

## Güç Sistemlerinde Alanlar-Arası Salınımlar için bir Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) Tabanlı Geniş-Alan Sönümlenme Sistemi Tasarımı

Mahir Bülent BAŞEL<sup>1</sup> ORCID 0009-0000-8596-4690

Ahmet Naci METE<sup>\*1</sup> ORCID 0000-0002-0406-8577

<sup>1</sup>Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin

Geliş tarihi: 12.09.2023

Kabul tarihi:25.12.2023

Atıf şekli/How to cite: BAŞEL, M.B., METE, A.N., (2023). Güç Sistemlerinde Alanlar-Arası Salınımlar için bir Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC) Tabanlı Geniş-Alan Sönümlenme Sistemi Tasarımı. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(4), 1061-1076.

### Öz

Elektromekanik düşük frekanslı salınımlar, büyük çaplı enterkonnekte güç sistemlerinin kararlılığı için başlıca kaygılar arasındadır. Etki ettikleri sistem bileşenlerine bağlı olarak bu düşük frekanslı salınımlar, lokal salınımlar, alanlar arası salınımlar, kontrol modu salınımları veya burulma modu salınımları olarak sınıflandırılabilirler. Alanlar arası salınım, birbirlerine zayıf bağlantı hatları ile bağlı yüksek miktarda güç transferinin yapıldığı iki alanda bulunan generatör gruplarının birbirlerine karşı salınımları ile meydana gelmektedir. Generatörlerin uyarım sistemine ek bir sönümlenme sinyali eklenmesi için kurulan güç sistemi kararlaştırıcıları (PSS) lokal modların sönümlendirilmesinde oldukça etkili bir çözüm iken alanlar arası modların sönümlendirilmesinde yetersiz kalmaktadırlar. Bunun nedeni alanlar arası modların gözlemlenebilirliğinin lokal sinyallerde düşük olmasıdır.

Güç sistemlerinde güç aktarım kontrolü ve geçici durum kararlılığı sağlama gibi amaçlarla kullanılan Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) cihazlar, alanlar arası modların gözlemlenebilirliğinin yüksek olduğu sinyallere (global sinyaller) doğrudan erişimi sağlandığında bu modların sönümlendirilmesine katkı vermektedirler. Global sinyal tabanlı PSS ve TCSC cihazların koordineli kullanımıyla alanlar arası salınım modlarının sönümlendirilmesinde etkili sonuçlar alınmaktadır. Bu çalışmada alanlar arası salınım çalışmalarında referans model olarak kullanılan 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi için TCSC tabanlı bir geniş alan sönümlenme kontrol sistemi tasarlanmıştır. Sönümlenme performansı öncelikle sistemde sadece TCSC aktif iken değerlendirilmiştir. Sonrasında global sinyal tabanlı bir PSS, TCSC üzerinden sisteme eklenmiş ve performans değerlendirmesi yeniden yapılmıştır. Benzetim sonuçları ile global PSS ve TCSC'nin koordineli kullanımıyla hem alanlar arası salınımın modlarının başarıyla sönümlendirildiği hem de alanlar arası güç aktarımının iyileştirildiği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alanlar-arası salınım, Geniş-alan sönümlenme kontrolü, Fazör ölçüm ünitesi (PMU), TCSC

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet Naci METE, mete@mersin.edu.tr

## **Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) Based Wide-area Damping System Design for Inter-area Oscillations in Power Systems**

### **Abstract**

Electromechanical low-frequency oscillations are among the primary concerns for the stability of large-scale interconnected power systems. Depending on the system components they affect, these low-frequency oscillations can be classified as local oscillations, inter-area oscillations, control mode oscillations, or torsional mode oscillations. Inter-area oscillation occurs when generator groups in two areas connected by weak tie lines involving large amount of power transfer experience oscillations relative to each other. While Power System Stabilizers (PSS) are an effective solution for damping local modes by adding an additional damping signal to the excitation system of generators, they are insufficient in dampening inter-area modes. This is due to the lower observability of inter-area modes in local signals.

Thyristor Controlled Series Compensators (TCSC) devices, which are used in power systems for purposes such as power transfer control and transient stability, also contribute to the damping of inter-area modes when direct access to signals with high observability (global signals) of inter-area modes are provided. Effective results in damping inter-area oscillation modes are achieved through the coordinated use of global signal based Power System Stabilizers (PSS) and TCSC devices. In this study, a wide-area damping control system based on TCSC was designed for a 2-area 4-generator power system, which is used as a benchmark model in inter-area oscillation studies. The damping performance was initially evaluated with only TCSC active in the system. Subsequently, a global signal-based PSS was added to the system via TCSC, and the performance evaluation was conducted again. Simulation results demonstrate that the coordinated use of global PSS and TCSC successfully dampens inter-area oscillation modes and improves inter-area power transfer.

**Keywords:** Inter-area oscillations, Wide-area damping control, Phasor measurement unit (PMU), TCSC

### **1. GİRİŞ**

Birbirlerine zayıf bağlantı hatlarıyla bağlı olan büyük ölçekli güç sistemleri arasındaki salınımlar 1920 yılından bu yana raporlanmıştır [1]. Alanlar arası ya da lokal olarak sınıflandırılabilen bu elektromekanik salınımlar generatörlerin doğal özellikleri sonucu oluşmaktadır [2]. Alanlar arası salınım frekansları 0.1-1 Hz arasında olup genellikle düşük sönümleme karakteristiğine sahiptirler. Düşük frekanslı bu salınımları sönümlemek için farklı metotlar kullanılmaktadır. Yıllardır yapılan çalışmalarda güç sistemi kararlılaştırıcıların (PSS) kullanımı lokal salınımların sönümlenmesinde maliyet ve tasarım kolaylıkları açısından en etkili çözüm olarak kabul edilmektedir. Bu sönümleme kontrolü, generator hızı, aktif güç ya da bara frekansı gibi lokal sinyaller kullanılarak elde edilen ek bir sönümleme sinyalinin generatörlerin uyartım

sistemine eklenmesiyle gerçekleştirilmektedir. PSS'lerin alanlar arası salınım modlarının sönümleme kontrolüne etkisi, bu modların gözlemlenebilirliğinin lokal sinyallerde zayıf olduğu durumlarda oldukça düşük olmaktadır. Alanlar arası salınım modlarının bir alandan gözlemlenebilir, diğer alandan da kontrol edilebilir olduğu durumlarda da PSS'ler bu salınımların sönümlenmelerinde yetersiz kalmaktadırlar [3].

PSS'lerin alanlar arası salınım sönümleme kontrolünde daha etkili olabilmesi, global sinyal olarak da bilinen fazör ölçüm üniteleri (Phasor Measurement Unit (PMU)) tarafından sağlanan geniş alan ölçümlerinin kullanılmasıyla mümkün kılınabilmektedir. Bu durum yapılan birçok çalışma ile gösterilmiştir [4-6]. Alanlar arası salınım modunun gözlemlenebilirliğinin en yüksek olduğu global sinyalin, PSS giriş sinyali olarak seçimi ve bu modun kontrol edilebilirliğinin en yüksek

olduğu generatörün, PSS kurulum yeri olarak seçildiği durumda, ideal olarak en iyi sönümleme performansı elde edilir.

Büyük değerli kapasitor voltajlarını ya da indüktör akımlarını kontrol etmek için yüksek güçlü elektronik anahtarlar gibi kontrol edilebilen bileşenler ile donatılmış elektrik iletim şebekeleri esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) olarak adlandırılırlar. FACTS kontrolörlerin asıl fonksiyonları güç akışı ve voltaj kontrolü olsa da bu cihazlarla aynı zamanda alanlar arası salınım sönümleme kontrolü de yapılabilmektedir [7-9]. İletim sistemlerine bu cihazların kurulmasıyla alanlar arası modlar için yüksek gözlemlenebilirlik içeriğe sahip sinyallere doğrudan erişim sağlanabilir. Fakat yüksek kurulum maliyeti nedeniyle FACTS cihazlarının sayısı genellikle alanlar arası salınım mod sayısından daha azdır. Bu nedenle bütün modları içerecek şekilde birden fazla giriş sinyali kullanan kontrol stratejilerinin geliştirilmesi bir zorunluluktur [10].

Chow ve arkadaşları ilk olarak 1995 yılında geniş alan güç sistemlerinde TCSC cihazlar kullanılarak sönümleme kontrolü yapılmasını önermişlerdir [11]. Yine aynı yıl içerisinde, Paserba ve arkadaşları detaylı bir çalışmayla geliştirdikleri TCSC modeli ile güç sistemlerinde TCSC cihazlarının potansiyel uygulamalarını göstermişlerdir [12]. Takip eden yıllarda doğrusal olmayan kontrol [13], doğrusal matris eşitsizlikleri (LMI) [14], bulanık mantık [15] gibi çeşitli kontrol algoritmaları ile TCSC cihazların alanlar-arası salınım sönümleme için kullanıma yönelik teknikler geliştirilmiştir.

