

## FAZ KAYDIRICI TRANSFORMATÖRLERİN STATİK GERİLİM KARARLILIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

M. Kenan DÖŞOĞLU<sup>1\*</sup> Salih TOSUN<sup>1</sup> Ali ÖZTÜRK<sup>2</sup> Gökhan POYRAZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fak., Elektrik-Elektronik Müh., 81620, Düzce, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh., 81620, Düzce, TÜRKİYE

<sup>3</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektrik-Elektronik Müh., 11210, Bilecik, TÜRKİYE

**Özet-**Yapılan bu çalışmada, Uluslararası Elektrik Elektronik Mühendisliğinin (IEEE) 14 baralı güç sisteminde faz kaydırıcı transformatörün güç sistemlerinde statik gerilim kararlılığı üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Faz kaydırıcı transformatörün farklı faz açılarında Gerilim-Maksimum Yüklenme Parametresi (G\_MYP) ilişkisi üzerinde durulmuştur. Bu benzetim çalışmasında Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır. 14 baralı güç sisteminin 5-6 numaralı baraları arasında bulunan faz kaydırıcı transformatörün 0-30 derece arasındaki değerler ile işlem gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda faz açısının belli bir değere kadar G-MYP değerini etkilediği, belli bir değerden sonra etki göstermediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler-** Faz kaydırıcı transformatör, statik gerilim kararlılığı, maksimum yüklenme parametresi

### PHASE-SHIFTER TRANSFORMERS INVESTIGATION OF THE EFFECT OF STATIC VOLTAGE STABILITY

**Abstract-** In this study, phase shifter transformer effects on static voltage stability were investigated. Studies were applied on *IEEE 14-Bus test system*. The relationship between voltage-Maximum Loading Parameters (G\_MYP) investigated to different phase angles of the transformer phase shifter. This simulation study, Power Systems Analysis Program (PSAT) was used. The phase shifter transformer is located the between number of bus 5 and number of bus 6 of IEEE 14 bus test system. According to between 0 to 30 degrees values of phase shifter the transformer, operations were carried out. As a result of the study showed that the phase angle values affect G-MYP value until a certain value of the phase angle . Also observed that G-MYP value was not affected after a certain of the phase angle values.

**Key Words-** Phase-shifting transformer, static voltage stability, maximum loading parameter

---

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

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, elektrik tüketiminin artması ve düzensiz kullanılması yüzünden güç sistemlerinin oldukça etkilendiği ve değişime uğradığı görülmüştür. Bu olumsuz durumlarda güç sistemlerinin çalışma koşullarının iyileşmesi için tekrar planlamalarının yapılması gerekmektedir. Güç sistemlerinin yapılandırılmasında dağıtım ve iletim seviyesinde düzenlemeler generatörlerin güç üretimi ile sağlanmaktadır. Son zamanlarda ise ilave olarak mevcut güç sistemi üzerinde maksimum yüklenme parametresini iyileştirmek için gerekli önlemler alınmaya başlanmıştır [1]. Bara gerilim seviyelerinin maksimum yüklenme parametresi olan ilişkisi genellikle gerilim kararlılığı olarak adlandırılır. Güç sistemlerinde gerilim kararlılığı ile çalışmalar yapılmış ve generik olarak oluşturulan statik ve dinamik yük modellerinin oluşturduğu etkiler incelenmiştir. Güç akışı algoritmasında generik yük modellerinin aktif ve reaktif güç denklemleri ilave edilmesi ile yük barası gerilimleri ve aktif güç değişimlerinin farklı koşullardaki analizleri yapılmıştır [2-3]. Güç sistemlerinde kritik baranın belirlenmesi ile gerilim-akım ilişkisi üzerinde durulmuştur. Farklı çalışma koşullarında en küçük kareler yöntemi kullanılarak gerilimin aktif ve reaktif güç üzerinde oluşturduğu etkileri gerçek zamanlı olarak takip etmişlerdir [4]. Sürekli yük akışında kullanılan jokobyen matrisin geliştirmesi işlemi yapılmıştır. Güç sistemlerinde statik gerilim kararlılığı analizinde özdeğer analizi, tekil noktanın belirlenmesi, gerilim duyarlılığı metodu, aktif-reaktif güç kayıpları metodu ve enerji fonksiyonu metotlarında kullanılmıştır [5-7]. Çok baralı güç sistemlerinde generatörlerin devre dışı kalması, hat kopması ve arıza analizlerinde statik gerilim kararlılığı analizi incelenmiştir. Sürekli durum ve geçici durumların G-MYP'si karşılaştırılması yapılmıştır [8]. Gerilim ile maksimum yüklenme parametresinin iyileştirilmesinde Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) cihazları kullanılmıştır. FACTS cihazları ile maksimum yüklenme parametrelerinin çeşitli güç sistemlerinde göstermiş oldukları etkiler incelenmiştir [9-13]. Statik gerilim kararlılığının kullanımında diğer önemli unsurlardan biride transformatörlerdir. Transformatörlerde faz kaydırma işleminin yapılması G-MYP yönünden oldukça etkilidir. Yapılan bu çalışmada 14 baralı güç sisteminde bulunan faz kaydırıcı transformatörün farklı açı değerlerine sahip olduğu durumda sürekli yük akışı sonucunda belirlenen kritik baralar üzerinde oluşturmuş olduğu etkiler incelenmiştir.

