedir. Bu yüklerin aynı anda Faz Kaydırıcı Transformatör (FKT) ile birlikte işletilmesinde oluşabilecek durumların incelenmesi gerekmektedir. Bilhassa ülkeler arası veya bölgeler arası güç sistemi bağlantılarında tercih edilen FKT'ler sargıları arasında faz farkı oluşturarak aktif güç kontrolü yapmaktadır. Transformatörün faz kaydırma açıları, üzerindeki sargıların kademelerinin değiştirilmesiyle elde edilmektedir. Ayrıca yük akışını kontrol etmek suretiyle enerji iletim hatlarını maksimum kapasite ve verimde kullanmak imkânı da oluşmaktadır. Bu çalışma Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) benzetim programı üzerinden, FKT bulunan IEEE'nin 6 baralı güç sistemine çeşitli yükler bağlanarak güç sisteminin analizleri yapılmıştır.

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

## Effects of Phase Shifting Transformers on Power System in Various Load Situations

### ABSTRACT

Today, ever-increasing demands for electrical energy and with the developing technology, new and different special loads are added to the system every day. As a result, new problems arise in the operation of the electric power system. One of these problems is the reliable and stable operation of the power system. Apart from traditional loads, different characteristic loads can create undesired effects in the system. Situations that may occur in operating these loads together with Phase Shifting Transformer (PST) must be carried out. PSTs, which are preferred especially in inter-country or inter-regional power system connections, create active power control by creating a phase difference between their windings. Phase shifting angles of the transformer are obtained by changing the stages of the windings on it. In addition, it is possible to use the energy transmission lines at maximum capacity and efficiency by controlling the load flow. In this study, the Power System Analysis Program (PSAT) simulation program was used to analyze the power system by connecting various loads to the 6-bus power system of IEEE with PST.

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

Geliş: 17/11/2020, Düzeltme: 02/02/2021, Kabul: 12/02/2021

# **I. GİRİŞ**

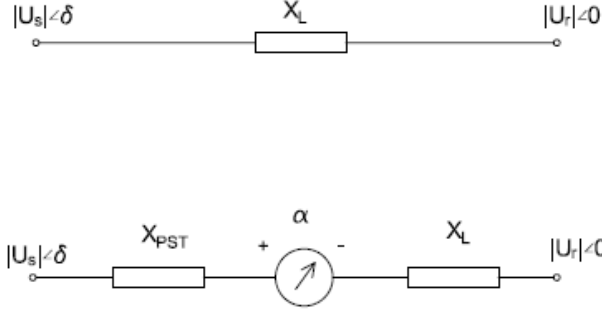
Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimi ve elektrik enerjisine olan talebin artış göstermesi sonucunda güç sisteminde dengesizlikler oluşmaktadır. Bu durumda güç sisteminin iyileştirilmesi için sistem üzerinde yapısal düzenlemeler gerekmektedir. Genellikle elektrik güç sisteminde, iletim ve dağıtım seviyesindeki kararlılık veya güç dengelemeleri generatörlerin üretimi üzerinden yapılmaktadır. Ancak son yıllarda var olan enerji güç sistemi üzerinde eklemeler veya değişiklikler ile güç dengelemesi veya kararlılık düzeltilmesi yapılmaktadır [1]. Gerilim kararlılığı, enerji nakil hattının maksimum yüklenme kapasitesiyle doğrudan ilişkilidir ve yük bara değerlerinin belirlenen sınırlar içerisinde tutulabilmesi yeteneği olarak ifade edilir [2]. Elektrik güç sistemlerinde tüketicilerin güç ihtiyaçları gelişmeye bağlı olarak devamlı artmaktadır. Güç sistemlerinde devreye her an yükler, hatlar ve üretim kaynaklar girip çıkmaktadır. Bu durum güç sistemini dinamik bir hale sokmaktadır. Bu dinamik yapı içerisinde olan yük baralarının kritik değerleri olan güç, gerilim genlik ve gerilim açısı değerlerinin bilinmesi gerekir. Sistemde yük akışı olduğunda yük baralarının bu kritik değerlere ulaşmaması gerekir. Güç sistemi bu değerlere ulaşmayacak şekilde tasarlanmalı ve işletilmelidir. Aksi durumda sistemde büyük ekonomik kayıplara mal olabilecek, gerilim çökmesi gibi durumlar yaşanacaktır [3]. Glover ve arkadaşları yaptıkları çalışmada gerilim kararlılığının kritik bara değerlerini Newton Raphson yük akışı analizi ile belirlemişlerdir [4]. Gerilim değerlerinin sınır değerleri altına düşmesi gerilim kararlılığını bozar. Bunun sonucunda iletim hatları generatörler ve yükler devre dışı kalabilir [5]. Thomas ve arkadaşları jakobien matrisin tekil değerini temel alan global bir gerilim kararlılık indikatörünü geliştirmişlerdir [6]. Begoviç ve arkadaşları thevenin eşdeğer empedansının büyüklük ve oranına dayanan gerilim kararlılık çalışmaları yapmıştır [7]. Farklı bir çalışmada ise güç akışının kontrol edilememesi ve sistemin aşırı yüklenmesi gibi sorunların çözümlerinde kullanılacak devre elemanlarından birisi de FKT'ler olduğu ifade edilmiştir [8]. Bu analizler sonucu gerilim kararsızlığı veya daha ileri seviyesi olan gerilim çökmeleri dinamik bir olay olduğu kabul edilmiştir [9]. Gerilim kararlılığının dinamik yapısına rağmen, analizlerinden birçoğu statik analiz yöntemleri kullanılarak yapılır.

