

Bir güç sisteminde Hopf çatalanmaları ve salınımların sönmümlendirilmesi

Yaşar KÜÇÜKEFE*, Adnan KAYPMAN

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, Senkronaltı Rezonans (SSR) oluşan bir elektrik güç sistemindeki Hopf çatalanmaları incelenmekte ve kararsız burulma salınımlarının sönmümlendirilmesi için tasarlanan bir kontrolör sunulmaktadır. SSR araştırmaları için geliştirilen IEEE İkinci Gösterge Modelinin birinci sistemi kullanılmıştır. Senkron makinenin amortisör sargıları doğrusal olmayan modele dahil edilmiştir. Seri kompanzasyon kapasitörü tesis edilmiş olan enerji iletim hatlarına bağlı senkron makineler, potansiyel olarak senkronaltı elektrik modunun, türbin-generatör şaft sisteminin burulma salınım modları ile etkileşimine maruz kalabilirler. Modellenen elektrik güç sisteminde meydana gelen Hopf çatalanmalarının hangi tip olduğu, birinci Lyapunov katsayılarının analitik olarak hesaplanması ile belirlenmiştir. Sabit ikaz uygulanan modelde kritik-altı Hopf çatalanması meydana gelmektedir. Diğer yandan, Otomatik Gerilim Düzenleyicisinin (AVR) eklenmesi ile modelde kritik-üstü Hopf çatalanması oluşmaktadır. Ayrıca, SSR sonucu ortaya çıkan kararsız burulma salınımlarının sönmümlendirilmesi için, zaman gecikmeli geri besleme kontrol teorisine dayanan bir kontrolör tasarlanmıştır. Kontrol girdisi olarak sadece senkron makine rotorunun açılma hızını kullanan kontrolörün zaman gecikme ve kazanç parametreleri için uygun değerler, sistemin dinamik cevabını değerlendiren bir performans endeksi hesaplanarak belirlenmiştir. Tasarlanan kontrolörün etkili sonuçlar verdiği benzetimler yardımı ile gösterilmiştir. Kontrolör etkinliği değerlendirilirken, AVR ve kontrolör çıkış sınırlayıcıları da modele dahil edilmiş ve seri kapasitör kompanzasyonunun pratik işletme değerleri için kontrolörün etkili olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Senkronaltı Rezonans, hopf çatalanması, lyapunov katsayıları, zaman gecikmeli geri besleme kontrolü.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Yaşar KÜÇÜKEFE. yasar.kucukefe@iee.org; Tel: (282) 611 11 25.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Senkronaltı rezonansa duyarlı bir güç sisteminde Hopf çatalanmaları ve burulma salınımlarının sönmümlendirilmesi için yeni bir kontrolör" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 16.06.2009 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.07.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmaların 31.05.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Hopf bifurcations in a power System and damping oscillations

Extended abstract

Series capacitor compensation of AC transmission lines as a means of increasing load carrying capacity and enhancing transient stability has a widespread use in power systems, particularly in the North America. On the other hand, potential danger of interaction between torsional oscillation modes of the turbine generator shaft system and the subsynchronous electrical mode may arise in electric power systems consisting of turbine-generators connected to transmission lines with series compensation capacitors. This phenomenon is called Subsynchronous Resonance (SSR). Unless adequate measures are implemented, unstable torsional mode oscillations due to SSR can lead to catastrophic turbine-generator shaft failures, as occurred at Mohave power plant in 1970 and 1971. Since then, considerable effort to the analysis of SSR phenomenon has been devoted by researchers and industry professionals.

In this study, Hopf bifurcations in a power system susceptible to SSR is investigated and a novel controller based on the delayed feedback control theory to stabilize unstable torsional oscillations caused by SSR is presented. Bifurcation theory is employed for the analysis of torsional oscillations in a power system which consists of a synchronous generator connected to an infinite busbar through two parallel transmission lines one of which is equipped with a series compensation capacitor. The first system of the IEEE Second Benchmark Model for Subsynchronous Resonance studies has been used. Damper windings of the synchronous generator are included in the nonlinear model. The state equations representing the dynamics of the electrical system, mechanical system and the excitation system are obtained separately and then combined into one set of ordinary differential equations.