## 2. STATİK GERİLİM KARARLILIĞI (STATIC VOLTAGE STABILITY)

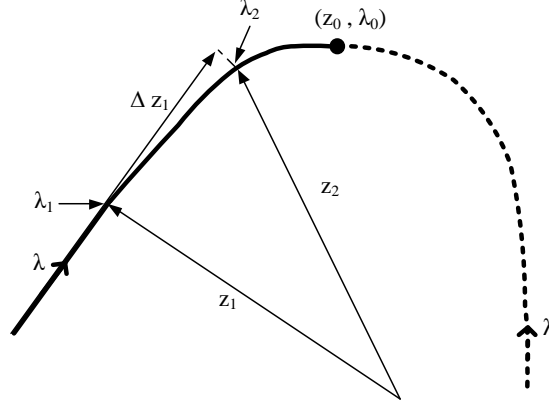
Statik gerilim kararlılığı doğrudan reaktif güç değişimine bağlı olarak değer almaktadır. Reaktif güç desteğinin sağlanması ile yük barasının yüklenebilir limitinin genişlemesi ve güç sisteminin çalışma koşulları iyileştirilmiş olur. Eğer reaktif güç desteği belirlenen sınırların altında kaldığında ve gerilim düşümü azalmaya başladığında sistem çökmeye gider. Bunun engellemek için reaktif güç bağlı olarak gerilim dengelemesi statik gerilim kararlılığı için önemli bir durum oluşturmaktadır. Sistemin gerilim- maksimum yüklenme parametresi ( $V, \lambda$ ) ile baranın aktif güç ve reaktif güç değeri arasındaki ilişki, Denklem1-2 ile ifade edilmektedir.  $P_{L0}$  ve  $Q_{L0}$  başlangıç aktif güç ve reaktif güç değerleri,  $P_L$  ve  $Q_L$  yükün aktif güç ve reaktif güç değerleri,  $\lambda$  ise maksimum yüklenme parametre değeridir [14].

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

$$Q_L = Q_{L0}(1 + \lambda) \quad (2)$$

### 3. SÜREKLİ YÜK AKIŞI (CONTINUOUS LOAD FLOW)

Gerilim ve maksimum yüklenme parametresi arasındaki çözümlemede sürekli yük akışı analizinden yararlanılmaktadır. Sürekli yük akışı güç akışı analizinde belli sistem modellerinin desteklenmesi olmaksızın belirli zorluklara karşı çözümlemede çok üstündür. Ayrıca sistem eşitliklerindeki tekil çözümleme durumunun oluşturacağı olumsuz durumlara karşı gerilim otomatik olarak değiştirme özelliğine sahiptir. Sürekli yük akışındaki strateji kullanımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sürekli yük akış metodu (Continuous load flow method)

Burada,  $(z_1, \lambda_1)$  denge noktaları olarak bilinen durumdur,  $\Delta \lambda_1$  sistem parametre değerinin değişmesi ve  $\Delta z_1$  vektör çözümlemesinde kullanılmaktadır. İlk adımda tahmin etme işlemi yapılmaktadır. Başlangıç olarak  $z_1 + \Delta z_1, \lambda_1 + \Delta \lambda_1$  değerleri üretilmektedir. Bu üretilen değerler sistem profilindeki  $z_2 + \Delta z_2$  yeni denge noktalarını düzenlemek için kullanılır [15].