Bu çalışma, IEEE'nin 6 baralı test sistemine uygulanmıştır. Yapılan yük akışı sonucu en yoğun güç akışının yaşandığı hat olan 2-4 nolu baralar arasına FKT bağlanmış ve açısı 20°'ye ayarlanmıştır. Daha sonra 4 nolu yük barasına sırasıyla Endüktif yük, ZIP yük, Gerilime Bağlı yük, Frekansa Bağlı yük ve Asenkron Motor yükü bağlanarak yük akışı analizleri yapılmıştır. Yapılan sürekli yük akışı sonucunda enerji iletim hattının en büyük değerleri olan kritik değerler elde edilmiştir. Bu çalışmada analizler ve elde edilen değerler, Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) simülasyonları ile elde edilmiştir.

## **II. FKT VE YÜK MODELLEMELERİ**

### **A. FAZ KAYDIRICI TRANSFORMATÖRLER**

FKT, enerji iletim hattı üzerine kurulu ve güç akışını kontrol etmek için tasarlanan özel bir transformatörler çeşididir. Transformatörün sahip olduğu özel sargı sayesinde giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasında faz farkı oluşturur. Bu durumda elektrik güç sistemine değişik faz açılara sahip gerilim uygulanmış gibi düşünülebilir. Bu durumda enerji iletim sistemlerinde FKT'ler enerji akış yönünü belirlemede kullanılırlar [10]. FKT'lerde faz değiştirme işlemi, iletim hattının gerilim genliğine değiştirilebilir gerilim bileşeni çıkarılarak veya eklenerek sağlanır. FKT'lerin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 1'de belirtilmiştir.



Şekil 1. FKT'li ve FKT'siz olarak modellenmesi [11]

Şekil 1'de ifade edilen,  $U_s$  ve  $U_r$  hat başı ve hat sonu gerilim genlik ifadeleridir.  $\delta$  ise sistemin güç açısıdır.  $\alpha$  ifadesi ise FKT'nin ilave edilen veya çıkarılan açısıdır.  $X_L$  hattın reaktansı ve  $X_{PST}$  ise sisteme bağlanan FKT'nin reaktansıdır ve sisteme seri olarak bağlanmaktadır. Bu durum sonucunda iletim hattı üzerinden iletilen aktif ve reaktif güç denklemleri Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$P = \frac{|U_s||U_r|}{X_L} \sin\delta \quad Q = \frac{|U_s||U_r|}{X_L} \left( \cos\delta - \frac{|U_r|}{|U_s|} \right) \quad (1)$$

Eşitlik 1'e göre; aktif güç  $P$ , hat başı ve hat sonundaki gerilimlerle ve her iki ucun faz farkı olarak  $\sin\delta$  ile doğru orantılıdır. Hattın reaktansı ile ters orantılıdır. Eşitliğe göre Aktif güç, gerilimlerin değişimine bağlı olarak kontrol edilebilir. Ancak bunun sonucunda reaktif güçte de büyük değişimler olabileceğinden bu yöntem verimli olmaz. Bunun için diğer değişken olan hattın reaktansını değiştirmek gerekir. FKT devre modelinde transformatörün reaktansı, faza seri olarak bağlanması sebebiyle ve  $\alpha$  açısının  $\delta$  açısına eklenmesiyle güç akışı değiştirilir. Bu durumda güç akışı belli sınırlar içerisinde kontrol edilebilir duruma gelir [11]. Bunun sonucunda Eşitlik 1, Eşitlik 2'deki ifadeye dönüşmüş olur.