Prakash ve arkadaşları [16] yaptıkları çalışmada 2 alanlı 4 generatörlü güç sisteminde çeşitli senaryolarla oluşturulan alanlar arası salınım modları, K-ortalama algoritması kullanılarak gruplandırılmış ve daha sonra her bir grup için farklı bir global PSS tasarımı yapılmıştır. PSS çıkış sinyalleri Gauss dağılımı ile ağırlıklandırılmış şekilde birleştirilmiş ve TCSC referans sinyaline eklenmiştir. Benzetim sonuçları ile önerilen iki aşamalı tasarımın, tek çalışma noktası için tasarlanana sönümleme sistemine göre daha gürbüz sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

TCSC ve aktif bozucu reddetme kontrolü (Active Disturbance Rejection Control (ADRC)) tabanlı bir geniş alan sönümleme sistemi yapısı [17]'de önerilmiştir. Bu çalışmada giriş sinyali olarak kullanılan global sinyaller 100 ms sabit zaman gecikmeli olarak modellenmiş ve zaman gecikmesi Pade yaklaşımı ile doğrusal sistem modeline eklenmiştir. Alanlar arası güç aktarım miktarı ADRC kontrolöre giriş sinyali olarak seçilmiş ve üretilen kontrol sinyali TCSC bloğuna eklenmiştir. Yine aynı araştırma grubu tarafından yapılan çalışmada TCSC tabanlı geniş alan sönümleme sistemi için optimal global sinyal seçimi 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi modeli kullanılarak gösterilmiştir [18]. Salınım modlarının gözlemlenebilirliğin yüksek olduğu sinyaller geometrik yöntem ile belirlenmiş ve artık (residue) metodu ile bu sinyaller için global PSS tasarımı yapılmıştır.

Sönümleme kontrolü için giriş sinyali seçiminde kullanılan geometrik ve artık ölçüm metodları yerine modal seyrek doğrusal kuadratik regülatör (MSLQR) tabanlı bir metotla sadece sönümlendirilmek istenen moda ait bilgileri içeren sinyalin elde edilebildiği tasarım yöntemi [19]'da önerilmiştir. Sistemin durum değişkenlerinin doğrusal kombinasyonlarıyla elde edilen giriş sinyali, sadece ilgilenilen salınım moduna ait bilgileri içermesi nedeniyle geniş alan kontrolörü olarak klasik PSS yerine sadece oransal kontrolün kullanımının yeterli olacağı 2 alanlı 4 generatörlü modelde eyleyici olarak TCSC'nin seçildiği benzetimle gösterilmiştir. Eyleyici olarak TCSC'nin seçildiği bir başka çalışmada geniş alan kontrolörü olarak uyarlamalı faz telafisi yapabilen fazör güç salınımı sönümleyicisi (P-POD) kullanılmıştır [20]. Çoklu modellenmiş uyarlamalı tahmin edici adı verilen yapıda, paralel çalışan Kalman filtreleri yardımıyla salınım modunun sönümlenmesi için gereken faz miktarı kestirilmekte ve sönümleme kontrol sinyalinin üretilmesi için kullanılmaktadır. Önerilen yapının başarımı, güç sistemindeki değişken çalışma noktaları ve zaman gecikmeli sinyaller kullanılarak sınanmıştır. [19]'a benzer şekilde salınım modunun sönümlendirilmesi için sadece o moda ait bilgilerin olduğu sinyali, modsal doğrusal kuadratik kontrolör (Modal LQR) kullanarak sentezleyen bu çalışmada, PMU tarafından ölçümlerin sağlanamadığı

durumlar için düşük dereceli gözleyici tasarımı da önerilmiştir [21]. Sistem benzetimde eyleyici olarak yine TCSC kullanılmıştır.

Alanlar arası salınım sönümlenmesi için TCSC cihazlarına uygulanacak kontrol sinyallerinin PMU'lar tarafından sağlanan global ölçümlerden seçilmesiyle daha etkin ve gürbüz (robust) sonuçlar elde edildiği yapılan çalışmalar ile raporlanmıştır [14,22]. Ayrıca salınım sönümleme performansının PSS ve FACTS cihazlarının koordineli çalışmasıyla daha da artırılacağı [23] ve [24] tarafından gösterilmiştir.

Sönümleme kontrolü için seçilen global PMU sinyallerinin ölçümü, işlenmesi ve iletimi aşamalarında kaçınılmaz olarak zaman gecikmeleri oluşur. PMU sinyallerinin gürültüden arındırılması ve Fazör Data Toplayıcıları (PDC) tarafından işlenmesi gibi faktörlerden kaynaklanan zaman gecikmeleri çoğunlukla deterministik yapıda olup sabit zaman gecikmesi olarak kabul edilebilmektedirler. Ancak iletişim ağından kaynaklı zaman gecikmesi ağ ortamı (fiber, PLC gibi), kullanılan protokol (UDP, TCP gibi) ve ağ trafik yoğunluğu gibi sebeplerden dolayı stokastik karakterdedir. Bu değişken zaman gecikmesi jitter olarak adlandırılır.

Zaman gecikmesinin sabit kabul edildiği durumlarda Pade yaklaşımı ile sonlu boyutta temsil edilen zaman gecikmesi güç sistemi modeline eklenir ve sönümleme kontrolör tasarımı bu modele göre yapılır [25]. Bu tasarımda Pade yaklaşımının derecesi zaman gecikmesini doğru şekilde temsil edebilecek büyüklükte olmalıdır. Smith tahmin edicileri sabit zaman gecikmelerinin olumsuz etkilerini bastırmak için kullanılan başka bir yöntemdir. Klasik ve birleşik Smith tahmin edicilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen sönümleme kontrol tasarımı teknikleri sırasıyla [26] ve [27] çalışmalarda önerilmiştir. Zaman gecikmesinin sabit kabul edilmesiyle tasarlanan salınım sönümleme kontrolörleri gerçek sistemlerdeki değişken zaman gecikmelerine karşı yeterli gürbüzlükte (robust) performans sağlayamamaktadırlar. Bu nedenle zaman gecikmelerinin belirsizlik olarak sistem tasarımına eklendiği  $H_2/H_\infty$  [28] ve  $\mu$  sentezi [29] gibi optimal

ve robust kontrol teknikleriyle gerçekleştirilen salınım kontrol sistem tasarımları önerilmiştir. Bu yöntemlerle tasarlanan kontrolörler, değişken zaman gecikmelerine karşı etkin olmalarına rağmen gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmaya uygun olmayan yüksek derecede ve karmaşık yapıdadırlar.

Değişken zaman gecikmelerine karşı yeterli gürbüzlükte olan ve aynı zamanda gerçek zamanlı sistemlerde kullanılacak pratik yapıda kontrolör tasarımı için zaman gecikmesinin ölçülmesi ve gerektiği kadar gecikme telafisi yapılmasına imkan sağlayan bir uyarlamalı kontrolör yapısı [30]'da yapılan çalışma ile önerilmiştir. Bu yapının çalışma prensibi, PMU sinyallerinin zaman gecikmelerinin zaman damgalarına göre gerçek zamanlı olarak hesaplanması ve zaman gecikmesinin bulunduğu aralığa göre daha önceden tasarlanmış olan Lead kontrolörlerin devreye alınmasıdır. Şimdiki çalışmanın yazarları tarafından yapılan bir başka çalışmada uyarlamalı zaman gecikmesi telafisi için zaman gecikmesi hesaplama periyotlarının seçimi ve eklenmesi gereken faz miktarının hesaplanmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir [31]. Önerilen kontrolör yapısı tasarlanan değişik profillerdeki zaman gecikmelerine karşı sınanmış ve zaman gecikmesi telafisinin gerçek zamana yakın olduğu gösterilmiştir. Şimdiki çalışmada geniş alan sistemindeki zaman gecikmesi ihmal edilmiş, TCSC ve global PSS'in beraber kullanıldığındaki salınım sönümleme başarımı TCSC'nin tek başına kullanıldığı durumdaki sönümleme performansı ile kıyaslanmıştır. Zaman gecikmelerinin sistem sönümleme performansına etkisi ve pratik sistemlerde gerçeğe yakın olarak bu etkinin nasıl telafi edilebileceği ile ilgili teknikler [31]'de ve çalışmanın referanslarında detaylandırılmıştır.