Occurrence of Hopf bifurcations in the model at certain values of the series compensation factor has been verified by tracing the eigenvalues of the Jacobian matrix evaluated at equilibrium. Loss of stability occurs in the first and second torsional oscillation modes through Hopf bifurcation due to SSR. Instead of using the Floquet multipliers method, the

first Lyapunov coefficient has been computed analytically to determine the type of Hopf bifurcations (supercritical or subcritical), thereby stability condition of the limit cycles emanating from the Hopf bifurcation points. It is found that subcritical Hopf bifurcation occurs in the model without an Automatic Voltage Regulator (AVR). On the other hand, in the model with AVR, supercritical Hopf bifurcation occurs. Time domain simulations in MATLAB-Simulink are presented to demonstrate the validity of analytic findings.

The proposed controller is based on the delayed feedback control theory. The Time Delay Auto-Synchronization (TDAS) controller requires the measurement of the synchronous generator rotor angular speed as the only input. The difference between the value of the controller input signal in τ -time unit in the past and its current value is multiplied by a gain to obtain an output signal which is combined into the AVR as the stabilizing signal.

The effective performance of the controller in providing sufficient damping for the unstable torsional oscillations depends on the correct setting of time delay and gain parameters of the controller. For this purpose, an optimization performance index (OPI), which evaluates damping performance of the controller in time-domain dynamic responses of the model, has been defined.

Time-domain simulations in MATLAB-Simulink were carried out to evaluate the effectiveness of the TDAS controller in providing additional damping for the unstable torsional oscillations at various series compensation levels, provided that the time delay and gain parameters are correctly set. Performance of the TDAS controller has been investigated in the presence of AVR limiters in order to obtain a realistic assessment. The TDAS controller output limiter is also included so that the impact on the AVR's voltage regulating performance remains limited. Time domain simulations are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed controller even in the presence of the limiters within the practical operating ranges of series capacitor compensation.

Keywords: Subsynchronous Resonance, hopf bifurcation, lyapunov coefficients, delayed feedback control.

Giriş

Enerji iletim hatlarında yük taşıma kapasitesinin artırılması ve geçici durum kararlılığının geliştirilmesi için etkili bir uygulama olan seri kapasitör kompanzasyonu, eğer gerekli önlemler alınmaz ise, türbin-generator şaft sistemlerinde çok büyük mekanik arızalara neden olabilirler. Elektrik sisteminin senkronaltı salınım modu ile türbin-generator sisteminin burulma salınım modlarının etkileşimi sonucu ortaya çıkan durum, Senkronaltı Rezonans (*Subsynchronous Resonance-SSR*) olayı olarak adlandırılır. SSR sonucu, ABD Nevada'da kurulu olan Mohave güç santralinde 1970 yılında iki defa şaft arızası meydana gelmiştir (IEEE, 1992). Bu olayın sonrasında, SSR'in analizi ve önlenmesi için araştırmacılarca çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. IEEE SSR çalışma grubu (1977, 1985), bilgisayar benzetimlerinde kullanılmak üzere iki tane gösterge modeli yayınlamıştır. SSR analizi için başlıca yöntemler arasında frekans tarama, özdeğer tekniği ve benzetim yazılımları (Anderson vd., 1990) sayılabilir.

Seri kapasitör içeren, tek bir makine ve sonsuz baralı güç sistemleri doğrusal değildir ve adi fark denklemleri kullanılarak modellenemezler. Elektrik sistemi ile türbin-generator mekanik sistemini içeren doğrusal olmayan model Çatallanma teorisi yardımı ile analiz edilebilir. Zhu ve diğerleri (1996), SSR oluşan bir güç sisteminde Hopf çatallanmasının varlığını gösterdiler. Harb (1996), SSR'in karmaşık dinamiklerini Çatallanma teorisini uygulayarak araştırdı.