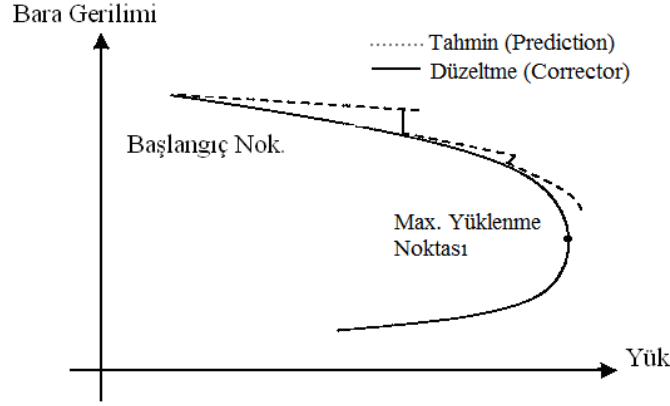
$$P = \frac{|U_s||U_r|}{X_L + X_{PST}} \sin(\delta + \alpha) \quad (2)$$

## B. SÜREKLİ YÜK AKIŞI

Güç sisteminde gerilim kararlılık sınırlarının gözlemlenmesi en kolay yük baralarında elde edilen P-V değerleri ile sağlanır. Gözlemlenen bu değerler bara kritik değerleri olarak da ifade edilmektedir. Bu durumda yükün çektiği aktif güce kritik güç değeri denir. Şekil 2'de görüleceği üzere bara geriliminin azalması sistemin kararlı çalışmasını zorlaştırmaktadır [12]. Buradaki kararsızlık gerilim kararsızlığı olup, oluşumu ve devamındaki olaylar dinamik bir süreçtir. Sistemin ve olayların dinamik bir süreç olmasına karşın analizler genellikle statik analiz yöntemleri ile yapılır [13]. Eşitlik 3'de, güç sisteminin Gerilim-Yüklenme Parametresi ( $V-\lambda$ ) ile baranın, aktif ve reaktif güç değerleri arasındaki bağlantı verilmiştir.

$$P_L = P_{L0} (1 + \lambda) \quad Q_L = Q_{L0} (1 + \lambda) \quad (3)$$

Eşitlikteki  $P_{L0}$  ve  $Q_{L0}$  ifadeleri güç sisteminin başlangıç aktif güç ve reaktif güç değerleridir.  $P_L$  ve  $Q_L$  ise yükün o andaki aktif güç ve reaktif güç değerleridir.  $\lambda$  ise maksimum yüklenme parametre değeridir. Gerilim ile yüklenme parametresi ( $V-\lambda$ ) arasındaki bağlantıyı kurmak için sürekli güç akışı yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Sürekli güç akışı analizi ise tahmin ve düzeltme işlemlerini sıralı olarak işleyen bir süreçtir. Sürekli güç akışındaki temel prensip tahmin ve düzeltme bağlantısı üzerine kurulmuştur. Tahmin, o andaki çalışma noktasına teğet doğrultusu boyunca gerçekleşmesi Şekil 2'de görüldüğü gibidir. Düzeltme vektörü ise teğet doğrultusuna dik bir düzlem olarak kullanılmıştır [14]. Güç sisteminde bu ardışık işlemler yapılırken baralardan çekilen güç değerlerinin sabit olduğu kabul edilir.



Şekil 2. Baradan çekilen güç ve bara gerilimi (P-V) eğrisi üzerinde tahmin ve düzeltme

## C. YÜK MODELLERİ

Yük modeli; sistem modelinde açıkça temsil edilmeyen sistemin bir kısmı, daha ziyade bir baraya bağlı tek güç tüketen aygıt olarak kabul edilir. Güç sistemlerinde yüklerin içeriği incelendiğinde, güç sisteminin içerdiği tüm elemanlar (yükseltici ve indirici transformatörler, seri ve şönt elemanlar, iletim hatları...) ve baralara bağlı tüm yüklerden oluşmaktadır [15]. Bu yükler sistem üzerinde tek yük haline indirgenir ve tek bir yük modeli haline getirilir. Güç sistemlerinde gerilim kararsızlığının itici gücü olarak genellikle yükler görülmektedir [16]. Güç sistemlerinde gerilim değişimlerine bağlı olarak yükler; sabit empedans yükleri, sabit akım yükleri, sabit güç yükleri olarak sınıflandırılabilir. Sabit empedans yükleri; aydınlatma, ısıtma, ark ocakları gibi örnekler olup çoğunlukla omik yüklerdir. Sabit akım yükleri; metalürji ve kimya alanındaki yükler olarak kabul edilirler. Sabit güç yükleri ise; empedans kontrollü yükler ile asenkron motorlar bu grubu oluşturmaktadır [3].