Bu çalışmayla amaçlanan Global PSS ve TCSC'nin koordineli kullanımının alanlar arası salınımın sönümlenmesine ve alanlar arası güç aktarımının iyileştirilmesine yönelik etkilerinin farklı senaryolar altında araştırılmasıdır. Bunun için öncelikle sadece TCSC tabanlı bir sönümleme sistemi tasarlanmış ve sönümleme başarımı benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Daha sonra bu sisteme global sinyal tabanlı PSS eklenmiş ve bu bloğun çıkış sinyali TCSC'nin referans sinyaline

eklenmiştir. Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink platformunda alanlar arası salınım sönümlenme çalışmalarında referans model olarak kullanılan 2 alanlı 4 generatörlü Kundur güç sistemi modeli [7] temel alınarak yapılmıştır. Kundur modelinde alanlar arası salınının artırılması amacıyla bazı değişiklikler yapılmıştır.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde organize edilmiştir; 2. Bölümde geniş alan kontrol sistemleri, modsal analiz, geometrik yöntem ve global PSS tasarımı ve son olarak TCSC hakkında kısaca bilgi verilmiştir. Takip eden bölümde TCSC tabanlı geniş alan sönümlenme kontrol sisteminin seçilen test modeli için tasarlanması ve sönümlenme performansının benzetim sonuçları kullanılarak değerlendirilmesine yer verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar verilmiştir.

## 2. YÖNTEM

### 2.1. Geniş Alan Kontrol Sistemleri

Bir elektrik şebekesi, optimal sayıda PMU yerleştirilmesiyle tamamen gözlemlenebilir hale getirilebilir. Şebeke dinamiklerinin gerçek zamanlı olarak gözlemlenebilmesi salınım bulma, açılma sapmalarının belirlenmesi, voltaj/frekans karalılığı değerlendirilmesi gibi birçok yeni uygulamanın ortaya çıkmasını ve durum tahmini, hata algılama gibi mevcut tekniklerin daha da geliştirilmesini mümkün kılmıştır. Eşzamanlı ölçüm teknolojisi (İng. synchronized measurement technology (SMT)) kullanarak şebeke durum değerlerini ölçen, buna bağlı olarak kontrol sinyalleri üreten ve bunları akıllı elektronik cihazlar (İng. intelligent electronic devices (IEDs)) aracılığıyla gerçekleyen sistemler geniş alan gözlemlenme, koruma ve kontrol sistemleri (İng. Wide-area Monitoring, Protection and Control (WAMPAC)) olarak adlandırılırlar. WAMPAC sistemlerinin ilk kullanımına 1990'lı yılların ilk yarısında Amerika Birleşik Devletlerinde başlanmıştır. O zamandan bu yana birçok ülke kendi ulusal WAMPAC sistemlerini kurmak için büyük bütçeli projeler uygulamaya koymuşlardır.

Geniş alan kontrolünün etkili sonuçlar vermesinin beklendiği uygulamalardan bir tanesi, alanlar arası

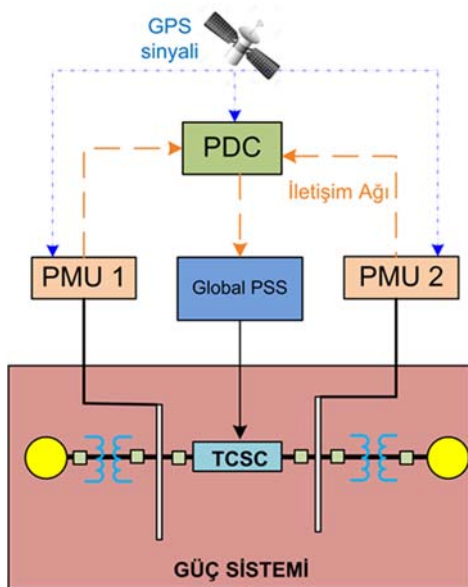
elektro-mekanik salınımların sönümlenme kontrolüdür. Şekil 1'de TCSC tabanlı örnek bir geniş alan sönümlenme sistemi gösterilmiştir. Bu sistemde güç sisteminde PMU'lar tarafından alınan GPS zaman etiketli ölçümler (voltaj, akım, frekans ve frekans değişim oranı) iletişim ağı ile Fazör Data Toplayıcısına (İng. Phasor Data Collector (PDC)) iletilir. Bir WAMPAC sisteminde hiyerarşik yapıya bağlı olarak birden çok seviyede PDC'ler bulunabilir ve PDC'ler arası bilgi alışverişi de yapılabilir. PDC'lerin SMT sistemlerinde aynı zamanda ölçüm değerlerinin arşivlenmesi, koruma cihazlarının durumunun daha sonra yapılabilecek analizler için saklanması gibi fonksiyonları da vardır. PDC'lere gelen ölçümler zaman etiketlerine göre düzenlendikten sonra sönümlenme kontrolörüne iletilir. Üretilen sönümlenme kontrol sinyali seçilen eyleyiciye ek bir referans sinyali olarak uygulanır. Bu çalışmada sönümlenme kontrolörü olarak global PSS ve eyleyici olarak da TSCS seçilmiştir.

Geniş alan sönümlenme kontrol sisteminin performansı sönümlenme kontrolü için kullanılan global sinyal ve üretilen kontrol sinyalinin uygulanacağı eyleyicinin konumu ile doğrudan ilintilidir. Bu seçimlerin en optimal yapılabilmesi için geliştirilen teknikler takip eden bölümde açıklanmıştır.

### 2.2. Modsal Analiz

Alanlar arası salınım sönümlenme kontrolünde atılacak ilk adım kararsız ve düşük sönümlenme karakteristiğine sahip olan modların belirlenmesidir. Modların belirlenmesinde ölçüm tabanlı ve model tabanlı olmak üzere iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Ölçmeye dayalı sistemler mod tahmininde zaman alanındaki ölçümleri kullandıkları için güç sistemi büyüklüğünün bu yöntemler için kısıtlayıcı bir yönü bulunmamaktadır. Kullanılan data tipine göre (ambiyans, ringdown veya her ikisi) geliştirilmiş olan Prony, Matrix Pencil, Yule-Walker gibi tahmin algoritmaları WAMPAC sistemlerde başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar [32]. Klasik modsal analiz metodu güç sisteminin belirlenen bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılması ile edilen durum-uzay modelini kullanır. Bu doğrusal model

çalışma noktası etrafındaki küçük değişimler için elektro-mekanik modları doğru şekilde belirleyebilmektedir. Ayrıca sönümleme kontrolü için seçilebilecek yüksek gözlemlenebilir içerikli giriş sinyallerinin seçimi için de bu model önemli bilgiler vermektedir. Büyük ölçekli sistemler için doğrusal model elde etmekteki güçlük bu yöntemin handikabıdır. Bu çalışmada kullanılan güç sistemi modelinin boyutu modsal analiz için uygun olduğu için bu yöntem tercih edilmiştir.



Şekil 1. TCSC tabanlı geniş alan salınım sönümleme kontrol sistemi

Doğrusal olmayan güç sistemi modelinin seçilen çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılmasıyla (1) ile verilen durum-uzay modeli elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

Burada,  $A$   $nxn$  boyutlu sistem matrisi,  $B$   $nxp$  boyutlu giriş matrisi,  $C$   $qxn$  boyutlu çıkış matrisi,  $x$   $nx1$  boyutlu durum vektörü,  $u$   $px1$  boyutlu giriş vektörü ve  $y$   $qx1$  boyutlu çıkış vektörüdür. Doğrusal modele ait özdeğerler (modlar) sistem matrisi  $A$  için  $I$   $nxn$  boyutlu birim matris olmak üzere (2) ile verilen karakteristik denklemin çözümü ile elde edilir.