### 4. FAZ KAYDIRICI TRANSFORMATÖRLER (PHASE SHIFTER TRANSFORMERS)

Faz kaydırıcı transformatörün aktif güç ve reaktif güç denklemleri Denklem 3-6 ile verilmiştir.

$$P_k = V_k^2 g_t - V_k V_m (g_t \cos(\theta_{km} - \alpha) + b_t \sin(\theta_{km} - \alpha)) \quad (3)$$

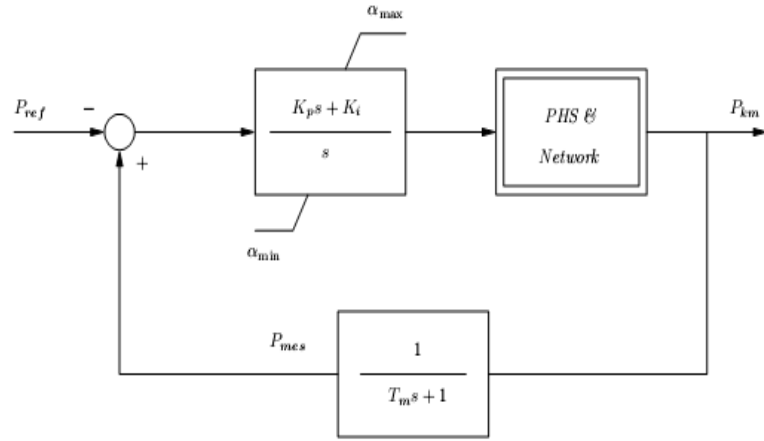
$$Q_k = -V_k^2 b_t - V_k V_m (g_t \sin(\theta_{km} - \alpha) - b_t \cos(\theta_{km} - \alpha)) \quad (4)$$

$$P_m = V_k^2 g_t - V_k V_m (g_t \cos(\theta_{km} - \alpha) - b_t \sin(\theta_{km} - \alpha)) \quad (5)$$

$$Q_m = -V_k^2 b_t + V_k V_m (g_t \sin(\theta_{km} - \alpha) - b_t \cos(\theta_{km} - \alpha)) \quad (6)$$

Denklem 3-6 da,  $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$  k ve m baralarındaki açı,  $g_{km}$ , k ve m baralarındaki kondüktans,  $b_{km}$ , k ve m baralarındaki süseptans,  $b_{k0}$  k barasındaki kondüktans ve  $g_{k0}$  k barasındaki süseptansdır. Faz kaydırıcı transformatörün blok modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.

∴ Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Statik Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi ∴



Şekil 2. Faz Kaydırıcı Transformatör Kontrol Şeması (Phase shifter transformer control scheme)

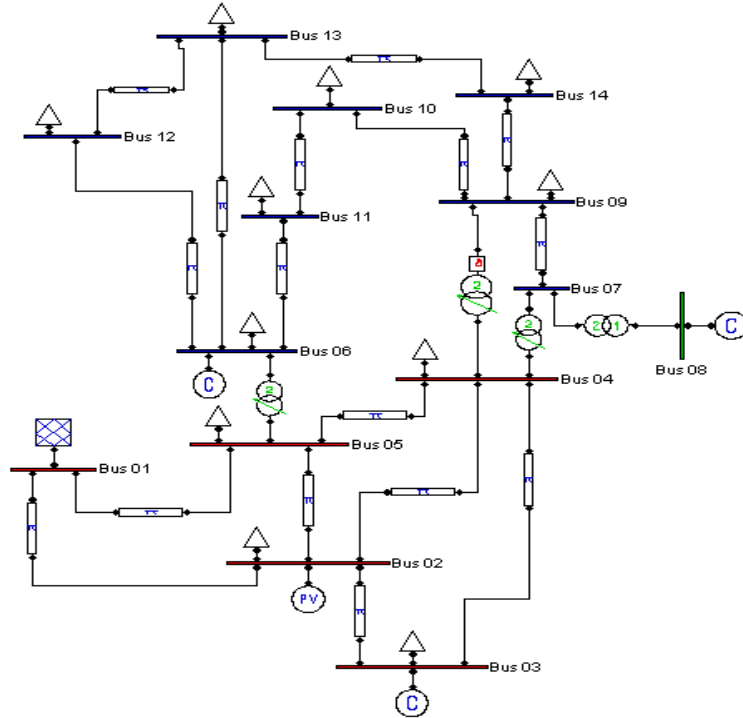
Ölçülen aktif güç ile referans aktif gücün farkı bir oransal integral devresine girmektedir. İntegral devresi faz açısının minimum ve maksimum değerinde ayarlamaktadır. Oransal integral çıkışı faz kaydırma işlemi şebeke göre ayarlayarak iki bara arasındaki faz kaydırma işlemi gerçekleştirilmiş olur. Transformatörde açı ve ölçülen açı hesaplaması denklem 7 ve denklem 8'de gösterilmiştir [16].