### C.1. ZIP Yük Modeli

Polinom veya ZIP yüklerin modeli üstel bir fonksiyondur. Bu model statik yük modeli ve gerilime bağlı olup, zamana bağlı olmayan fonksiyondur. ZIP modeli yaygın olarak kullanılmaktadır. Fonksiyon, sabit gücü, sabit akımı ve sabit empedans yükünü temsil eden üç terimi göstermektedir [17]. ZIP yüklerini modelleyen eşitlikler, Eşitlik 4 ile gösterilmiştir.

$$P = g(V)^2 + I_P(V) + P_n \quad Q = b(V)^2 + I_Q(V) + Q_n \quad (4)$$

Burada  $V$  yük akışı sonucunda elde edilen bara gerilimidir. Diğer parametreler ise  $g$ ; konduktans,  $I_P$ ; aktif akım,  $P_n$ ; aktif güç,  $b$ ; suseptans,  $I_Q$ ; reaktif akım,  $Q_n$ ; reaktif güç'dür [18].

Denklem 4'de verilen eşitlikteki katsayılar;  $g+I_P+P_n=1$ ,  $b+I_Q+Q_n=1$  şeklinde olmalıdır.

### C.2. Gerilime Bağlı Yük Modeli

Geleneksel yük akış çalışmalarında baraların gerilim genlik değerlerine bakılmaksızın aktif ve reaktif güç değerleri sabit olarak kabul edilirdi. Gerçek güç sistemlerinde ise farklı kategorilerde ve farklı tiplerde (konut, endüstri, ticarethane) yükler bulunabilir. Bu tip yüklerin doğası olarak aktif ve reaktif yükler gerilime ve frekansa bağlıdır. Çok yaygın statik yük modeli olup, aktif ve reaktif güç tek terimli ve üslü ifade fonksiyonu şeklindedir [19]. Gerilime bağlı yük modelini fonksiyon olarak ifade eden eşitlik Denklem 5'de verilmiştir.

$$P = P_0 V^{\alpha P} \quad Q = Q_0 V^{\beta Q} \quad (5)$$

Burada,  $V$ ; yük gerilimini,  $P_0$  ve  $Q_0$  ise nominal gerilimdeki aktif ve reaktif güçleri ifade etmektedir. Üstel olarak ifade edilen  $\alpha P$  ve  $\beta Q$  aktif ve reaktif güçlerin üstel değerlerini ifade etmektedir. Bu tipik değerler farklı yük elemanlarının değerleridir [20].

### C.3. Frekansa Bağlı Yük Modeli

Bu yük modeli, frekansa bağlı ve statik bir yük modeli şeklindedir. Genellikle bir polinom veya üstel yükün çarpımı ile temsil edilir ve Denklem 6 ve 7'deki eşitliklere göre hesaplanır [21].

$$P = k_P / 100 (V / V_0)^{\alpha P} (1 + \Delta\omega)^{\beta P} \quad (6)$$

$$Q = k_Q / 100 (V / V_0)^{\alpha Q} (1 + \Delta\omega)^{\beta Q} \quad (7)$$

Burada;  $k_P$  ve  $k_Q$  yüzde olarak aktif ve reaktif güç oranı,  $\alpha P$  ve  $\alpha Q$  aktif ve reaktif gerilim katsayısı,  $\beta P$  ve  $\beta Q$  aktif ve reaktif güç frekans katsayıları,  $\Delta\omega$  yük barasındaki frekans sapmasını temsil etmektedir.

### C.4. Asenkron Motor

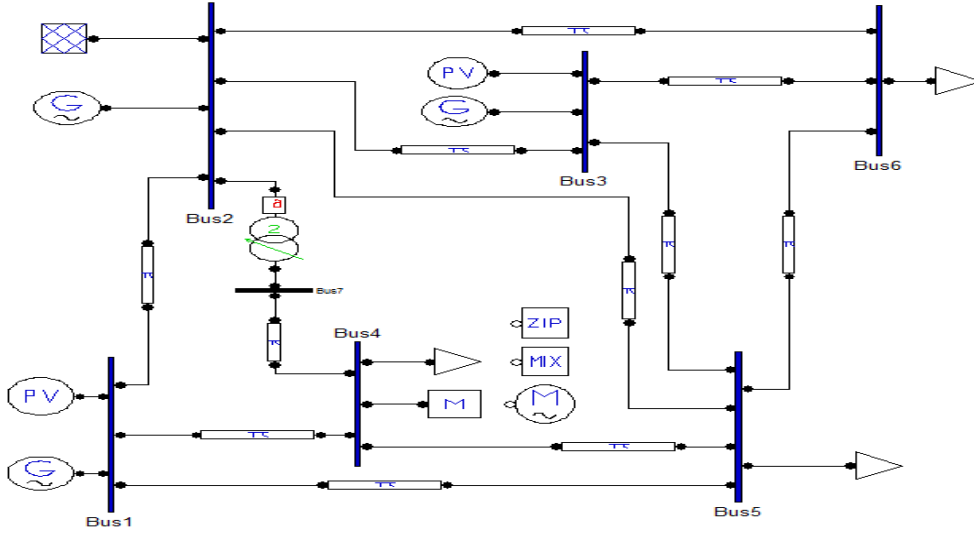
Günümüzde endüstride kullanılan motorların yaklaşık %95'i asenkron motorlardır. Geleneksel statik yük modelleri bu yükün davranışını temsil etmede yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı motorlarla ilişkili dinamiklerin doğru olarak modellenmesi gerekir. Güç sistem kararlılık çalışmalarında iki tip asenkron motoru ile modellenmektedir. Küçük tip motorlar için "Slip Model" ve büyük tip motorlar için "Slip Flux Model"dir [22-23]. Gerilim kararlılığı analizi için asenkron motorun dinamik yük modeli asenkron motorun karakteristik temellerinden türetilmiştir. Asenkron motorun yük talebi sürülen yükün talebine bağlıdır. Asenkron motorun güç değerleri aşağıdaki denklem 8'deki gibi hesaplanır.