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (2)$$

Sistem matrisi  $A$ 'nın öz değerlerinin incelenmesiyle güç sistemine ait salınım modları belirlenir. Öz değerler en genel halde kompleks olarak  $\lambda = \sigma \pm j\omega$  formatında elde edilirler. Salınım modlarının karakteristiği, öz değerlerin gerçekte kısımlarının incelenmesiyle belirlenir. Negatif reel değerli öz değerler zamanla sönümlenen (kararlı) yapıda salınım modlarıdır. Özdeğerlerin tümü kompleks düzlemin sol yarı açık kısmında yer alıyorsa sistem kararlıdır denir. Salınım modunun frekans bilgileri bu modların sanal kısımlarından elde edilir. Güç sistemindeki salınımın frekansı  $f$  ve sönümleme oranının  $\xi$  hesaplanmasında kullanılan eşitlikler (3)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} f &= \frac{\omega}{2\pi} \\ \xi &= \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

Öz değerlerin belirlenmesinden sonra modsal analiz öz vektörlerin hesaplanması ile devam eder. Öz vektörler, her bir öz değer  $\lambda_i$  için (4) ile verilen eşitlikleri sağlayan birer sütun vektörü olarak tanımlanırlar. Sistem matrisi  $A$  ile sağdan çarpılan öz vektörler, sağ öz vektör ( $\varphi_i$ ) ve sistem matrisi  $A$  ile soldan çarpılan öz vektörler, sol öz vektör ( $\psi_i$ ) olarak adlandırılırlar. Salınım modunun güç sisteminde hangi durum değişkeni üzerinde etkili olduğu sağ öz vektörlerin değerlendirilmesiyle bulunur. Sol öz vektör ise salınım modunun şekli hakkında bilgi vermektedir.

$$\begin{aligned} A\varphi_i &= \lambda_i\varphi_i \\ \psi_i A &= \lambda_i\psi_i \end{aligned} \quad (4)$$

### 2.3. Geometrik Yöntem ve Global PSS Tasarımı

Geniş alan sönümleme kontrol sistemleri tasarımında, giriş sinyali seçimi ve oluşturulan kontrol sinyalinin uygulanacağı eyleyicinin konum seçimi en önemli parametrelerdir. Salınım modlarını tamamen sönümlendirmek için ideal olan bütün generatörlere kontrol sinyalinin uygulanmasıdır. Ancak bu yaklaşım maliyet açısından uygulanabilir değildir. Bu nedenle en az sayıda kontrolör kullanılarak en etkili sönümleme performansı elde edebilmek için kontrolörün kurulacağı bölgenin ve giriş sinyalinin seçimi çok önemlidir.

Modsal analiz sonucu elde edilen bilgilerle salınım modlarının gözlemlenebilirliğinin en yüksek olduğu sinyallerin ve kontrol edilebilirliğin en büyük olduğu lokasyonu tespit etmek için sıklıkla kullanılan iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler Artık (residue) yöntemi [33] ve Geometrik yöntemdir [34]. Yapılan çalışmalarda Geometrik yöntemin daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir [4]. Bu çalışmada da Geometrik yöntem kullanılmıştır.

Buna göre; doğrusallaştırılmış sisteme ait  $A$ ,  $B$  ve  $C$  matrisleri (1)'deki gibi verilmiş olsun.  $A$  matrisinin  $n$  tane ayrık öz değere  $\lambda_i$ , ( $i=1,2,\dots,n$ ) sahip olduğu varsayımıyla bu öz değerlere ait sağ öz vektörler (4)'de tanımlandığı gibi  $\varphi_i$  ve sol öz vektörler  $\psi_i$  olsun. Ortogonal olan öz vektörlerin normalize edilmesi ile  $EF^H = FE^H = I_n$  eşitliği sağlanır. Burada,  $E = [\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \dots \varphi_n]$ ,  $F = [\psi_1 \psi_2 \psi_3 \dots \psi_n]$  ve  $I_n$  ise  $n \times n$  boyutunda birim matris olarak verilir. Geometrik yaklaşımda  $i$ . moda göre kontrol edilebilirlik indeksi ( $mci$ ) ve gözlemlenebilirlik indeksi ( $moi$ ) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [35]:

$$mci(k) = \cos(\theta(\psi_i, b_k)) = \frac{|b_k^T \psi_i|}{\|\psi_i\| \|b_k\|} \quad (5)$$

$$moi(l) = \cos(\theta(c_l^T, \varphi_i)) = \frac{|c_l^T \varphi_i|}{\|\varphi_i\| \|c_l\|} \quad (6)$$

Burada  $b_k$ ,  $B$  matrisinin  $k$ . sütununu,  $c_l$ ,  $C$  matrisinin  $l$ . satırını,  $\theta(\psi_i, b_k)$  giriş vektörü  $b_k$  ile sol öz vektör  $\psi_i$  arasındaki açıyı ve  $\theta(c_l^T, \varphi_i)$  ise çıkış vektörü  $c_l$  ile sağ öz vektör  $\varphi_i$  arasındaki açıyı temsil etmektedir.

Global sinyal seçiminde ölçüt olarak gözlemlenebilirlik indeksi ( $moi$ ) yanında sinyal ölçüm kolaylığı, ölçüm kalitesi gibi faktörler de gözletilmek durumundadır. Kurulum yeri olarak sönümlenmek istenen moda göre kontrol edilebilirlik indeksi ( $mci$ ) en yüksek olan generatör seçilir. Global PSS, alanlar arası modun kompleks düzlemdeki konumunun daha sol tarafa ötelenmesiyle sönümleme faktörünü artırmak üzere tasarlanmış bir lead kontrolör olarak tanımlanır. PSS kurulum yerinin ve global sinyalin seçiminden sonra global PSS tasarımı salınım frekansını değiştirmeden sönümleme oranını artırmak için

eklenmesi istenen faz miktarı  $\theta$  olmak üzere [4]'de önerildiği şekilde şu bağıntılarla tasarlanır:

$$H_{GPSS} = K_w \frac{T_w s}{1 + T_w s} \left( \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \right)^m \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin\left(\frac{\theta}{m}\right)}{1 + \sin\left(\frac{\theta}{m}\right)}, \quad T_1 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}, \quad T_2 = \alpha T_1 \quad (8)$$

Burada  $m$  lead kontrolör blok sayısı,  $\omega_i$  salınım frekansı,  $K_w$ ,  $T_w$  ise washout filtresine ait kazanç ve zaman sabiti değerleri olarak tanımlanmıştır. Salınım modunun aynı frekansta sönümleme oranını artırmak için gereken faz miktarı  $\theta$ , artık-faz metodu ile şu şekilde hesaplanır:  $A$ ,  $B$  ve  $C$  (1) ile verilen doğrusal modele ait durum-uzay modeli matrisleri olmak üzere, sisteme ait transfer fonksiyonu (9) ile verildiği şekildedir.

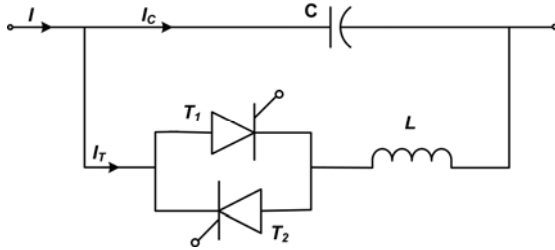
$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (9)$$

Burada,  $R_i = C\phi_i\Psi_i B$  eşitliği ile verilen  $R_i$ ,  $A$  matrisinin  $i$ . özdeğeri  $\lambda_i$ 'ye ait artık (residue) değeri olarak tanımlanır. Bu durumda  $\lambda_i$  modunun sönümlenmesi için gereken faz miktarı  $\theta_i$ , Eşitlik 10'da verildiği şekilde hesaplanır.

$$\theta_i = 180^\circ - \arg(R_i) \quad (10)$$

#### 2.4. TCSC

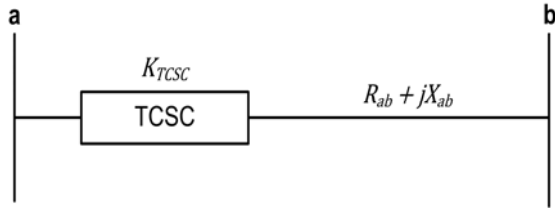
Tek hat şeması Şekil 2'de verilmiş olan TCSC, FACTS cihazlar ailesinin bir üyesidir. Bu cihazların güç sistemine bağlantıları seri olarak yapılmaktadır. Hat empedansının kontrol edilebilmesi nedeniyle değişken yük durumlarında TCSC'ler, çok iyi bir hat akımı kontrolü sağlamaktadır. Empedans ayarlanması bir endükdansa seri bağlı ters paralel bağlantılı iki tristör bloğu (tristör kontrollü reaktör (TCR)) ve hatta seri bağlı kapasitör aracılığıyla yapılmaktadır. TCSC'ler tetikleme açısı değiştirilerek endüktif ya da kapasitif olarak çalıştırılabilirler. Kapasitif çalışma için TCR reaktansı, kapasitör reaktansından büyük bir değere ayarlanır. Bu durumun tersi sağlandığında TCSC endüktif olarak çalışır.