Hopf çatallanması, bağımsız adi fark denklemleri ile tanımlanabilen bir dinamik sistem denge noktasında iken, bir veya birden fazla parametrenin değişimine bağlı olarak ortaya çıkan sınırlı çevrimler (*limit cycles*) şeklinde ifade edilebilir. Kritik-altı Hopf çatallanması sonucu kararsız sınırlı çevrimler oluşurken, kritik-üstü Hopf çatallanmalarından kararlı sınırlı çevrimler doğmaktadır. Floquet teorisi kullanılarak, ortaya çıkan sınırlı çevrimlerin kararlılığı araştırılabilir. Bu yöntemde, Monodromy matrisinin özdeğerleri bulunarak belirlenen Floquet çarpınlarının bir parametreye bağlı değişimi izlenir. Diğer bir yöntem ise, birinci Lyapunov katsayısının (LFC) hesaplanmasıdır. Eğer LFC sı-

fırdan küçük ise Hopf çatallanması kritik-üstüdür. Aksi durumda, eğer LFC sıfırdan büyük ise, Hopf çatallanması kritik-altıdır. Bu çalışmada, SSR araştırmaları için geliştirilen IEEE İkinci Gösterge Modelinin (SBM) birinci sisteminde meydana gelen Hopf çatallanmaları sonucu ortaya çıkan sınırlı çevrimlerin kararlılığı, birinci Lyapunov katsayısının analitik olarak hesaplanması ile araştırılmıştır.

SSR'in ortadan kaldırılması veya etkisinin azaltılmasına yönelik uygulama ve önerilerden başlıcaları bloklama filtreleri (Farmer vd., 1977), ikaz kontrolörleri (Wang, 1991), STATCOM'a entegre edilmiş SSR Sönümlendirici kontrolör (Padiyar ve Prabhu, 2006) ve NGH Sönümlendirme metodudur (Hingorani, 1981). Zaman gecikmeli geri besleme kontrolü (Pyragas, 1992), kaos özellikleri gösteren sistemlerde gömülü kararsız devirli yörüngelerle (Pyragas vd., 2004) kararsız denge durumlarının (Ahlborn ve Parlitz, 2004) kararlı hale getirilmesi için basit ve etkili bir yöntemdir. Zaman gecikmeli Otosenkronlama (*Time Delay Auto-synchronization – TDAS*) olarak da adlandırılan bu kontrol metodunda, dinamik bir sistemin mevcut durumu ile bir τ -zaman birimi geçmişteki durumu arasındaki fark, bir kontrol işareti elde etmek için kullanılır.

Bu makalede, SSR sonucu ortaya çıkan kararsız burulma salınımlarının sönümlendirilmesi için zaman gecikmeli geri besleme kontrol teorisi uygulanarak tasarlanan bir kontrolör sunulmaktadır. Senkron makine rotorunun açılma hızını, tek giriş işareti olarak kullanan kontrolörün çıkışı otomatik gerilim düzenleyicisine (AVR) aktarılır. Bir etkinlik endeksi hesaplanarak elde edilen uygun zaman gecikme ve kazanç değerleri ile kontrolörün, SSR sonucu ortaya çıkan burulma salınımlarını etkili biçimde sönümlendirdiği, benzetimler kullanılarak gösterilmiştir. Kontrolörün etkinliği, AVR ve kontrolör sınırlayıcıları mevcut iken araştırılmış ve seri kapasitör kompanzasyonunun pratik işletme değerleri için de etkili olduğu gösterilmiştir.

Çatallanma teorisi

Tanım olarak, doğrusal olmayan sistemler süper pozisyon ilkesini sağlamayan sistemlerdir. Sü-

rekli zaman doğrusal olmayan sistemlerin analizinde kullanılan en yaygın yöntem, sistemi bağımsız adi fark denklemler (ODE) şeklinde ifade etmektir. Bir parametre vektörüne bağlı olan bir sürekli zaman doğrusal olmayan dinamik bir sistemde:

$$\dot{x} = f(x, \alpha), x \in R^n, \alpha \in R^m \quad (1)$$

eğer α parametre vektörünü değiştirmek, sistemin dinamik davranışlarında niteliksel değişikliklere (kararlılık, kararsızlık, kaotik, devirli, devirli olmayan vb.) neden oluyorsa, bu değişiklikler *çatallanma* ve değişikliğin olduğu parametre vektörü de *çatallanma parametresi* olarak adlandırılır.

Denge durumlarının kararlılığı

(1)'de tanımlanan dinamik sistem x^0 noktasında denge konumunda iken ($f(x^0, \alpha^0) = 0$), A ile belirtilen ve sistem denge noktasında hesaplanan Jakoben matrisinin ($A = f_x(x^0, \alpha^0)$) özdeğerlerinin tamamı sıfırdan küçük reel kısımlara sahip ise $f(x^0, \alpha^0)$ sistemi asimtotik olarak kararlıdır.