$$P = x_p (E^2 / R_r) \quad Q = (x_s + x_r)(Ex_p / R_r)^2 \quad (8)$$

Eşitlikde,  $x_s$ ,  $x_r$ ; motorun stator ve rotor endüktansını,  $E$ ; stator terminal gerilimini,  $R_r$ ; rotor direncini,  $x_p$ ; motorun kaymasını ifade etmektedir.

## III. BENZETİM ÇALIŞMASI

Şekil 3'deki bu çalışmada, 6 baralı test sistemine, yük akışı sonucu en yoğun güç akışının yaşandığı hat olan 2-4 nolu baralar arasında FKT bağlanmış ve açı değeri 20'ye ayarlanmıştır. Sistemin toplam aktif ve reaktif gücü 280 MW ve 190 MVar değerindedir. Bu aktif ve reaktif güçler üç adet generatör ile sağlanmaktadır. Benzetim çalışmasında 4 nolu yük barasına ayrı ayrı olarak ZIP Yük modeli, Gerilime Bağlı Yük modeli, Frekansa Bağlı Yük modeli ve Asenkron motor yükü bağlanmıştır. Sistemde her yük modeli için, Newton-Raphson (NR) yük akışı yapılarak sistemin normal çalışma gerilim ve yük değerleri belirlenmiştir. Daha sonra sürekli yük akışı yapılarak güç akış denklem çözümlerinin tekil olduğu noktaya ulaşılarak sistemin kritik bara değerleri elde edilmiştir. Benzetim çalışması Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) üzerinde uygulanmıştır [21].



Şekil 3. Yeniden düzenlenmiş 6 baralı test sistemi

Güç sistemi normal işletme şartlarında yük akışı yapıldığında yük baralarının gerilim genlik değerleri ve açı değerleri, yük baralarından çekilen aktif ve reaktif güç değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Normal işletme şartlarında çeşitli yük modellerinde yük akışı sonucunda elde edilen değerler

Yük Modelleri	Bara	Gerilim (pu)	Açı (Derece)	Aktif Güç Kayıpları (pu)	Reaktif Güç Kay (pu)
Endüktif Yük Modeli	4	0.904	7.88	0.229	0.189
	5	0.903	-1.82		
	6	0.935	-3.62		
	7	0.980	15.79		
ZIP Yük Modeli	4	0.983	12.47	0.200	0.049
	5	0.914	0		
	6	0.937	-2.82		
	7	1.003	17.47		
Gerilime Bağlı Yük Modeli	4	0.835	4.03	0.323	0.507
	5	0.893	-3.29		
	6	0.933	-4.28		
	7	0.958	14.51		
Frekans Bağlı Yük Modeli	4	0.904	7.88	0.229	0.189
	5	0.903	-1.82		
	6	0.935	-3.62		
	7	0.980	15.79		
Asenkron Motor Yüğü	4	0.983	12.47	0.200	0.049
	5	0.914	0		
	6	0.937	-2.82		
	7	1.003	17.47		

Tablo 1’de, 4 nolu yük barasına çeşitli yük modelleri bağlandığında baraların gerilim genlik ve açı değerleri verilmiştir. Ayrıca yük akışı sonucunda sistemin aktif ve reaktif kayıpları da gösterilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre baraların gerilim genlik değerleri normal sınırlar içerisinde kalmaktadır. Yalnızca Gerilime Bağlı Yük Modeli bağlandığında 4 ve 5 nolu baraların gerilim genlik değerleri 0.83 ve 0.89 pu değerlerine düşmektedir. Bu durumda 4 ve 5 nolu baraların gerilim genlik değerleri %10’dan fazla düşmektedir. Bu durum güç sistemlerinde gerilim kararlılığı bakımından istenmeyen bir durumdur.