Şekil 2. TCSC tek hat şeması

Kalıcı durumda iletim hattına bağlı bir TCSC modeli Şekil 3'te gösterilmiştir. İki bara arasındaki iletim hattının empedansı  $Z_{ab}=R_{ab}+jX_{ab}$  olarak verilsin. TCSC'in reaktansı  $X_{TCSC}$  ve hatta sağladığı reaktans kompanzasyonu  $K_{TCSC}=X_{TCSC}/X_{ab}$  olarak tanımlansın. Bu durumda TCSC'nin bağlı olduğu iletim hattının empedansı kalıcı durumda (11)'deki gibi verilir.

$$Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab}(1 - K_{TCSC}) \quad (11)$$



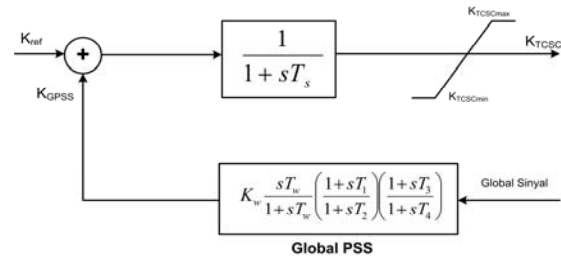
Şekil 3. İletim hattında kalıcı durum TCSC modeli

TCSC kullanımı güç sistemlerinde, mevcut güç transfer kapasitesini termal limitler dahilinde en yüksek değere artırabilmek ve geçici durum kararlılığını geliştirmek gibi faydaların yanında lokal ve alanlar-arası salınım modlarının sönümlenmesine de katkı sağlamaktadır. TCSC'lerin global PSS ile beraber kullanıldığı sistemlerde alanlar arası salınım sönümleme performansının daha yüksek olduğu yapılan çalışmalarla gösterilmiştir [23,24].

Alanlar arası salınım sönümleme kontrolü için TCSC ve global PSS'in beraber kullanıldığı bir kontrolör yapısı Şekil 4'de verilmiştir. Bu çalışmada da kullanılan yapıda global PSS tarafından üretilen kontrol sinyali TCSC referans sinyaline eklenmiştir. Bu bağlantıyla TCSC'nin dinamik modeli Eşitlik 12'de verildiği şekilde ifade edilir.

$$\frac{dK_{TCSC}}{dt} = \frac{1}{T_s} (K_{ref} + K_{GPSS} - K_{TCSC}) \quad (12)$$

Burada,  $K_{TCSC}$  TCSC tarafından sağlanan yüzdelik kompanzasyonu,  $K_{ref}$  yüzdelik kompanzasyon referans değerini,  $K_{GPSS}$  global PSS tarafından sağlanan ek kompanzasyon değerini ve  $T_s$  ise TCSC'nin zaman sabitini temsil etmektedir.



Şekil 4. TCSC ve Global PSS sönümleme kontrolörü

### 3. SİSTEM TASARIMI VE BENZETİM SONUÇLARI

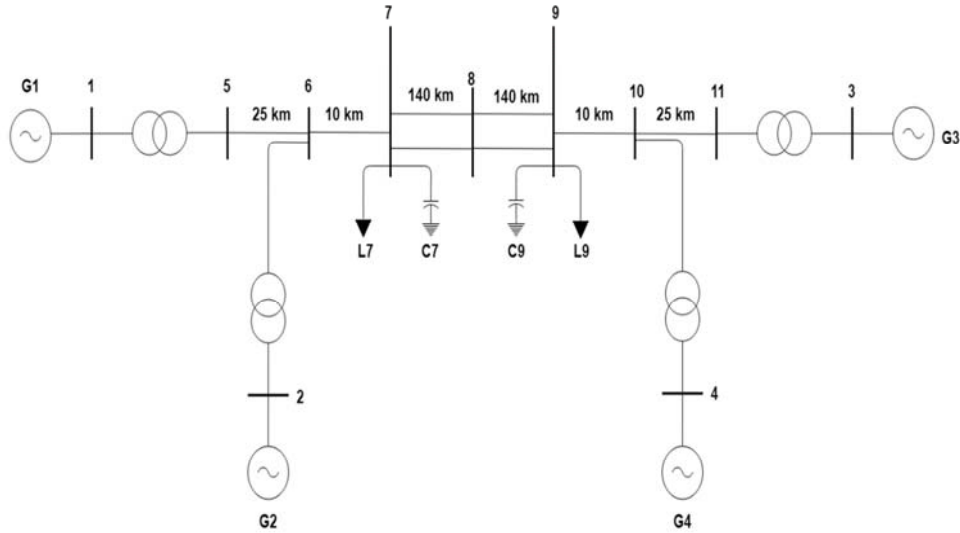
TCSC tabanlı sönümleme kontrol sistemi etkinliğinin değerlendirilmesi için alanlar arası salınım çalışmalarında temel model olarak kullanılan 2 alanlı 4 generatörlü model, bazı değişiklikler yapılarak kullanılmıştır. Tek hat şeması Şekil 5'de verilen modelde 7. ve 9. Bara arasındaki hat uzatılarak 280 km'ye çıkarılmış, 9. Baraya ek olarak 187 Mvars büyüklüğünde kapasitif yük eklenmiş ve generatörlerin atalet sabitleri  $H_{1,3,4} = 7.5$  ve  $H_2 = 3.5$  olarak değiştirilmiştir. Bu değişiklikler, alanlar arası mesafeyi ve güç transfer miktarını artırarak sistemin daha ağır şartlarda çalışmasını sağlamaya yöneliktir.

Generatör modeli olarak 6 durum değişkenli model kullanılmıştır. Generatör modeli için tanımlanan durum değişkenleri Çizelge 1'de verilmiştir. Tüm generatörlerin aynı tip statik uyarım sistemine (IEEE ST3A) ve aynı tip hız regülatörüne (THR) sahip oldukları varsayılmıştır. Lokal PSS kontrolörler (7) ile verilen formda iki kompanzasyon bloğu ( $m=2$ ) ile generatörlere eklenmiştir. Kontrol ve uyarım sistemleri için tanımlanan durum değişkenleri Çizelge 2'de verilmiştir. Buna göre tüm kontrol, uyarım ve tahrik sistemlerinin aktif olduğu güç sistemi



modelinde her bir generatör için toplam 15 durum değişkeni tanımlanmıştır. Bu durum için elde edilen doğrusal modeldeki sistem matrisi  $A$ ,  $60 \times 60$

boyutundadır. Benzetim modelinde kullanılan generatörler, kontrol ve uyarım sistemlerine ait nümerik veriler [36]'da verilmiştir.



Şekil 5. Düzenlenmiş 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi tek hat şeması

Çizelge 1. Generatör durum değişkenleri

Sembol	Durum değişkeni
$\delta$	Rotor açısı
$\omega$	Rotor hızı
$E'_q$	q Eksenli geçici (transient) gerilim
$\psi''_d$	d Eksenli alt geçici (subtransient) akı
$E'_d$	d Eksenli geçici (transient) gerilim
$\psi''_q$	q Eksenli alt geçici (subtransient) akı

Benzetim modelinde, generatörlere lokal PSS kontrolör eklenmeden önce elde edilen doğrusal model ile yapılan modsal analizde toplam 48 moddan sönümlenme katsayısı %10'un altında olan 3 salınım modu belirlenmiştir. Çizelge 3'de verilen bu salınım modlarından iki tanesi lokal mod, bir tanesi ise alanlar arası moddur.

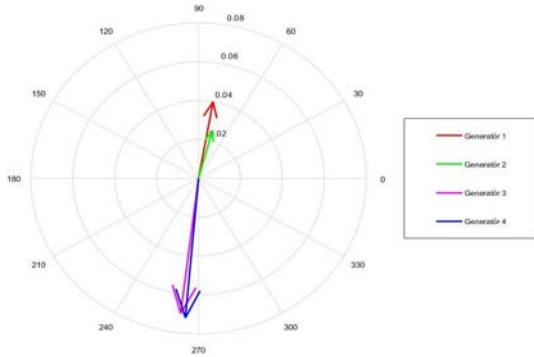
Çizelge 2. Generatör uyarım, tahrik ve kontrol sistemlerine ait durum değişkenleri

	Sembol	Durum değişkeni
Uyarıcı	V_TR	Gerilim transdüser çıkışı (pu)
	V_As	Regülatör gerilimi durum değişkenleri (pu)
	V_R	Regülatör çıkış gerilimi (pu)
PSS	pss1	Washout filtre durum değişkeni
	pss2	İlk ileri/geri kontrolörün durum değişkeni
	pss3	İkinci ileri/geri kontrolörün durum değişkeni
THR	tg1	Regülatör durum değişkeni
	tg2	Servo durum değişkeni
	tg3	Ara ısıtıcı (reheater) durum değişkeni

Çizelge 3. Salınım mod parametreleri

Mod tipi	Özdeğer	Salınım frekansı (Hz)	Sönümlenme katsayısı
Lokal mod 1	$-0.39 \pm j5.96$	0.94	0.06
Lokal mod 2	$-0.51 \pm j7.55$	1.2	0.06
Alanlar arası mod	$-0.09 \pm j2.06$	0.32	0.04

Şekil 6 ile verilen alanlar arası salınım moduna ait kompas çiziminde görüldüğü gibi aynı alanda bulunan generatör 1 ve generatör 2 diğer alanda bulunan generatör 3 ve generatör 4 ile salınım halindedirler.