$$\alpha = -K_p (P_{hk} - P_{mes}) / T_m + K_i (P_{ref} + P_{mes}) \quad (7)$$

$$P_{mes} = (P_{hk} - P_{mes}) / T_m \quad (8)$$

## 5. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATON STUDY)

Benzetim çalışması yapılan sistem Şekil 3'de gösterilmiştir.

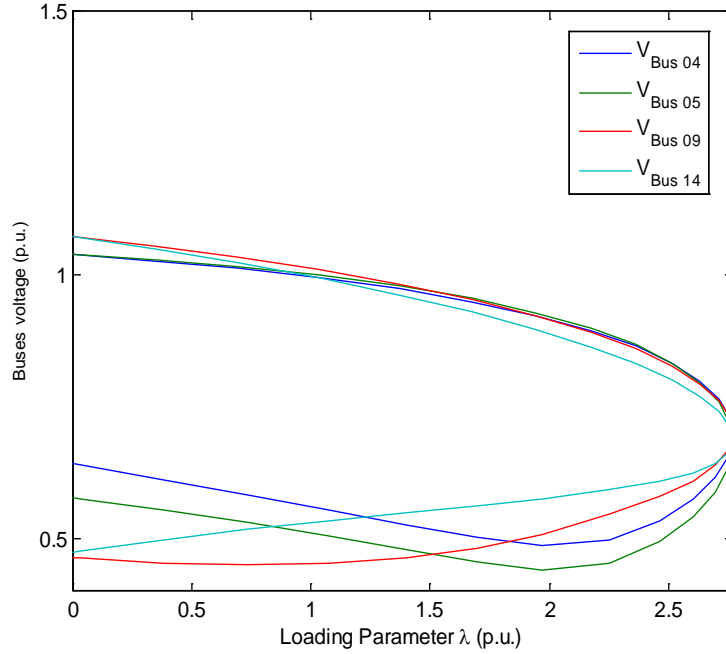


Şekil 3. 14 baralı sistem modellemesi (14 bus system modeling)

Bu sistemde 1 sonsuz bara generatör barası ve 9 yük barası bulunmaktadır. 1 numaralı bara sonsuz bara, 2,3,6 ve 8 numaralı baralar generatör barası ve diğer baralar yük barasıdır. Bu benzetim çalışmasında Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır [17]. 14 baralı güç sisteminde 4 ile 9 numaralı baralar arasında bulunan transformatörün faz açısı 25 derece'ye kadar değiştirilmiştir. 5-6 numaralar arasındaki transformatör, 4-7 numaralar arasındaki transformatör ve 7-8 numaralar arasındaki transformatör değerleri sabit kalmıştır.