Bunun sonucunda 4 nolu baraya bağlanacak olan Gerilime Bağlı Yük Modelinin gücünün düşürülmesi gerekmektedir. Aktif ve Reaktif güç kayıpları bakımından sistem incelendiğinde, tüm yük modellerinde kayıplar benzer değerlerde iken Gerilime Bağlı Yük Modelinde kayıplar artmaktadır. Özellikle bu kayıplar reaktif güç kayıplarında daha belirgin olmaktadır. Bu durum aslında gerilim kararlılığının reaktif güç ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

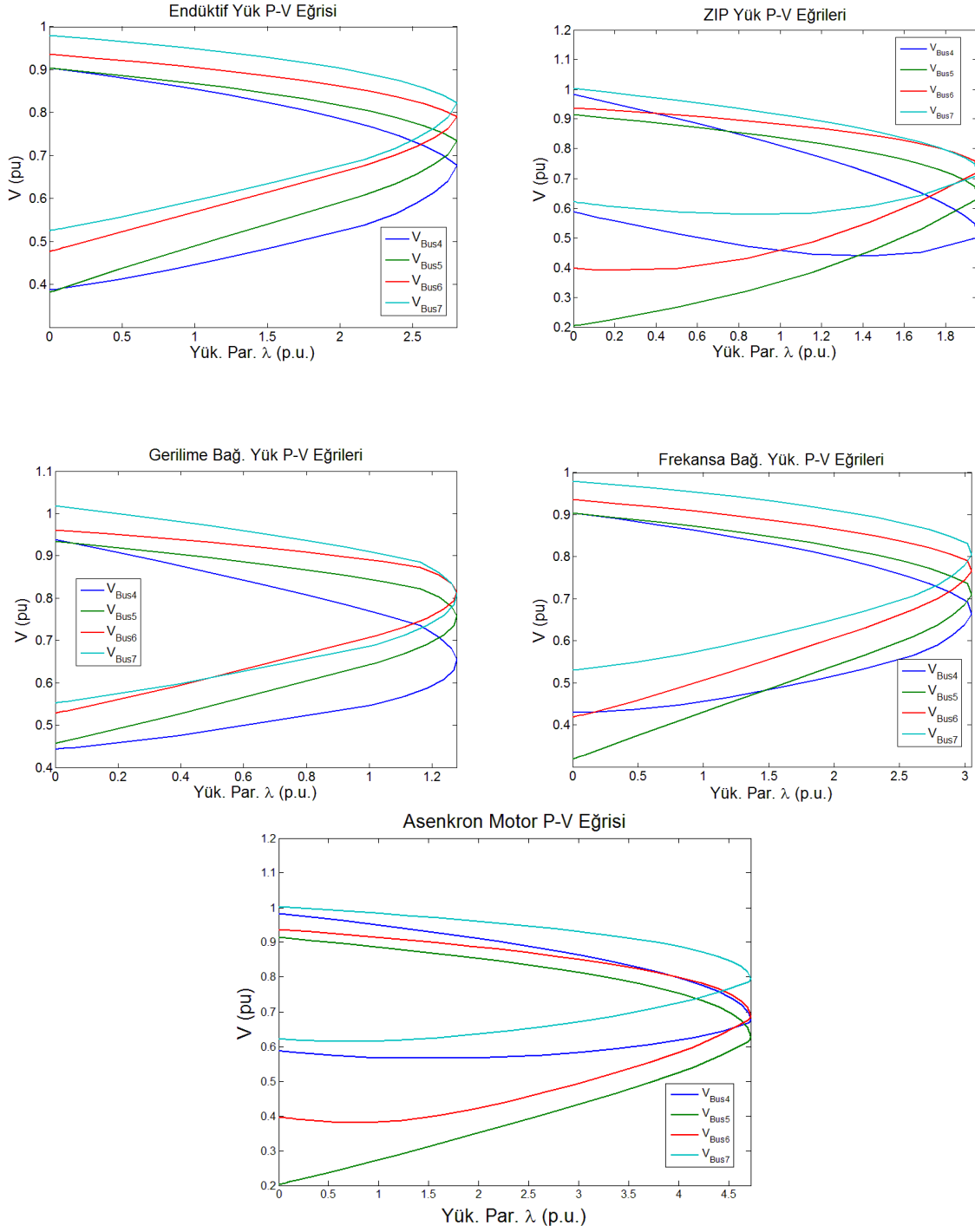
Güç sistemi üzerinde sürekli yük akışı yapılarak sistemin kritik değerleri olan, kritik bara gerilimi ve maksimum yüklenme değerleri bulunur. Sürekli yük akışı sonucunda elde edilen kritik değerler ve aktif reaktif kayıplar Tablo 2’de verilmiştir.