Çatallanma türleri

Çok farklı türde çatallanma mevcuttur. Bunların başlıcaları, fold çatallanması, pitchfork çatallanması, trans-kritik çatallanma ve Hopf çatallanmasıdır (Drazin, 1992). Fold çatallanmasında, denge noktasında dinamik sistem jakoben matrisinin tek bir sıfır özdeğeri vardır ve diğer bütün özdeğerlerin reel kısımları sıfırdan küçüktür. Bu tip çatallanmaya dönüş noktası veya saddle-nod çatallanması da denir. Pitchfork çatallanması, simerik sistemlerde simetri kırılması şeklinde ortaya çıkar. İki çatallanma eğrisinin kesişmesi sonucu ise Trans-kritik çatallanma oluşur. $f(x^0, \alpha^0)$ noktasında hesaplanan Jakoben matrisinin bir çift imajiner özdeğeri olduğu ($\lambda_{1,2} = \pm i\omega_0$, $\omega_0 > 0$) ve diğer bütün özdeğerlerin reel kısımlarının sıfırdan küçük olduğu durumlarda Hopf çatallanması meydana gelir. Hopf çatallanmasının bir diğer adı Andronov-Hopf çatallanmasıdır.

Kritik-üstü ve kritik-altı Hopf çatallanması

Sınırlı çevrimler, bir dinamik sistemdeki düzenli hareketlerdir. Hopf çatallanmaları, denge nokta-

larından sınırlı çevrimler üretirler. Kritik-üstü Hopf çatallanması sonucunda kararlı sınırlı çevrimler ortaya çıkarken, kritik-altı Hopf çatallanması durumunda kararsız sınırlı çevrimler oluşur.

Bir Hopf çatallanmasının kritik-altı veya kritik-üstü olduğunun belirlenmesi için yaygın olarak kullanılan Floquet çarpanlarına alternatif bir yöntem, Birinci Lypaunov Katsayısı (LFC)'nin hesaplanmasıdır. Takip eden kısımda, LFC'nin hesaplanması verilmektedir (Kuznetsov, 2004).

(1)'de tanımlanan sistem (x^0, α^0) noktasında dengede iken hesaplanan Jakoben matrisi A 'nın bir çift imajiner özdeğeri olsun ($\lambda_{1,2} = \pm i\omega_0$, $\omega_0 > 0$) ve A 'nın reel kısmı sıfır olan başka özdeğeri bulunmasın. $q \in C^n$ vektörü şu koşulları sağlasın:

$$Aq = i\omega_0 q, \quad A\bar{q} = -i\omega_0 \bar{q} \quad (2)$$

Benzer şekilde, $p \in C^n$ vektörü de aşağıdaki eşitliği sağlıyor olsun.

$$A^T p = -i\omega_0 p, \quad A^T \bar{p} = i\omega_0 \bar{p} \quad (3)$$

Ayrıca, p ve q vektörleri $\langle p, q \rangle = 1$ normalizasyonunu sağlasın. Bu durumda, LFC:

$$\frac{1}{2\omega_0} \text{Re} \left[\langle p, C(q, q, \bar{q}) \rangle - 2 \langle p, B(q, A^{-1}B(q, q)) \rangle + \langle p, B(\bar{q}, (2i\omega_0 I_n - A)^{-1}B(q, q)) \rangle \right] \quad (4)$$

ifadesi ile bulunur. Burada B ve C simetrik çoklu-doğrusal vektör fonksiyonlarıdır.

$$B_i(x, y) = \sum_{j,k=1}^n \frac{\partial^2 f_i(\xi, \alpha^0)}{\partial \xi_j \partial \xi_k} \Big|_{\xi=0} x_j y_k \quad (5)$$

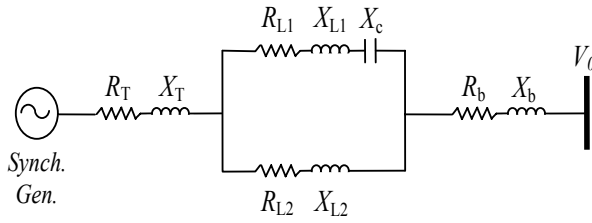
$$C_i(x, y, z) = \sum_{j,k,l=1}^n \frac{\partial^3 f_i(\xi, \alpha^0)}{\partial \xi_j \partial \xi_k \partial \xi_l} \Big|_{\xi=0} x_j y_k z_l \quad (6)$$

LFC'in sıfırdan küçük olması durumunda kritik-üstü Hopf çatallanması oluşur. Diğer yandan,

kritik-altı Hopf çatallanmasında LFC sıfırdan büyüktür.