## 6. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI (RESULT OF SIMULATION STUDY)

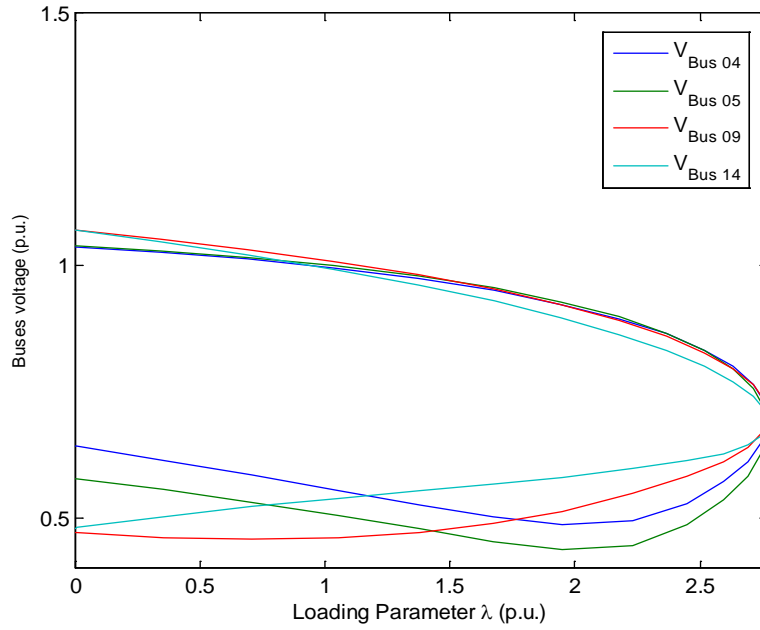
14 baralı güç sisteminde öncelikle sürekli yük akışı analizi yapılmıştır. bu anali sonucunda 4, 5,9 ve 14 numaralı baraları gerilimlerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. 4 ile 9 numaralı baralar arasındaki transformatör faz kaydırma açısı 30 derece kadar değiştirilmiştir. 4-9 numaralı baralar arasındaki transformatörün faz açısı 0 derece olduğu durumdaki sistem maksimum yüklenme parametre değeri 2.7674'dür.



Şekil 4. 4,5,9 ve 14 numaralı baraların statik gerilim analizi (2.7674) (Analysis of static voltage buses number 4, 5, 9 and 14 (2.7674))

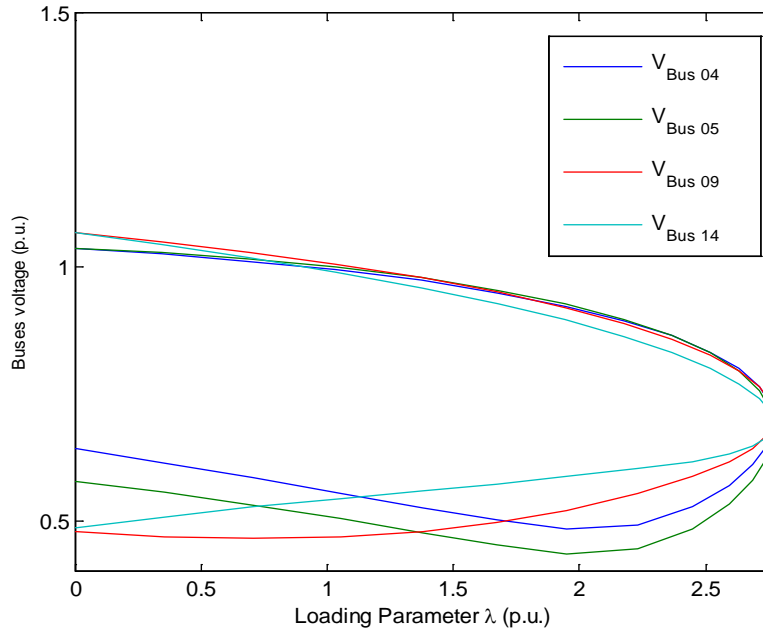
4-9 nolu baralar arasındaki transformatörün faz açısı 5 derece olduğu durumdaki sistem maksimum yüklenme parametre değeri 2.7699'dür.