*Tablo 2. Çeşitli yük modellerinde sürekli yük akışı sonucu elde edilen kritik değerler*

Yük Modelleri	Bara	Gerilim (pu)	Açı (Derece)	Maksimum Yüklenme Par. $\lambda$ (pu)	Aktif Güç Kayıp (pu)	Reaktif Güç Kayıp (pu)
<b>Endüktif Yük Modeli</b>	4	0.640	-0.15	2.804	0.590	1.566
	5	0.702	-8.58			
	6	0.762	-10.91			
	7	0.789	13.25			
<b>ZIP Yük Modeli</b>	4	0.512	2.73	1.951	0.753	2.071
	5	0.640	-5.25			
	6	0.729	-7.49			
	7	0.719	13.90			
<b>Gerilime Bağlı Yük Mod.</b>	4	0.630	-2.60	1.277	0.578	1.502
	5	0.735	-8.88			
	6	0.794	-9.84			
	7	0.783	12.58			
<b>Frekansa Bağlı Yük. Mod.</b>	4	0.663	0.74	3.049	0.572	1.500
	5	0.709	-8.42			
	6	0.765	-11.07			
	7	0.804	13.50			
<b>Asenkron Motor Yük</b>	4	0.676	7.23	4.715	0.687	1.844
	5	0.626	-6.42			
	6	0.687	-11.67			
	7	0.794	15.38			

Tablo 2’de, 4 nolu yük barasına çeşitli yük modelleri bağlanıp sürekli güç akışı yapıldığında baraların kritik gerilim genlik, açı ve maksimum yüklenme değerleri verilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre, 4 nolu baraya Asenkron motor bağlandığında 4.715 pu olarak en fazla güç çekilebilmektedir. Daha sonra sırasıyla Frekansa bağlı yük modeli, Endüktif yük, ZIP yük modeli ve son olarak Gerilime bağlı yük modeli olmaktadır. Normal yük akışındaki benzer durum Gerilim yük modeli için sürekli yük akışında da görülmüştü. Kritik gerilim bakımından incelendiğinde ise tüm modeller için en dayanıklı bara 4 nolu bara görülmektedir. Sistemi kararsızlığa götüren en zayıf bara olarak ise 7 nolu bara görülmektedir. Gerilime bağlı yük modeli ve ZIP yük modelinde 4 nolu bara 0.63 ve 0.51 pu gerilime kadar sistemi kararlı halde tutarken, aynı yüklerde 7 nolu baranın kritik gerilimi 0.78 ve 0.71 pu olmaktadır. Kritik değerlerin elde edildiği sürekli yük akışı sonucunda aktif ve reaktif güç kayıpları, bütün yüklerde birbirine benzer iken ZIP yük modelinde kayıplar belirgin şekilde artmıştır.

Yük baralarındaki yük çeşitlerine göre kritik değerlerin değişimini gösteren P- $\lambda$  eğrileri şekil 4’de verilmiştir.



**Şekil 4.** Çeşitli yük durumlarında yük baralarındaki  $P$ - $\lambda$  değerlerinin değişimi

Şekil 4’de verilen  $P$ - $\lambda$  eğrilerine göre güç sistemine asenkron motor bağlı iken maksimum güç transferi gerçekleşmektedir. En az güç transferi ise Gerilime bağlı yük modeli bağlı olduğunda gerçekleşmektedir. Bu değerler, en fazla 4.715 pu ve en az 1.277 olarak gerçekleşmiştir. Tüm baralarda en güçlü bara olarak 4 nolu bara gözlemlenmiştir. Ancak asenkron motor yükü bağı olduğu durumda 5 nolu bara daha kararlı bara olarak ortaya çıkmıştır.



## IV. SONUC

Yapılan bu çalışmada 6 baralı test sistemine, ayrı ayrı olarak ZIP Yük modeli, Gerilime Bağlı Yük modeli, Frekansa Bağlı Yük modeli ve Asenkron motor yükü bağlanmıştır. Sistemde her yük için, Newton-Raphson (NR) yük akışı yapılarak sistemin normal çalışma gerilim ve yük değerleri belirlenmiştir. Daha sonra sürekli yük akışı yapılarak güç akış denklem çözümlerinin tekil olduğu noktaya ulaşılarak sistemin kritik bara değerleri elde edilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda; normal çalışma esnasında, yük baralarının gerilim genlik değerleri ve açı değerleri sistemin kararlılık sınırları içerisinde bulunduğu görülmektedir. Yalnızca Gerilime Bağlı Yük Modeli bağlandığında 4 ve 5 nolu baraların gerilim genlik değerleri normal işletme şart değerlerinin altına düşmektedir. Bu durum güç sistemlerinde gerilim kararlılığı bakımından istenmeyen bir durumdur. Aktif ve Reaktif güç kayıpları bakımından sistem incelendiğinde, tüm yük modellerinde kayıplar benzer değerlerde iken Gerilime Bağlı Yük Modelinde kayıplar artmaktadır. Özellikle bu kayıplar reaktif güç kayıplarında daha belirgin olmaktadır. Bu sonuç aslında gerilim kararlılığının reaktif güç ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