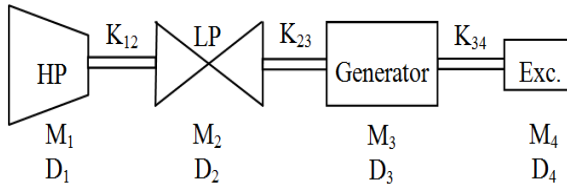
Güç sistemi modeli

Bu çalışmada, tek makine sonsuz bara güç sistemi olarak, SSR araştırmaları için geliştirilen IEEE İkinci Gösterge Modelinin birinci sistemi kullanıldı. Bu sistemde, Şekil 1'de gösterildiği üzere, bir senkron makine sonsuz baraya birinde seri kapasitör kompanzasyonu bulunan iki paralel iletim hattı üzerinden bağlıdır.



Şekil 1. IEEE ikinci gösterge modeli, sistem-1

Bir yüksek-basınç (HP) türbini, bir alçak-basınç (LP) türbini, bir senkron makine (generator) ve bir ikaz sistemi (Exc.) içeren tek-şaft türbin-generator sistemi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Türbin-generator mekanik sistemi

Sistemin matematiksel modeli

Senkron makine d-q eksenlerindeki amortisör sargılarının dinamik etkilerinin de dahil edildiği modelde, doyma etkisi ve türbin governor dinamikleri ihmal edilmiştir. Park dönüşümü kullanılarak, elektrik ve mekanik sistemlerin dinamiklerini tanımlayan matematiksel model şu şekilde elde edilebilir (Harb ve Widyan, 2003).

Elektrik sistemi- Durum değişkenlerini, $i_g = [i_d \ i_q \ i_f \ i_q \ i_d]^T$, $i_g \in R^5$ ve $V_c = [V_{cd} \ V_{cq}]$, $V_c \in R^2$ olarak tanımlarsak,

$$\frac{di_g}{dt} = B^{-1} \omega_b (C i_g + D) \quad (7)$$

$$\frac{dV_c}{dt} = \omega_b (E i_g + F V_c) \quad (8)$$

Mekanik sistem- $R_s = [\omega_1 \ \theta_1 \ \omega_2 \ \theta_2 \ \omega_3 \ \theta_3 \ \omega_r \ \theta_r \ \omega_4 \ \theta_4]$, $R_s \in R^8$ şeklinde tanımlanan durum değişkenleri ile durum denklemleri:

$$\frac{dR_s}{dt} = G R_s + H \quad (9)$$

şeklinde elde edilir. (7-9) denklemlerinde kullanılan matrisler (Kucukefe ve Kaypmaz, 2008)'de verilmektedir.

Son olarak, $x = [i_g^T \ V_c^T \ R_s^T]^T$, $x \in R^{15}$ durum vektörünü tanımlayıp, doğrusal olmayan dinamik sistemin durum denklemleri, (7), (8) ve (9)'u birleştirerek aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} B^{-1} \omega_b (C i_g + D) \\ \omega_b (E i_g + F V_c) \\ G R_s + H \end{bmatrix} \quad (10)$$