Şekil 6. Alanlar arası salınım mod şeklinin kompas görünümü

Lokal modların sönümlenmesi için her bir generatöre transfer fonksiyonları (13) ile verilen lokal PSS kontrolörler eklenmiş ve modsal analiz tekrarlanmıştır. Çizelge 4’de görüldüğü gibi eklenen PSS’ler lokal modları başarıyla sönümlemiş ama alanlar arası modun sönümlenmesi için yetersiz kalmışlardır.

$$\begin{aligned}
 H_{PSS_{G1}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left( \frac{1+0.174s}{1+0.106s} \right)^2 \\
 H_{PSS_{G2}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left( \frac{1+0.02s}{1+0.05s} \right) \left( \frac{1+3.5s}{1+5.4s} \right) \\
 H_{PSS_{G3}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left( \frac{1+0.173s}{1+0.111s} \right)^2 \\
 H_{PSS_{G4}} &= 10 \frac{10s}{1+10s} \left( \frac{1+0.02s}{1+0.05s} \right) \left( \frac{1+3.5s}{1+5.4s} \right)
 \end{aligned} \quad (13)$$

Çizelge 4. PSS’ler eklendikten sonra belirlenen salınım mod parametreleri

Mod tipi	Özdeğer	Salınım frekansı (Hz)	Sönümleme katsayısı
Lokal mod 1	-0.4±j0.62	0.09	0.54
Lokal mod 2	-0.38±j0.61	0.97	0.52
Alanlar arası mod	-0.07±j2.52	0.4	0.02

Alanlar arası modun sönümlendirilmesi ve güç transferi için 7. ve 9. Bara arasındaki hattın orta noktasına TCSC eklenmiştir. Benzetimde TCSC’ye ait fazör modeli kullanılmıştır [37]. Eklenen TCSC kapasitif modda çalıştırılmakta ve hat empedansı kompanzasyonunu %40 seviyesinde sağlamaktadır. TCSC’ye ait dinamik veriler Çizelge 5 ile verilmiştir.

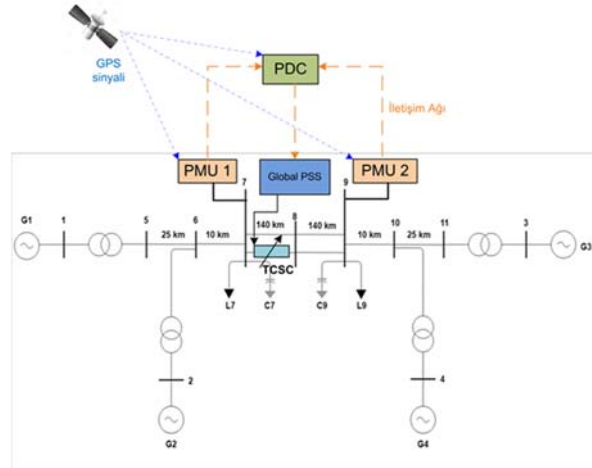
Çizelge 5. TCSC dinamik verileri

Açıklama	Sembol	Değer	Birim
Yüzdelerlik kompanzasyon		%40	
Kapasitans	$C$	45	$\mu F$
Endüktans	$L$	25	mH
$X_L/X_C$		0.16	
Rezonans frekansı	$f_r$	150	Hz
Ateşleme açısı	$\alpha$	70°	
PI kontrolör kazancı	$K_P$	0.8	
PI kontrolör integral kazancı	$K_I$	4.6	

Yine alanlar arası modun sönümlenmesine katkıda bulunmak ve güç aktarımını artırabilmek için bir global PSS tasarlanmış ve güç sistemine Şekil 4’de gösterildiği gibi TCSC üzerinden eklenmiştir. TCSC referans sinyaline ek olarak uygulanan bu sinyalle beraber TCSC’nin dinamik denklemi Eşitlik 12’de verildiği şekilde değişmiştir. Global PSS tasarımı için artık faz yöntemi ile salınım modunun sönümlenmesi için gereken faz miktarı Eşitlik 10 ile verilen bağıntıda salınım moduna ait artık (residue) vektörünün hesaplanmasıyla belirlenir. Hesaplanan faz kazancını elde etmek için Eşitlik 7 ve 8’de verilen yöntem ile global PSS tasarımı yapılır. Benzetim modelinde 30° derecelik faz kazancı için tasarlanan global PSS’e ait transfer fonksiyonu Eşitlik 14 ile verilmiştir.

$$H_{GPSS} = 6 \frac{10s}{1+10s} \left( \frac{1+1.1s}{1+0.65s} \right)^2 \quad (14)$$

Global PSS’e giriş sinyali olarak alanlar arası salınımın gözlenebilirliğinin yüksek olduğu iki alan arasında aktarılan güç miktarı global sinyal olarak seçilmiştir. Global PSS’in de benzetim modeline eklenmesiyle geniş alan salınım sönümleme kontrol sistemi Şekil 7’de verilen yapıda oluşturulmuştur. Bu yapıda 7. ve 8. baralarda bulunan PMU’lar ile zaman etiketli ölçümlerin iletişim ağıyla PDC’ye gönderildiği, PDC’de zaman etiketlerine göre düzenlenen ölçümlerin yine iletişim ağı ile geniş alan sönümleme kontrolörü olarak tasarlanan global PSS’ye iletilmesi varsayılmıştır. Bu çalışmada iletişim ağı kaynaklı zaman gecikmesi ihmal edilmiştir. Zaman gecikmesinin sönümleme performansına etkisi ve bunun telafisi için gerçek zamanlı sistemlere uygun uyarlamalı bir kontrolör yapısı [31]’de önerilmiştir.



Şekil 7.2 alanlı 4 generatörlü model için TCSC tabanlı geniş alan salınım söndürme sistemi

Tasarlanan geniş alan sönümleme kontrol sisteminin performans değerlendirmesi için iki farklı arıza türünü içeren üç senaryo şu şekilde oluşturulmuştur;

*Senaryo 1:* 8. baradan 0.4 saniyelik faz-toprak arası kısa devre arızası uygulanmıştır.

*Senaryo 2:* Generatör 1'in referans voltajında 0.2 saniye boyunca %5'lik artış uygulanmıştır.

*Senaryo 3:* 9. baradan 0.4 saniyelik faz-toprak arası kısa devre arızası uygulanmıştır.

Uygulanan her senaryo için benzetim modelinde sadece lokal PSS'lerin aktif olduğu, lokal PSS ve

TCSC'nin aktif olduğu ve son olarak da bu kontrol elemanlarına global PSS'nin eklendiği durumlar için sönümleme performansları, iki alan arasında iletilen güç miktarının zamanla değişimi kullanılarak belirlenmiştir. Performans değerlendirmeleri için salınım tepe değerleri, oturma zamanı (%5'lik bant), aktarılan güç miktarı, gibi kriterlerle beraber hata sinyali tabanlı performans fonksiyonlarından mutlak hata toplamı (IAE), hata karelerinin toplamı (ISE), zaman ağırlıklı mutlak hata toplamı (ITAE) ve zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı (ITSE) kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6 ile verilmiştir.

Çizelge 6. Kontrolör yapılarının performans değerlendirmeleri

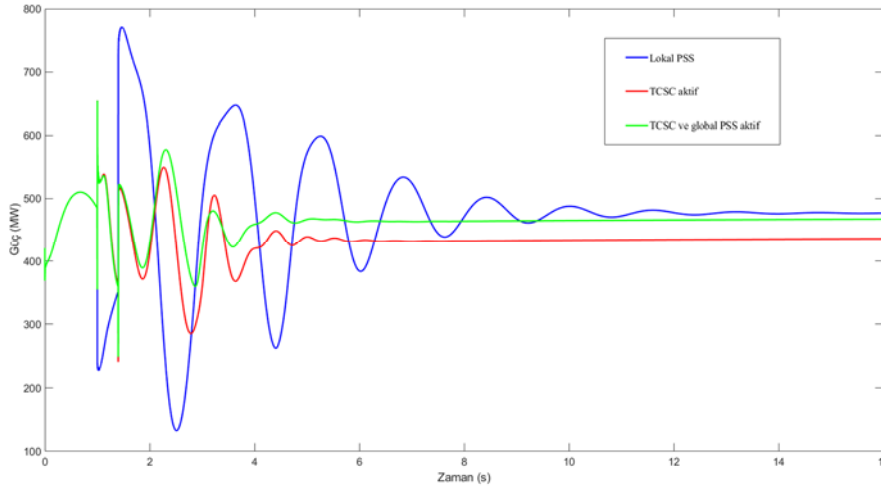
Senaryo	Kontrolör	Oturma zamanı (sn)	Aktarılan güç (MW)	Salınım tepe noktası (MW)	IAE	ISE	ITAE	ITSE
Senaryo 1	Sadece lokal PSS	7.5	477	770	4.31	13.04	26.66	95.4
	TCSC aktif	2.9	435	654	1.32	1.68	1.34	1.68
	TCSC ve global PSS aktif	2.7	467	577	1	1	1	1
Senaryo 2	Sadece lokal PSS	6.1	475	548	1.41	1.98	1.29	1.82
	TCSC aktif	3.7	432	551	1.01	1.83	2.78	5.03
	TCSC ve global PSS aktif	3.1	477	518	1	1	1	1
Senaryo 3	Sadece lokal PSS	16	480	665	2.04	1.87	1	1
	TCSC aktif	8	432	813	1	1	1.67	1.23
	TCSC ve global PSS aktif	9.7	480	813	1.19	1.17	1.98	1.61