4 nolu yük barasına çeşitli yük modelleri bağlanıp sürekli yük akışı yapıldığında baraların kritik gerilim genlik, açı ve maksimum yüklenme değerleri elde edilir.  $P-\lambda$  eğrileri olarak da ifade edilen maksimum yüklenme eğrilerinde, asenkron motor bağlı iken en fazla güç transferi gerçekleşmiştir. En az güç transferi ise Gerilime bağlı yük modeli bağlı olduğunda elde edilmiştir. Tüm baralarda en güçlü bara olarak yüklerin bağlandığı bara gözlemlenmiştir. Ancak asenkron motor yükü bağlı olduğu durumda bu bara değil, asenkron motora yakın başka bir bara daha karalı bara olarak ortaya çıkmıştır.

## V. KAYNAKLAR

- [1] M. P. G Verbic and F. Gubina., "On voltage collapse and apparent power losses," *Electric Power Systems Research*, Volume 76, Issues 9-10, pp. 760-767, June 2006.
- [2] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, New York, McGraw-Hill, 1994.
- [3] Yalçın Mehmet Ali, "Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşım ile İncelenmesi", Doktora Tezi, İ.T.Ü., F.B.E., 1995.
- [4] J. D. Glover, M.S. Sarma and T. J. Overbye, *Power system analysis and design*, 4th ed., Nashville, Tenn: Thomson Learning, 2008.
- [5] M.Glavic, "Power System Voltage Stability A short Tutorial", University of Liege , Electrical Engineering and Computer Science Department , 2003.
- [6] A. Tiranuchit, R. J. Thomas, "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 87-93, February 1988.
- [7] K. Vu, M. M. Begović, D. Novosel, M. M. Saha, "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, pp. 1029-1035, Aug.1999.
- [8] J. Verboomen, D. Van Hertem, P. H. Schavemaker, W. L. Kling, and R. Belmans, "Phase shifting transformers: Principles and applications," in Proc. *IEEE Int. Conf. Future Power Syst.*, Amsterdam, The Netherlands, Nov. , pp. 1-6, 2005.
- [9] T. Cutsem, T. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, New York:Springer, 2005.

- [10] T. Mehmet, 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", Güç Sistemleri Konferansı, CIGRE, İstanbul, November 2016.
- [11] D. Van Hertem, J. Verboomen, R. Belmans, W. Kling, "Power flow control devices: An overview of their working principles and their application range", *Proc. Int. Conf. Future Power Syst.*, vol. 6, pp. 16–18, November 2005.
- [12] S. G. Johansson, *Long-term Voltage Stability in Power Systems-Alleviating the Impact of Generator Current Limiters*, 1998.
- [13] M. K. Pal, *Voltage stability: analysis needs, modelling requirement, and modelling adequacy*, *IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution*. Vol. 140. No. 4. IET, 1993.
- [14] C. A. Cañizares, F. L. Alvarado, "Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, Feb. 1993.
- [15] Nuqui Reynaldo Francisco, *State estimation and voltage security monitoring using synchronized phasor measurements*. Diss. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [16]. K. Morison, H. Hamadani, W. Lei, "Load Modeling for Voltage Stability Studies", *Power Systems Conference and Exposition 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, pp. 564-568, 2006.
- [17] Genêt Benjamin and Jean-Claude Maun, *On monitoring methods and load modeling to improve voltage stability assessment efficiency*. Diss. PhD thesis, Université libre de Bruxelles, 2009.
- [18] M. Federico, *Power System Analysis Toolbox Quick Reference Manual* for PSAT version 2.1. 2., 2008.
- [19] U. Eminoglu, M. H. Hocaoglu, "A new power flow method for radial distribution systems including voltage dependent load models", *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 76, pp. 106-114, 2005.
- [20] L. M. Hajagos, B. Danai, "Laboratory measurements and models of modem loads and their effect on voltage stability studies", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 584-592, May 1998.
- [21] F. Milano, "An open source power system analysis toolbox," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 1199-1206, 2005.
- [22] L. Sujit, et al. "Dynamic load model and its incorporation in MATLAB based Voltage Stability Toolbox", *17th Power Systems Computation Conference*, Stockholm Sweden, August 22-26, 2011.
- [23] Ragu Balanathan, Nalin C.Pahalawaththa, Udaya D. Annakkage, "Modelling Induction Motor Loads for Voltage Stability Analysis", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 24, pp. 469-480, 2002.