Çatallanma analizi

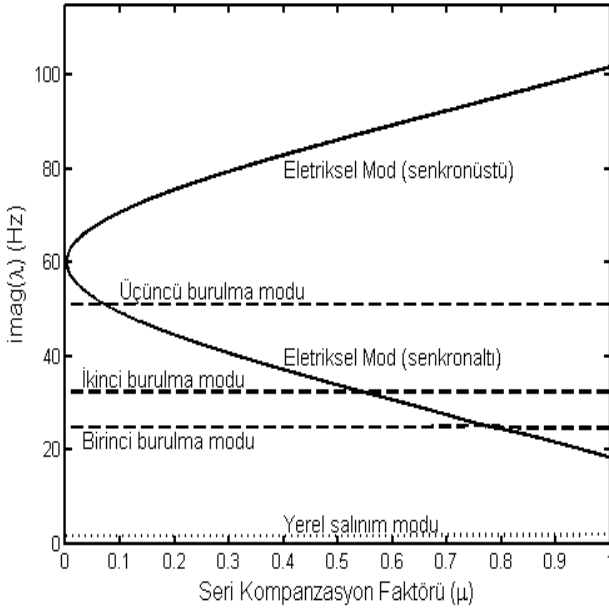
Seri kompanzasyon faktörü ($\mu = X_c / X_{L1}$), çatallanma parametresi seçilerek gerçekleştirilen Çatallanma analizinde, mekanik tork, şebeke gerilimi ve ikaz gerilimi sabit değerlerde tutuldu ($T_m=0.91$, $E_{fd}=2.2$ and $V_0=1.0$).

Şekil 3, modelin salınım modlarını göstermektedir. Senkronüstü ve senkronaltı elektrik modlarının frekansları, seri kompanzasyon faktörüne bağlı olarak değişmektedir. Burulma salınım modlarının sayısı üçtür ve seri kopmanzasyonun sıfır değerinde 24.7, 32.4 ve 51.1 Hz'tirler. Yerel salınım modu 1.53 Hz'tir. Bu salınım modunda, türbin-generator şaft sisteminin bütün kısımları tek bir kütle olarak salınırlar ve burulma salınımları meydana gelmez. Elektrik güç sistemi kararlılık analizlerinde yerel salınım modu büyük önem taşır.

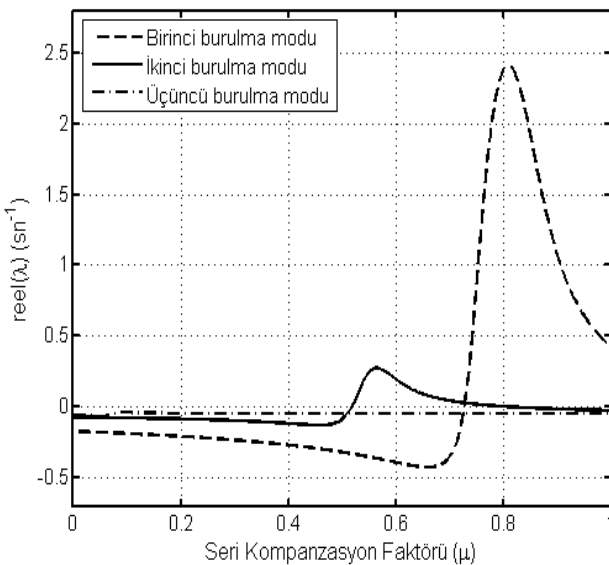
Diğer yandan, burulma salınım modları uyarıldığında, bazı şaft bölümleri diğerlerine karşı bir salınım gösterirler ve bu durumda malzeme yo-

rulması sonucu şaft hasarı meydana gelebilir (Kundur, 1994).

Seri kompanzasyon seviyesi arttıkça, senkron-altı elektrik modu her üç burulma salınım modu çakışır ve bunun sonucunda, Şekil 4'teki gibi, ilgili burulma salınım modu özdeğerinin reel kısmı sıfır eksenine hareket eder.



Şekil 3. Modeldeki salınım modları



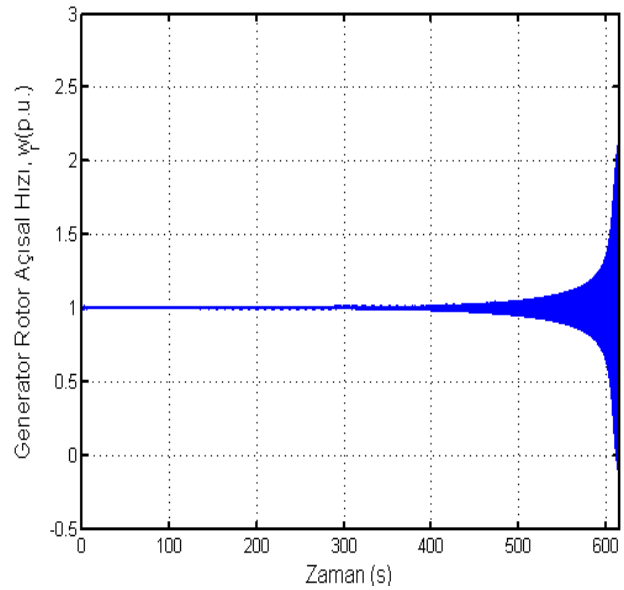
Şekil 4. Burulma modlarının kararlılığı

Senkron-altı elektrik modunun, üçüncü burulma modu etkileşimi $\mu=0.07$ 'de olur ancak bir karar-

