

## OPTİMAL KAZANÇ TABLOLAMALI GÜÇ SİSTEM KARARLAYICISI TASARIMI

İrfan YAZICI, Ayhan ÖZDEMİR

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elek-Elektronik Müh. Böl. Esentepe-Sakarya  
iyazici@sakarya.edu.tr, aozdemir@sakarya.edu.tr

### ÖZET

Güç sistemlerinde görülen, 0.2 - 3.0 Hz frekans aralığında küçük genlikli salınımlar gerektiği gibi sönümlenmediklerinde sistemin güç iletim kapasitesini sınırlayarak güç sisteminin kararsızlığa gitmesine neden olabilirler. Güç sistem kararlayıcıları (GSK) bu salınımların sönümlenmesi için gerekli olan sönümleme momentini üreten sistemlerdir. Bu çalışmada üç farklı GSK yapısı; klasik faz ilerletici-geriletici, sabit kazançlı optimal ve optimal kazanç tablolamalı GSK yapıları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarında, optimal kazanç tablolamalı GSK'nın güç sisteminin çalışma noktasının değiştiği durumlarda diğer iki GSK yapısına oranla daha üstün bir performans sergilediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Güç sistem kararlayıcısı, optimal kontrolör, kazanç tablolama

## DESIGN OF OPTIMAL GAIN SCHEDULING BASED POWER SYSTEM STABILIZER

### ABSTRACT

Unsufficient damping of small magnitude electromechanical oscillations seen in a power system, in the 0.2-3 Hz frequency range, can present limitations on the power transfer capability of power systems which cause the instability. Power system stabilizers (PSSs) can enhance the dynamic stability of the system by increasing the damping torque of the synchronous machines in the system to damp the oscillations. In this study three kinds of PSS are investigated: conventional phase lead-lag PSS, optimal controller based PSS and optimum gain scheduling based PSS. Simulation results show that the optimum gain scheduling based PSS give a beter performance especially in operating point changes condition.

**Keywords:** Power system stabilizer, optimal controller, gain scheduling

### 1. GİRİŞ

Güç sistemlerinde sistemin doğal yapısından dolayı kaçınılmaz olarak meydana gelen küçük genlikli ve düşük frekanslı (0.2 - 3.0Hz) salınımlar gerektiği gibi sönümlenmediklerinde sistemin güç iletim kapasitesini sınırlayarak güç sisteminin kararsızlığa gitmesine neden olabilirler [1,2].

Günümüzde kullanılan, yüksek cevap hızlı otomatik gerilim regülatörlü (Automatic Voltage Regulator, AVR) uyarım sistemleri senkron generatörün senkronlayıcı momentini artırarak sistemin geçici kararlılığını

iyileştirirler. Ancak AVR sistemlerinin, sistemde oluşan elektromekanik salınımların sönümlenmesine dolayısıyla sistemin dinamik kararlılığının iyileştirilmesine olan etkileri oldukça sınırlıdır. Bunun yanısıra, çalışma noktasına bağlı olarak AVR'ler güç sistemine dinamik kararlılığı bozucu yönde etki edebilmektedir [2,3].

Güç sistemlerinde görülen bu salınımların sönümlenmesi ve sistemin dinamik kararlılığının iyileştirilmesi için uyarım sistemine destekleyici bir işaretin uygulanması gerekir.

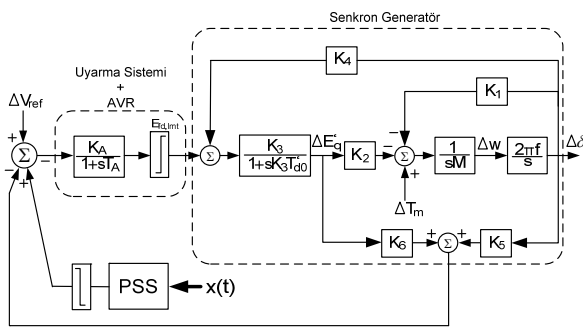
Bu destekleyici işaretin elde edildiği sistemler güç sistem kararlayıcısı (GSK) olarak adlandırılır. GSK'lar ilk kullanımlarından bu yana güç sistemlerinde görülen osilasyonların sönümlenmesinde etkili bir araç olarak kabul edilmektedir. GSK'nın temel fonksiyonu, generatör rotorunda oluşan salınımların sönümlenmesi için uyarım sistemi üzerinden destekleyici sönümleme momenti sağlamaktır[1-7].