∴ Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Statik Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi ∴



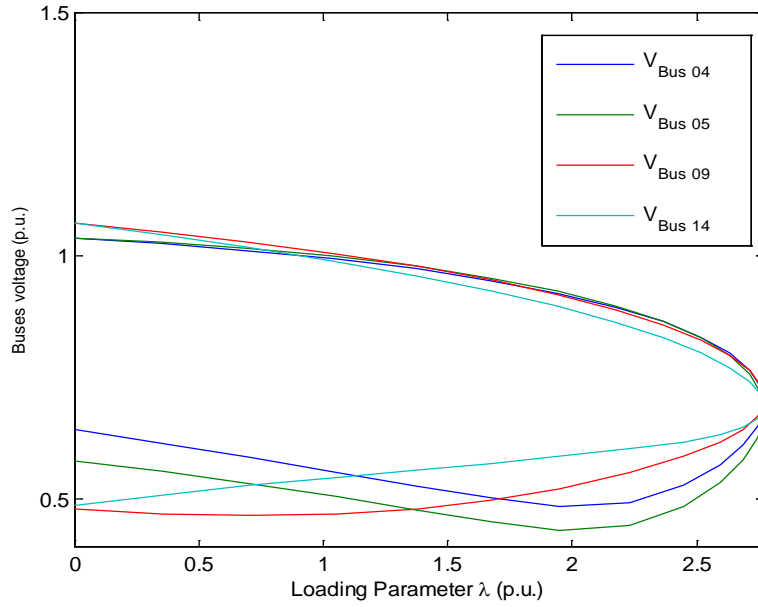
Şekil 5. 4,5,9 ve 14 numaralı baraların statik gerilim analizi (2.7699) (Analysis of static voltage buses number 4, 5, 9 and 14 (2.7699))

4-9 nolu baralar arasındaki transformatörün faz açısı 10 derece olduğu durumdaki sistem maksimum yüklenme parametre değeri 2.7705'dür.



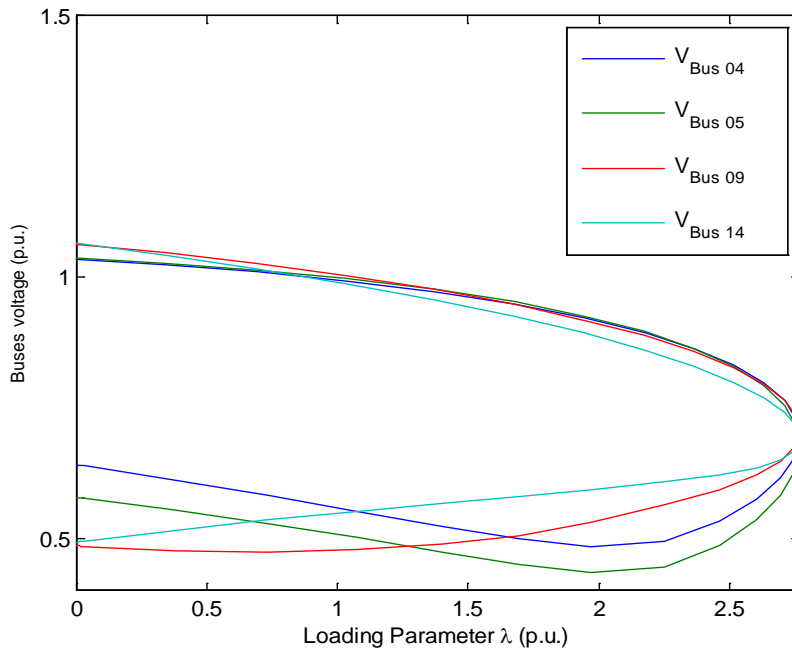
Şekil 6. 4,5,9 ve 14 numaralı baraların statik gerilim analizi (2.7705) (Analysis of static voltage buses number 4, 5, 9 and 14 (2.7705))

4-9 nolu baralar arasındaki transformatörün faz açısı 15 derece olduğu durumdaki sistem maksimum yüklenme parametre değeri 2.7690'dür.



**Şekil 7.** 4,5,9 ve 14 numaralı baraların statik gerilim analizi (2.7690) (Analysis of static voltage buses number 4, 5, 9 and 14 (2.7690))