sızlık oluşmaz. İkinci burulma modunun özdeğerinin reel kısmı, $\mu=0.5184$ 'de sıfırı geçerek pozitif olur ve bunun sonucunda sistem kararlılığı Hopf çatallanması ile kaybedilir. İkinci burulma modunun, $\mu=0.8110$ 'te yeniden kararlı bir duruma geçmesine rağmen, üçüncü salınım modunda $\mu=0.7283$ 'te oluşan Hopf çatallanmasından ötürü sistem kararlılığı tekrar kazanılmaz.

LFC'nin, (4) kullanılarak hesaplanması ile pozitif bir değer olan 1.44×10^{-5} bulundu. Hesaplanan bu değer, kritik-altı bir Hopf çatallanmasının gerçekleştiğini ve bunun sonucunda ortaya çıkan sınırlı çevrimlerin kararsız olduğunu ve sabit bir yörüngeye yerleşmediklerine işaret etmektedir.

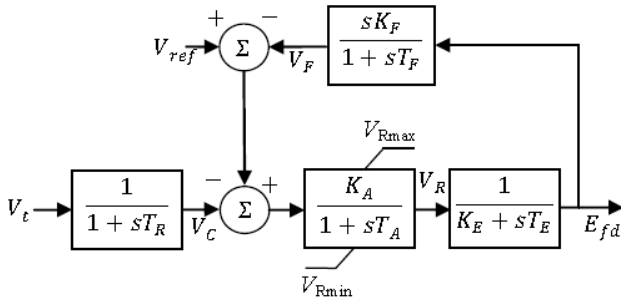
Şekil 5'te gösterilen ve % 52 seri kopmanzasyon değerinde yapılan benzetim, birinci Lyapunov katsayısının analitik olarak hesaplanması ile ulaşılan sonucun doğruluğunu teyit etmektedir.



Şekil 5. Bir bozucu etki sonucu generator rotor açısal hızı ($\mu = 0.52$). Kritik-altı Hopf

Otomatik gerilim düzenleyicisi

Blok şeması Şekil 6'da gösterilen DC1A tipi bir otomatik gerilim düzenleyicisi, üzerinde çalışılan modele eklenerek, oluşan Hopf çatallanmasının tipi araştırıldı.



Şekil 6. Otomatik gerilim düzenleyicisi (AVR)

AVR'nin eklenmesi sonucu dört durum değişkeni içeren vektör $V_{exc}=[V_C V_F V_R E_{fd}]$, $V_{exc} \in R^4$ için durum denklemi:

$$\frac{dV_{exc}}{dt} = P V_{exc} + Q \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$P = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_R} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_F} & \frac{K_F}{T_F K_E} & -\frac{K_F K_E}{T_F T_E} \\ -\frac{K_A}{T_A} & -\frac{K_A}{T_A} & \frac{-1}{T_A} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_R} & \frac{-K_E}{T_R} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \frac{V_t}{T_R} & 0 & (\frac{K_A}{T_A} V_{ref}) & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