Uzun yıllardır aktif bir araştırma konusu olan GSK tasarımı için birçok yöntem önerilmiştir [3-7]. GSK tasarımında çoğunlukla seçilen bir çalışma noktası için doğrusallaştırılmış model kullanılır. Doğrusallaştırılmış model kullanılarak tasarlanan GSK'lar seçilen çalışma noktası ve sistem parametreleri için optimum performans sağlarken çalışma noktası ve/veya sistem parametrelerindeki değişimler sonucunda önemli ölçüde performans kaybına uğramaktadır [5-7].

Literatürde bu problemlere çözüm olarak kendinden-ayarlamalı ve adaptif yapıları GSK lar önerilmiştir. Fakat, bu yöntemlerin karmaşıklığı ve hesaplama işlemlerin fazlalığından dolayı güç sistemlerinin gerçek zaman uygulamalarında kullanımları sınırlıdır.

Bu çalışmada öncelikle klasik ve optimal kontrolör tabanlı GSK yapıları tasarlanmış ardından çalışma noktasındaki değişimlerin neden olduğu performans kaybı probleminin çözümüne alternatif bir yol olarak optimal kazanç tablolu GSK tasarlanmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarında öncelikle çalışma noktasındaki değişimlerin klasik ve sabit kazançlı optimal GSK' ların üzerindeki etkileri gösterilmiş ardından optimal kazanç tablolu GSK'ların aynı koşullardaki performansı incelenmiştir. Benzetim sonuçlarından kazanç tablolu optimal GSK'nın diğer GSK yapılarına oranla daha üstün bir performans sağladığı gösterilmiştir.

## 2. SİSTEM MODELİ



Şekil 1. Lineerleştirilmiş SMIB blok diyagramı

Şekil1'den SMIB sistemi için doğrusallaştırılmış diferansiyel denklemler aşağıdaki gibi yazılabilir [1,2]

Güç sistemlerinin dinamik kararlılık çalışmalarında çoğunlukla bir iletim hattı üzerinden sonsuz güçlü baraya bağlı senkron generatör sisteminin (a single machine infinite bus, SMIB) seçilen bir çalışma noktası için elde edilen doğrusallaştırılmış modeli kullanılır [1,2]. Uyarım sistemi ve GSK ilave edilmiş SMIB sisteminin fonksiyonel blok diyagramı Şekil 1'de verilmiştir.

$$\Delta \dot{w} = -\frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{K_2}{2H} \Delta E'_q \quad (1)$$

$$\Delta \dot{\delta} = w_0 \Delta w \quad (2)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = -\frac{K_4}{T_{d0}} \Delta \delta - \frac{1}{T_{d0} K_3} \Delta E'_q + \frac{1}{T_{d0}} \Delta E_{fd} \quad (3)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = -\frac{K_A K_5}{T_A} \Delta \delta - \frac{K_A K_6}{T_A} \Delta E'_q - \frac{1}{T_A} \Delta E_{fd} + \frac{K_A}{T_A} u_E \quad (4)$$

(1)...(4) denklemlerinde  $\Delta w$  açısal hız sapmasını,  $\Delta \delta$  güç açısı sapmasını,  $\Delta E'_q$  toplam akıyı ve  $\Delta E_{fd}$  uyarım gerilimini göstermektedir [2].

(1)...(4) denklemleri,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5)$$

$$x(t) = [\Delta w \quad \Delta \delta \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{fd}]^T \quad (6)$$

$x(t)$  = durum vektörü,  $u(t)$  = kontrol işareti

formunda düzenlenirse, SMIB sistemi için durum-denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_1}{2H} & -\frac{K_2}{2H} & 0 \\ 2\pi f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T_{d0}} & -\frac{1}{T_{d0} K_3} & \frac{1}{T_{d0}} \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B = [0 \quad 0 \quad 0 \quad K_A / T_A]^T \quad (8)$$

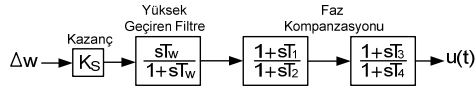
$K_1 \dots K_6$  katsayıları referans [1,3] de verilen ifadeler yardımı ile hesaplanabilir.