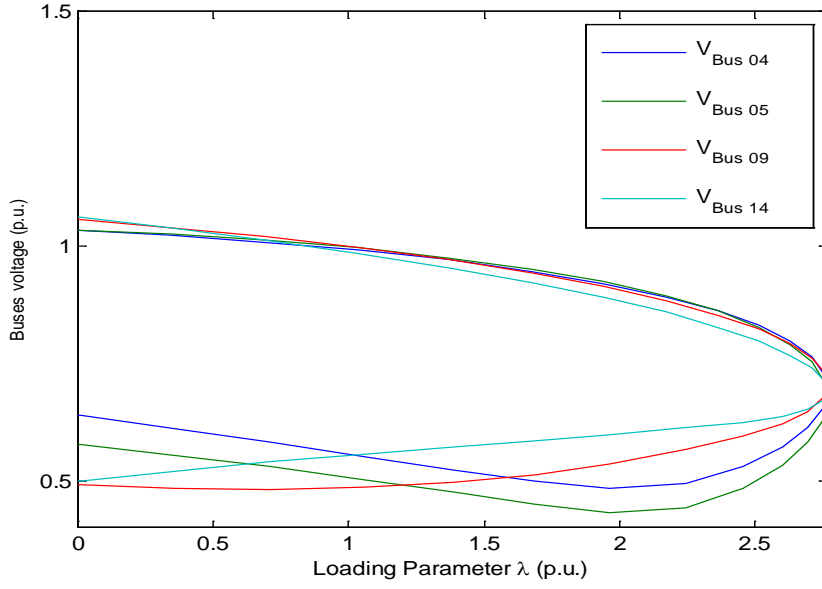
4-9 nolu baralar arasındaki transformatörün faz açısı 20 derece olduğu durumdaki sistem maksimum yüklenme parametre değeri 2.7655'dür.



**Şekil 8.** 4,5,9 ve 14 numaralı baraların statik gerilim analizi (2.7655) (Analysis of static voltage buses number 4, 5, 9 and 14 (2.7655))

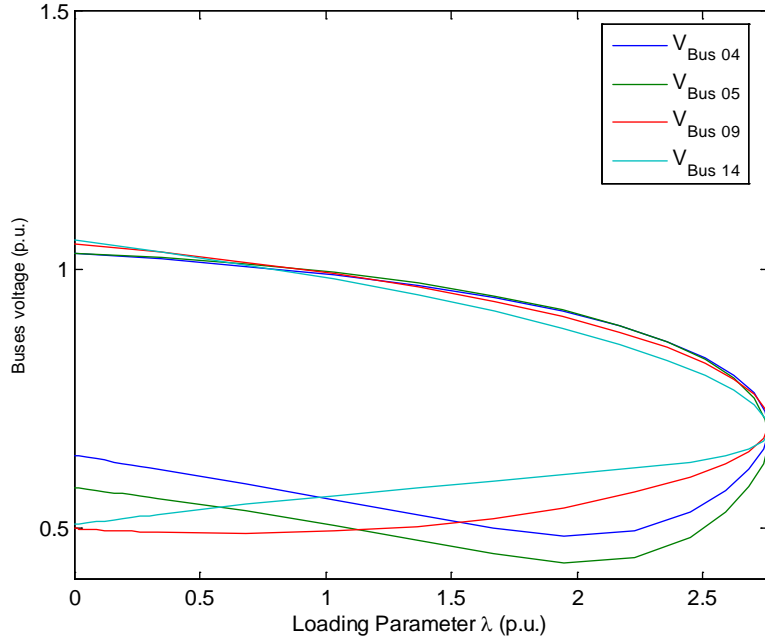
4-9 nolu baralar arasındaki transformatörün faz açısı 25 derece olduğu durumdaki sistem maksimum yüklenme parametre değeri 2.76'dır.

∴ Faz Kaydırıcı Transformatörlerin Statik Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi ∴



Şekil 9. 4,5,9 ve 14 numaralı baraların statik gerilim analizi (2.76) (Analysis of static voltage buses number 4, 5, 9 and 14 (2.76))

4-9 nolu baralar arasındaki transformatörün faz açısı 30 derece olduğu durumdaki sistem maksimum yüklenme parametre değeri 2.7527'dir.



Şekil 10. 4,5,9 ve 14 numaralı baraların statik gerilim analizi (2.7527) (Analysis of static voltage buses number 4, 5, 9 and 14 (2.7527))

Farklı far kaydırıcı transformatör ayarlarında 2 tane transformatörlerin statik gerilim kararlılığında elde edilen sonuçlar Tablo 1. de gösterilmiştir.