### Senaryo 1:

Bu senaryoda alanlar arası salınım modunu tetiklemek için 8. baradan 0.4 saniyelik faz-toprak arası kısa devre arızası uygulanmıştır. Şekil 8'de uygulanan arıza sonrası benzetim sistemindeki alanlar arası güç aktarımı grafiği verilmiştir. Güç sisteminde sadece lokal PSS'lerin olduğu durumda beklenildiği gibi alanlar arası mod nedeniyle güç aktarımında tepe noktası 770 MW'a ulaşan salınımlar oluşmuş ve bu salınımın sönümlenmesi 7.5 sn (%5 lik oturma zamanı) sürmüştür. Sisteme TCSC eklendiğinde, alanlar arası güç aktarımındaki salınımın 2.9 saniyede sönümlendiği ve tepe noktasının 654 MW'a düştüğü görülmüştür. Ancak güç akış analizine göre 480 MW olması gereken aktarılan güç 435 MW seviyesinde kalmıştır. Güç aktarımındaki bu düşüşün ikinci alanın frekansının birinci alandan daha yüksek olması nedeniyle bu

alandaki reel güç ihtiyacının az olması nedeniyle olabileceği düşünülmektedir.

Global PSS'in sönümleme kontrolü için sisteme eklenmesiyle uygulanan arıza sonrası oluşan salınımın tepe noktası 577 MW'a düşmüş ve salınım 2.7 saniyede sönümlendirilmiştir. Alanlar arası aktarılan güç miktarı da 467 MW'a çıkmıştır. Hata sinyali tabanlı yapılan performans değerlendirmesinde IAE, ISE, ITAE ve ITSE kriterlerinin hepsine göre en etkili sönümleme performansının yine TCSC ve global PSS'in beraber kullanımı ile elde edildiği görülmüştür. Değerlendirilmesi yapılan benzetim sonuçlarına ait nümerik veriler Çizelge 6 ile verilmiştir. Çizelgede hata sinyali tabanlı değerlendirme kriterlerine ait değerler normalize edilerek verilmiştir.

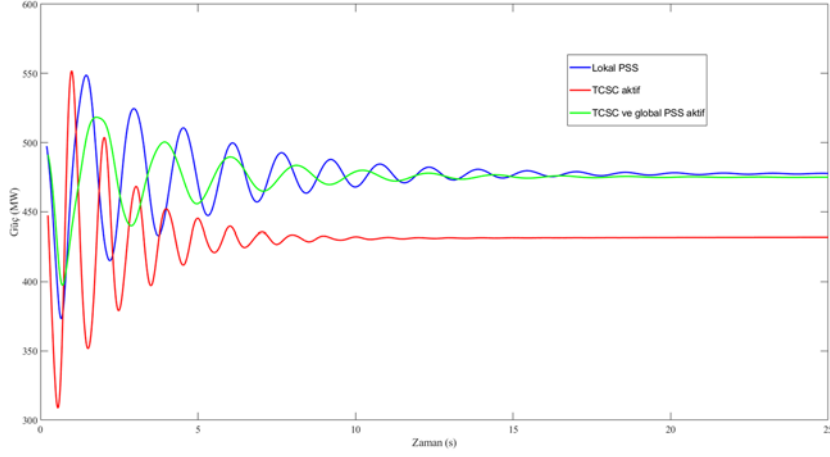


Şekil 8. Senaryo 1 ile elde edilen güç aktarımı

### Senaryo 2:

Alanlar arası salınım modunun, generatör 1'in referans voltajındaki %5 artırılmasıyla tetiklendiği bu senaryoda gerçekleştirilen güç transferinin zamanla değişimi Şekil 9 ile verilmiştir. Güç sisteminde sadece lokal PSS'lerin aktif olduğu durumda tepe noktası 548 MW olan salınım 6.1 saniyede sönümlendirilmiştir. TCSC'nin aktifleştirilmesiyle salınımın sönümlendirilmesi 3.7 saniyeye düşürülmüş ancak salınım tepe değerinde bir iyileşme görülmemiştir. Aktarılan güç miktarı

ise Senaryo 1'de olduğu gibi azalmış ve 432 MW olarak gerçekleştirilmiştir. Global PSS kontrolörün güç sistemine eklenmesiyle güç aktarımı 477 MW'a çıkarılmıştır. Ayrıca salınım tepe noktası 518 MW'a düşürülmüş ve 3.1 saniyelik oturma zamanı ile daha etkili bir sönümleme performansı elde edilmiştir. TCSC ve global PSS'in birlikte kullanıldığı sönümleme kontrol sistemi IAE, ISE, ITAE ve ITSE kriterlerine göre de en iyi sönümleme performansına sahiptir.

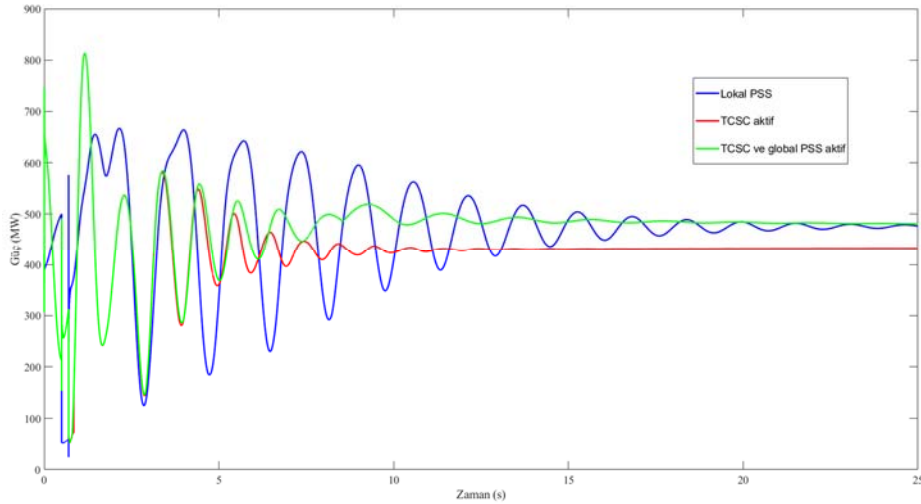


Şekil 9. Senaryo 2 ile elde edilen güç aktarımı

### Senaryo 3:

Faz-toprak arası kısa devre arızasının 9. Baraya uygulanmasıyla oluşan alanlar arası güç aktarımı Şekil 10'da verilmiştir. Salınımın en hızlı sönümlendirilmesi 8 saniye ile TCSC'nin aktif olduğu durumda gerçekleşmiştir. Global PSS'in güç sistemine eklenmesiyle güç aktarımı

artırılabilmiş ancak salınım sönümlenme süresi 9.7 saniyeye çıkmıştır. Ayrıca salınım tepe noktaları hem TCSC'nin hem de global PSS'nin aktif olduğu iki durum içinde 813 MW olarak görülmüştür. TCSC, IAE ve ISE kriterlerine göre en etkili sönümlenme performansı göstermiştir.



Şekil 10. Senaryo 3 ile elde edilen güç aktarımı

## 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, birbirlerine zayıf bağlantı hatları ile bağlı yüksek miktarda güç transferinin yapıldığı iki

alanda bulunan generatör gruplarının birbirlerine karşı salınımları ile meydana gelmekte olan alanlar arası salınımların sönümlendirilmesi için TCSC tabanlı bir geniş alan sönümlenme kontrol sistemi

tasarımı yapılmış ve benzetim sonuçlarıyla performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Benzetim modeli olarak 2 alanlı 4 generatörlü güç sistemi bazı parametreleri değiştirilerek kullanılmıştır. Performans başarımları üç farklı senaryo altında belirlenmiştir.