## 3. GSK TASARIMI

Bu çalışmada 3 farklı GSK yapısı; klasik GSK, sabit kazançlı optimal GSK ve optimal kazanç ayarlı GSK karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, çalışmanın bu kısmında sırasıyla klasik GSK, sabit kazançlı optimal GSK ve optimal kazanç tablolu GSK yapıları kısaca incelenecektir.

### 3.1. Klasik GSK

Basit yapısı ve uygulama kolaylığından dolayı en çok tercih edilen GSK yapısı olan klasik GSK' ye ait fonksiyonel blok diyagramı [2] Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Klasik GSK için fonksiyonel blok diyagramı

Şekil 2' de gösterilen klasik GSK yapısında  $T_w$  zaman sabitli yüksek geçiren filtre sürekli-hal değişimlerinin sisteme olan etkisini gidermek amacı ile kullanılır [2]. Filtre zaman sabiti  $T_w$  0.2-3Hz frekans aralığındaki salınım işaretlerini geçirecek şekilde seçilir. Şekil 2 den klasik GSK' lar için sürekli-zaman transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$G_{PSS}(s) = K_s \frac{sT_w}{1+sT_w} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \quad (9)$$

(9) ifadesinde  $K_s$  kararlayıcı kazancı,  $T_w, T_1...T_4$  ise kararlayıcının frekans karakteristiğini belirleyen zaman sabitleridir. Klasik GSK' nın tasarımı, 0.2-3Hz frekans aralığındaki salınımlar için istenen sönülmeyi sağlayacak şekilde frekans karakteristiğinin,  $T_w, T_1...T_4$ , ve kazancının,  $K_s$ , ayarlanması ile gerçekleştirilir. Şekil 2'de klasik GSK için giriş işareti olarak açısız hız sapması  $\Delta w$  verilmiştir. Bunun yanı sıra, güç sapması  $\Delta P$ , frekans sapması  $\Delta f$  veya hız sapması+güç sapması  $\Delta w + \Delta P$  da giriş işareti olarak kullanılabilir.

### 3.2. Optimal GSK

Optimal GSK yaygın olarak kullanılan kararlayıcı yapılarından birisidir [4,5,7]. Doğrusal ayrık zaman durum uzay modeli,

$$x[k+1] = Gx[k] + Hu[k] \quad (10)$$

ifadesi ile verilen sistem için performans fonksiyonu,

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N [x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)] \quad (11)$$

olarak tanımlanmış olsun.

Optimal kontrol teorisinde amaç; (11) ifadesi ile belirlenen performans fonksiyonunu minimum yapan kontrol işaretinin,

$$u[k] = -K_{op}x[k] \quad (12)$$

hesaplanmasıdır. (11) ifadesinde  $K_{op}$  optimal durum geri besleme kazanç matrisidir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$K_{op} = [R + H^T PH]^{-1} H^T PG \quad (13)$$

(13) ifadesinde  $P$ , ayrık Riccati denkleminin çözümü ile bulunur.

$$P = Q + G^T PG - G^T PH[R + H^T PH]^{-1} H^T PG \quad (14)$$

(11) ifadesinde  $Q$  kesin-yarı pozitif tanımlı,  $R$  ise kesin pozitif tanımlı ağırlık matrisleridir. Ağırlık matrisleri

tasarımcı tarafından, durum değişkenlerinin göreceli önemine bağlı olarak, sistem istenilen performansı gösterecek şekilde iteratif yöntemle belirlenir [8].

### 3.3. Optimal Kazanç Tablolamalı GSK

Kazanç tablolama (gain scheduling) yöntemi güç sistemleri dahil olmak üzere bir çok mühendislik alanına uygulanmış bir yöntemdir. Optimal kazanç tablolamalı kontrol yöntemi aşağıda belirtilen işlem basamaklarının yerine getirilmesi ile gerçekleştirilir [7,9,10]:

i-) İncelenen sistem için istenilen sayıda, farklı çalışma noktaları seçilir ve sistemin her bir çalışma noktası için doğrusal modeli elde edilir.

ii-) Ardından her bir model için bir önceki kısımda tanımlanan optimal kontrol teorisi yardımı ile optimal kazanç katsayılarını belirten kazanç matrisleri

$$[K_{op}]_i \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad n = \text{çalışma nokta sayısı}$$

hesaplanarak bir tablo oluşturulur.

Kontrolcü, çalışma anında, belirlenen kriterler dahilinde önceden hazırlanan bu tablodan uygun kazanç matrisini seçerek optimal kontrol işaretini üretir.