**Tablo 1.** Farklı faz açılarındaki G-MYP değerleri (Different phase shifting G-MYP values)

Trafo 4-9 kademe değeri faz kaydırıcı	Trafo 4-9 kademe değeri
0 derece	2.7674
5 derece	2.7699
10 derece	2.7705
15 derece	2.7690
20 derece	2.7655
25 derece	2.7650
30 derece	2.7527

4-9 numaralı iletim hattı arasında bulunan transformatörde faz açısı 10 dereceye kadar yükselirken 10-30 dereceler arasında ise maksimum yüklenme parametre değerinin azaldığı görülmüştür.

## 7. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Yapılan bu çalışma sonucunda IEEE 14 baralı güç sisteminde faz kaydırıcı transformatörün sistem üzerinde etkili olduğu görülmüştür. 4-9 numaralı baralar arasında bulunan transformatörlerin diğer baralardaki faz açısı sabit kalacak şekilde 5'şer derece arttırılması ile belli bir değerden sonra G-MYP değerinin azaldığı görülmüştür. 10 dereceye kadar artan G-MYP, 30 dereceye kadar azalmaya başlamıştır. Özellikle 25 ile 30 dereceler arasında G-MYP değerinin çok düştüğü gözlemlenmiştir. Sürekli yük akışı analizinde 4, 5, 9 ve 14 numaralı bara gerilimlerinin çok düştüğü görülmüştür. Kritik baralar olarak 4, 5, 9 ve 14 numaralı baralar seçilmiştir. Gerçekleştirilen bu analizde transformatörlerin statik gerilim kararlılığı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür.

## 8. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Verbič G., Pantoš M., Gubina F., (2006). On voltage collapse and apparent-power losses, *Electric power systems research*, 76(9), 760-767.
- [2]. Pal M.K., (1992). Voltage stability conditions considering load characteristics, *IEEE Transactions oPower Systems*, 7(1), 243-249.
- [3]. Xu W. Mansour Y. (1994). Voltage stability analysis using generic dynamic load models, *Transactions oPower Systems*, 9(1), 479-493.
- [4]. Haque M.H. (2004). Use of VI characteristic as a tool to assess the static voltage stability limit of a power system, *In Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 151(1), 1-7.
- [5]. Gao, B., Morison G. K., Kundur P. (1992). Voltage stability evaluation using modal analysis, *Transactions oPower Systems*, 7(4), 1529-1542.
- [6]. Lof P. A., Andersson G., Hill D. J. (1993). Voltage stability indices for stressed power systems, *Transactions oPower Systems*, 8(1), 326-335.
- [7]. Moon Y. H., Ryu H. S., Lee, J. G., Kim, B. (2001). Uniqueness of static voltage stability analysis in power systems, *In Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, 3, 1536-1541.
- [8]. Hasani M. Parniani M. (2005). Method of combined static and dynamic analysis of voltage collapse in voltage stability assessment, *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, 1-6.
- [9]. Kamarposhti M. A., Alinezhad M., Lesani H., Talebi N. (2008). 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.

- [10].Sode-Yome A., Mithulanathan N., Lee K. Y. (2005). Static voltage stability margin enhancement using STATCOM, TCSC and SSSC, *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*, 1-6.
- [11].Sode-Yome A., Mithulanathan N. (2004). Comparison of shunt capacitor, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement, *International Journal of Electrical Engineering Education*, 41(2), 158-171.
- [12].Sode-Yome A., Mithulanathan N., Lee K. Y. (2007). A comprehensive comparison of FACTS devices for enhancing static voltage stability, *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, 1-8.
- [13]. Dogan M., Tosun S., Ozturk A., Dosoglu M. K. (2011). Investigation of TCSC and SSSC controller effects on the power system. *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2011, *IEEE*, 127-131.
- [14]. Talebi N., Ehsan M., Bathaee S.M.T., (2004). Effect of SVC and TCSC control strategies on static voltage collapse phenomenon, *IEEE Southeast Conference*, 161-168.
- [15].Kazemi A., Badrzadeh B. (2004). 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.
- [16].Milano F., (2005). Documentation for PSAT version 1.3.4, 2005,[2007-12-30]. <http://www.Power.uwaterloo.ca/~fmilano/archive/psat-1.3.4.pdf>.
- [17].Milano F., (2005). An open source power system analysis toolbo, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20, 1199-1206.