Benzetim modelinde hiçbir lokal kontrol elemanı yokken elde edilen doğrusal model ile yapılan modsal analizle iki tane lokal bir tane de alanlar arası mod belirlenmiştir. Generatörlere eklenen lokal PSS'ler, lokal modları sönümlendirmişler ancak alanlar arası modun sönümlendirilmesinde etkisiz olmuşlardır. Alanlar arası bağlantı hattının ortasına eklenen TCSC ile alanlar arası mod sönümlendirilmiş ancak güç aktarımı düşmüştür. Alanlar arası güç transferini artırmak ve salınım modunun sönümlenme performansını artırmak için bir global PSS artık faz metodu ile tasarlanmış ve TCSC'nin referans sinyali üzerinden sisteme eklenmiştir. PSS için global sinyal olarak alanlar arası aktarılan güç miktarı seçilmiştir. TSCS ve global PSS'in beraber kullanımıyla hem güç transfer miktarının artırıldığı hem de alanlar arası modun sönümlenme performansının iyileştirildiği belirlenen üç senaryodan ikisinde yapılan benzetimlerle gösterilmiştir. Senaryo 3'de global PSS, salınımın sönümlenmesini 9.7 saniyeye düşürse de TCSC'nin tek başına kullanıldığı durumdaki 8 saniyelik oturma zamanından daha yavaş bir performans gösterilmiştir. Bu durum salınım modunun gözlemlenebilirliğinin daha yüksek olduğu bir global sinyal seçimi ile telafi edilebilir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2018-2-TP2-2973 numaralı araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

1. IEEE Special Publication, 1995. Inter-area Oscillations in Power Systems (95-TP-101-1995).
2. Klein, M., Rogers, G.J., Kundur, P., 1991. A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in

- Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 6(3), 914-921.
3. Heniche, A., Kamwa, I., 2002. Control Loops Selection to Damp Inter-area Oscillations of Electrical Networks. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, IL, USA, 240.
4. Aboul-Ela, A.S., McCalley, J., Fouad, A., 1996. Damping Controller Design for Power System Oscillations Using Global Signals. IEEE Transactions on Power Systems, 11(2), 767-773.
5. Kamwa, I., Grondin, R., Hebert, Y., 2001. Wide-Area Measurement Based Stabilizing Control of Large Power Systems - A Decentralized/ Hierarchical Approach. IEEE Transactions on Power System, 16(1), 136-153.
6. Dobrescu, M., Grondin, R., Heniche, A., Kamwa, I., Lefebvre, D., Trudel, G., 2005. Assessing the Technical Value of FACTS-based Wide Area Damping Control Loops. 2005 IEEE PES General Meeting, 1636-1645.
7. Kundur, P., 1994. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, New York, 1176.
8. Paserba, J., 1996. Analysis and Control of Power System Oscillation. CIGRE Special Publication (38.01.07).
9. Chow, J.H., Larsen, E.V., Sanchez-Gasca, J. J., 1995. Concepts for Design of FACTS Controllers to Damp Power Swings, IEEE Transactions on Power Systems. 10, 948-955.
10. Chow, J., Ren, H., Sanchez-Gasca, J.J., Wang, S., 2000. Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals. IEEE Control Systems Magazine, 20(4), 82-90.
11. Taranto, G.N., Chow, J.H., 1995. A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers. IEEE Transactions on Power Systems, 10(3), 1219-1225.
12. Paserba, J.J., Miller, N.W., Larsen, E.V., Piwko, R.J., 1995. A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, 10(3), 1471-1478.
13. Lei, X., Jiang, D., Retzmann, D., 2007. Stability Improvement in Power Systems with Non-linear TCSC Control Strategies. European Transactions on Electrical Power, 10, 339- 345.

14. Chaudhuri, B., Pal, B.C., 2004. Robust Damping of Multiple Swing Modes Employing Global Stabilizing Signals with a TCSC. IEEE Transactions on Power Systems, 19(1), 499-506.
15. Wivutbudsiri, S., Hongesombut, K., Rungrangpitayagon, J., 2014. Wide-area Power System Control Using Thyristor Controlled Series Capacitor Based Fuzzy Logic Controller Designed by Observed Signals. 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON), Chonburi, 1-4.
16. Prakash, A., Moursi, M.S.E., Parida S.K., El-Saadany, E.F., 2023. Design of Wide Area Damping Controller Based on Clustering of Inter-Area Oscillations. 2023 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies-Middle East (ISGT Middle East), Abu Dhabi.
17. Kumar, K., Prakash, A., Parida, S.K., 2023. Wide-Area Damping Controller Design with TCSC Using Active Disturbance Rejection Control. 2023 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET), London, 1-5.
18. Prakash, A., Singh, P., Kumar K., Parida, S.K., 2021. Design of TCSC Based Optimal Wide Area Power System Stabilizer for Low-Frequency Oscillation. 2021 IEEE 4th International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Kuala Lumpur, 1-6.
19. Prakash, A., Moursi, M.S.E., Parida, S.K., Kumar K., El-Saadany, E.F., 2023. Damping of Inter-Area Oscillations With Frequency Regulation in Power Systems Considering High Penetration of Renewable Energy Sources. IEEE Transactions on Industry (Erken Görünüm)
20. Haugdal, H., Uhlen K., Jóhannsson, H., 2023. A Novel Phasor Power Oscillation Damper With Adaptive Phase Compensation, Achieved Using Multiple Model Adaptive Estimation. IEEE Transactions on Power Systems, 38(4), 3179-3188.
21. Prakash, A., Kumar, K., Parida, S.K., 2023. A Modal Transformation Approach to Design Reduced Order Functional Observer-Based WADC for Low-Frequency Oscillations. IEEE Transactions on Power Systems, 38(4), 3593-3604.
22. Yang, N., Liu Q., McCalley, J.D., 1998. TCSC Controller Design for Damping Interarea Oscillations. IEEE Transactions on Power Systems, 13(4), 1304-1310.
23. Cai, L.J., Erlich, I., 2005. Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems, 20, 294-300.
24. Davalos, R.J., Ramirez, J.M., Valenzuela, V., 2000. Coordination of FACTS-based Stabilizers for Damping Oscillations. IEEE Power Engineering Review, 20, 46-49.
25. Dotta, D., Decker, I.C., Silva, A.S., 2008. Wide-area Measurements-based Two-level Control Design Considering Signal Transmission Delay. IEEE Trans. Power Syst., 24(1), 208-216.
26. Chaudhuri, B., Majumder, R., Pal, B.C. 2007. Implementation and Test Results of a Wide-area Measurement-based Controller for Damping Interarea Oscillations Considering Signal-transmission Delay. IET Gener Trans Distr, 1(1), 1-7.
27. Chaudhuri, B., Majumder, R., Pal, B. 2004. Wide-Area Measurement-based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay. IEEE Transactions on Power Systems, 19(4), 1971-1979.
28. Beiraghi, M., Ranjbar, A., 2016. Adaptive Delay Compensator for the Robust Wide-area Damping Controller Design. IEEE Transactions on Power Systems 31(6), 4966-4976.
29. Zhang, S., Vittal, V., 2014. Design of Wide-Area Damping Control Robust to Transmission Delay Using  $\mu$ -synthesis Approach. 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, IEEE, 1-5.
30. Chow, J.H., Ghiocel, S.G., 2012. An Adaptive Wide-Area Power System Controller using Synchrophasor Data, Book Chapter in Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids. Springer, Power Electronics and Power Systems, 3(3), 327-342, 371.
31. Başel, M.B., Mete, A.N., 2022. An Adaptive Network Latency Compensator Design for Wide Area Damping Control of Power System

- Oscillations. *Electrical Engineering*, 36(2), 2793-2803.
32. Sanchez-Gasca, J.J. (Ed)., 2012. Identification of Electromechanical Modes in Power Systems”, IEEE Task Force Report, Special Publication (TP462).
  33. Pagola, F.L., Perez-Arriaga, I.J., Verghese, G.C., 1989. On Sensitivities, Residues and Participations: Applications to Oscillatory Stability Analysis and Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 4, 278-285.
  34. Hamdan, A.M.A., Elabdalla A.M., 1988. Geometric Measures of Modal Controllability and Observability of Power System Models. *Electric Power System Research*, 15, 147-155.
  35. Heniche, A., Kamwa, I., 2008. Assessment of Two Methods to Select Wide-Area Signals for Power System Damping Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2), 572-581.
  36. Başel, M.B., 2019. Alanlar Arası Salınım Sönümlenmesi için TCSC ve PSS Tabanlı İki Farklı Geniş Alan Kontrol Sistemi Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elk-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin, 73.
  37. Jovicic, D., Pillai, G.N., 2005. Analytical Modeling of TCSC Dynamics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 1097-1104.