### 4. SAYISAL HESAPLAMALAR

Bu kısımda, benzetim çalışmalarında kullanılan sayısal değerler verilmiş ve bu değerler yardımı ile önceki kısımda tanımlanan 3 farklı GSK tasarlanmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılacak olan nominal parametreler Tablo 1 de belirtilmiştir. Tablo 1 de verilen değerlerden  $H$ ,  $T_{d0}$  ve  $T_A$  zaman (s) değerleri ise p.u sistemindedir.

Tablo 1. İncelenen sistemin nominal parametreleri	Değerler
Generator	$x_d = 1.6, x_q = 1.55, x_d' = 0.32$
IEEE ST1A tipi Uyarıcı	$K_A = 25, T_A = 0.06$ s $E_{fd,lim} = 5, u_{lim} = 0.12$
İletim Hattı	$r_e = 0, x_e = 0.4$
1. Çalışma Noktası	$P_1 = 0.8, Q_1 = 0.2$ $V_t = 1.0, f = 50$ Hz

Tablo 1 de verilen nominal parametreler ve 1. çalışma noktası  $P_1 = 0.8, Q_1 = 0.2$ , için  $K_1...K_6$  katsayıları ref. [1,3] de verilen ifadeler yardımı ile aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$K_1 = 1.07, K_2 = 1.20, K_3 = 0.36$$

$$K_4 = 1.54, K_5 = -0.034, K_6 = 0.41$$

Hesaplanan  $K_1...K_6$  katsayıları ve tablo 1 deki değerler ile (5) ifadesinde verilen sürekli-zaman  $A, B$  matrisleri düzenlenmiş ardından  $T_s = 0.005s$  örnekleme periyodu ile ayrıklaştırılarak sistemin ayrık-zaman durum uzay modeli için  $G, H$  matrisleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$G = \begin{bmatrix} 0.9995 & 1.8847 & -0.0006 & 0 \\ -0.0005 & 0.9995 & -0.0006 & 0 \\ -0.0013 & -0.0012 & 0.9973 & 0.0008 \\ 0.069 & 0.0658 & -0.8055 & 0.9197 \end{bmatrix}$$

$$H = [0 \ 0 \ 0.0008 \ 1.9987]^T$$

Çalışma noktasının değişmesi durumunda GSK ların performansını incelemek amacı ile 2.çalışma noktası olarak  $P_2 = 0.9$ ,  $Q_2 = 0.7$  seçilmiş ve benzer şekilde bu çalışma noktası içinde  $K_1...K_6$  katsayıları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$K_1 = 0.941, K_2 = 0.972, K_3 = 0.36 \\ K_4 = 1.244, K_5 = -0.083, K_6 = 0.461$$

#### 4.1. Klasik GSK tasarımı

Kısım 3.1 de ifade edildiği gibi klasik GSK ların tasarımı, aşım, yerleşme zamanı vb., kriterleri sağlayacak şekilde, kazanç  $K_s$  ve zaman sabitlerinin  $T_w, T_1...T_4$  ayarlanması ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada, sınırlı kontrol işareti dikkate alınarak,  $T_w = 2.5$ ,  $T_1 = T_3 = 0.1$ ,  $T_2 = T_4 = 0.005$ ,  $K_s = 40$  değerlerinin aşım ve yerleşme zamanı kriterleri seçilen 1. çalışma noktası için optimal performans sağladığı görülmüştür.

#### 4.2. Optimal GSK Tasarımı

Yukarıda belirtilen 1. çalışma noktası için optimal kazanç matrisi  $K_{op1}$  kısım 3.2 de ifade edildiği şekilde aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$K_{op1} = [9.7 \ -445 \ 67.2 \ 0.4]$$

#### 4.3. Optimal Kazanç Tablolamalı GSK Tasarımı

Optimal kazanç tablolamalı GSK tasarımı için yukarıda belirtilen her iki çalışma noktası için optimal kazanç matrisleri  $K_{op1}$  ve  $K_{op2}$  kısım 3.2 de anlatıldığı gibi hesaplanmış, sonuçlar aşağıda verilmiştir.

$$K_{op1} = [9.7 \ -445 \ 67.2 \ 0.4]$$

$$K_{op2} = [13.6 \ -434.1 \ 56.4 \ 0.4]$$

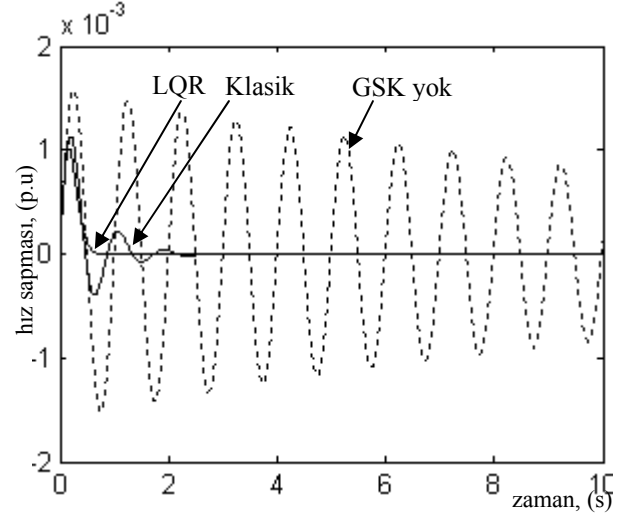
### 5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

#### 5.1. Normal Çalışma Durumu

Birinci çalışma noktası ( $P_1, Q_1$ ) için tasarlanan GSK' ların normal çalışma koşullarındaki performansını incelemek amacı ile Şekil 1 de blok diyagramı verilen SMIB sisteminde yük değişimlerini temsil eden  $\Delta T_m$  girişine 0.1p.u. değerinde bir basamak fonksiyonu

uygulanmıştır. Klasik GSK, optimal GSK ve GSK'sız SMIB sistemi için elde edilen sonuçlar Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3 ten görüldüğü gibi GSK kullanılmadığında sistemde göreceli olarak yüksek genlikli ve uzun süreli salınımlar oluşmakta ve bu salınımlar GSK' lı sistemlere oranla çok daha uzun sürede sönümlenebilmektedir.



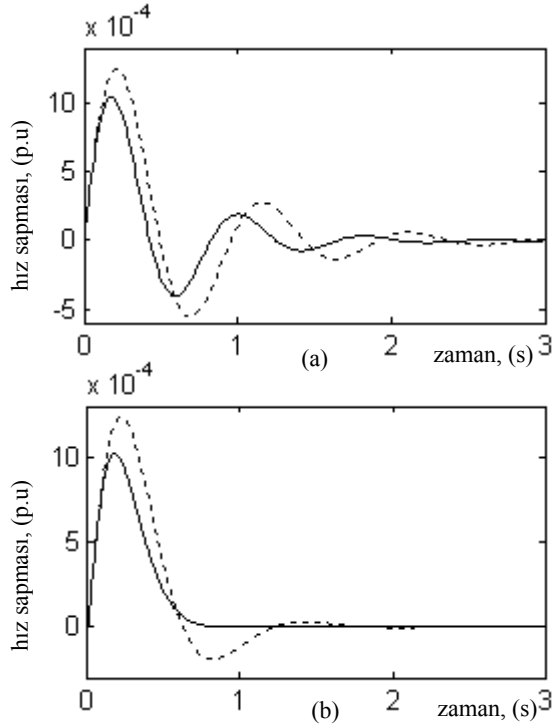
Şekil 3. 0.1 p.u.  $\Delta T_m$  değişiminde sistem cevabı

Yine Şekil 3'ten LQR tabanlı GSK'nın bozucu etkinin neden olduğu salınımları klasik GSK' ya oranla daha az aşım ve daha kısa sürede sönümlendiği görülmektedir.

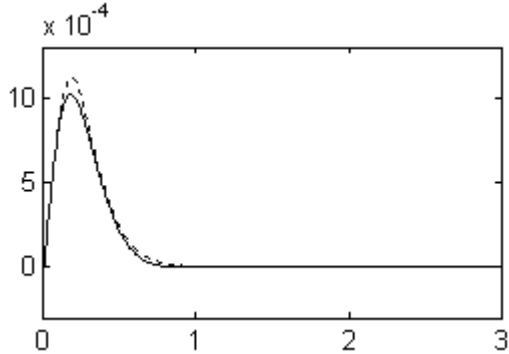
#### 5.2. Çalışma Noktasının Değişimi

Tasarlanan GSK'ların çalışma noktasının değişmesi durumundaki performansını incelemek amacı ile 1. çalışma noktası için tasarlanan GSK' lar 2. çalışma noktasında test edilmiştir. Bu amaçla bir önceki kısımda olduğu gibi  $\Delta T_m$  girişine 0.1 p.u. değerinde bir basamak fonksiyonu uygulanmış ve elde edilen sistem cevabı klasik GSK ve sabit kazançlı optimal GSK için aşağıda verilmiştir.

Şekil 4' ten görüldüğü gibi, çalışma noktasının değiştiği durumda da hem klasik GSK hem de sabit kazançlı optimal GSK salınımları bastırabilmiştir. Ancak her iki GSK'da tasarlandıkları 1.çalışma noktasına ( $P_1, Q_1$ ) oranla gözlemlenebilir derecede bir performans kaybına uğramışlardır. Böylece, Şekil 4'ten belirli bir çalışma noktası için tasarlanan klasik ve optimal GSK'ların çalışma noktasının değişmesi durumunda önemli ölçüde performans kaybına uğradıkları anlaşılmıştır. Bu problemin çözümüne alternatif bir yöntem olarak tasarlanan optimal kazanç tablolamalı GSK'nın 1. ve 2. çalışma noktalarında aynı koşullar altındaki performansı Şekil 5' te gösterilmiştir



Şekil 4. 0.1 p.u.  $\Delta T_m$  değişiminde sistem cevabı, a) klasik GSK b) sabit kazançlı LQR, — 1. çalışma noktası, ---2. çalışma noktası



Şekil 5. Optimal kazanç tablolamalı GSK'lı sistemin 0.1 p.u.  $\Delta T_m$  değişimine cevabı, — 1. çalışma noktası, ---2. çalışma noktası

Şekil 5' ten görüldüğü gibi optimal kazanç tablolamalı GSK çalışma noktasının değiştiği durumda klasik ve sabit kazançlı optimal GSK' ya oranla daha iyi bir performans göstermiştir.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada güç sistemlerinde dinamik kararlılığı artırmak amacı ile kullanılan 3 farklı GSK yapısı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmalarında, klasik ve sabit kazançlı optimal GSK' ların tasarlandıkları çalışma noktası için tatmin edici bir performans gösterdikleri, ancak, çalışma noktasının değişmesi durumunda önemli ölçüde performans kaybına uğradıkları gözlemlenmiştir. Kazanç tablolamalı optimal GSK' nın ise güç sisteminin çalışma noktasının değiştiği durumlarda dahi istenilen düzeyde bir performans

sergilediği gözlemlenmiştir. Burada sistem sadece iki çalışma noktası için incelenmiştir. Çalışma noktası artırılarak güç sisteminde oluşan salınımların daha yüksek performansla sönümlenmesi ve böylece güç sisteminin dinamik kararlılığının iyileştirilmesi sağlanabilir.

## REFERANSLAR

1. F. P. DeMello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control," IEEE Trans. on Power App. Syst., vol. 88(4), 1969, pp. 316-329.
2. P.Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
3. V. Mukherjee and S.P. Ghoshal, "Comparison of intelligent fuzzy based AGC coordinated PID controlled and PSS controlled AVR system", Elect. Power System Research, vol. 66, 2007, pp.679-689.
4. M.K. Sherbiny, M.M. Hasan, G.Saady and A.M.Yousef, "Optimal pole shifting for power system stabilization", Elect. Power System Research, vol. 66, 2003, pp.253—258.
5. A.M. El-Zonkoly, "Optimal tuning of power systems stabilizers and AVR gains using particle swarm optimization", Expert systems with App., vol. 31, 2006, pp 551-557.
6. M. L. Kothari, K. Bhattacharya, and J. Nanda, "Adaptive power system stabilizer based on pole shifting technique," IEE proceedings-C, vol. 143, 1996, pp. 96-98.
7. N.C.Pahalawaththa and U.D. Annakkage, "An optimum gain scheduling power system stabilizer", IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 1991, pp. 211-215.
8. C.L. Phillips and H.T.Nagle, "Digital control system analysis and design", Prentice Hall, 1995, pp.382-430
9. W. Qiu, V. Vittal, and M.Khammash, "Decentralized power system stabilizer design using linear parameter varying approach" IEEE Trans. Power Systems, vol. 19(4), 2004, pp. 1951-1960.
10. M.G.Yoon, V.A. Ugrinovskii and M. Pszczel, "Gain-Scheduling of Minimax Optimal State-Feedback Controllers for Uncertain LPV Systems" IEEE Trans. Auto. Control, vol.52(2), 2007, pp. 311-817.