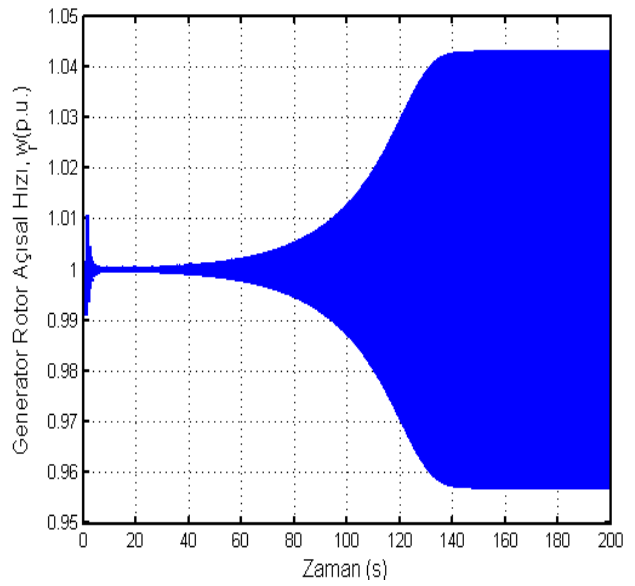
(13)'te yer alan V_t , senkron makine terminal gerilim değeri olup, transient durumlar hesaba katılmaz ise aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$V_t = \sqrt{((-r_d i_d + X_q i_q)^2 + (-r_q i_q - X_d i_d + X_{afd} i_{fd})^2} \quad (14)$$

AVR içeren modele ait durum değişkenleri vektörü $x=[i_g^T V_c^T R_s^T V_{exc}^T]^T$, $x \in R^{19}$ için durum deklemleri (10) ve (11) birleştirilerek aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} B^{-1} \omega_b (C i_g + D) \\ \omega_b (E i_g + F V_c) \\ G R_s + H \\ P V_{exc} + Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

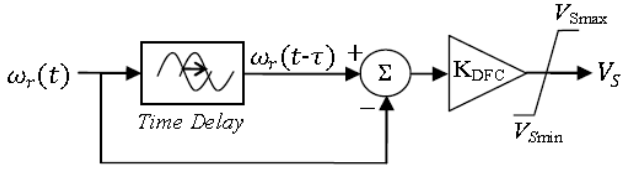
AVR sınırlayıcısı hesaba katılmaksızın gerçekleştirilen çatallanma analizi sonucunda, $\mu=0.5197$ 'de meydana gelen Hopf çatallanması için birinci Lyapunov katsayısı -0.0001589 olarak hesaplanmıştır. Sıfıra çok yakın eksi bir değer olarak hesaplanan LFC, kritik-üstü bir Hopf çatallanmasına işaret etmektedir. Elde edilen bu sonucu teyit etmek için, MATLAB-Simulink'te seri kompanzasyon değeri %525 alınarak yapılan benzetimde, Şekil 7'de gösterildiği üzere, senkron makine rotorunun açısız hızı, artan genlikteki salınımlardan sonra belirli bir orbite oturduğu görülmüştür.


 Şekil 7. AVR eklenen modelde bozucu etki sonucu generator rotor açısız hızı ($\mu=0.525$). Kritik-üstü Hopf çatallanması

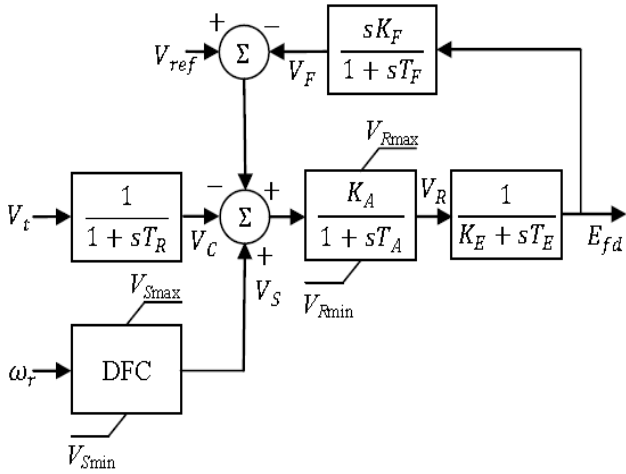
Zaman gecikmeli geri besleme kontrolörü

Zaman gecikme, fark ve kazanç fonksiyonlarından oluşan ve Şekil 8'de gösterilen zaman gecikmeli geri besleme kontrolörü (DFC) yalnızca, senkron makine rotorunun açısız hızını (ω_r) giriş işareti olarak kullanır. Çıkış sinyali, ω_r 'ın τ -zaman birimi geçmişteki değeri ile anlık değerinin farkının bir kazanç ile çarpılması ile elde edilir.

DFC'nin çıkış işareti (V_S), otomatik gerilim düzenleyicisine Şekil 9'da görüldüğü gibi kararlılaştırıcı işaret olarak eklenir.



Şekil 8. Zaman gecikmeli geri besleme kontrolörü

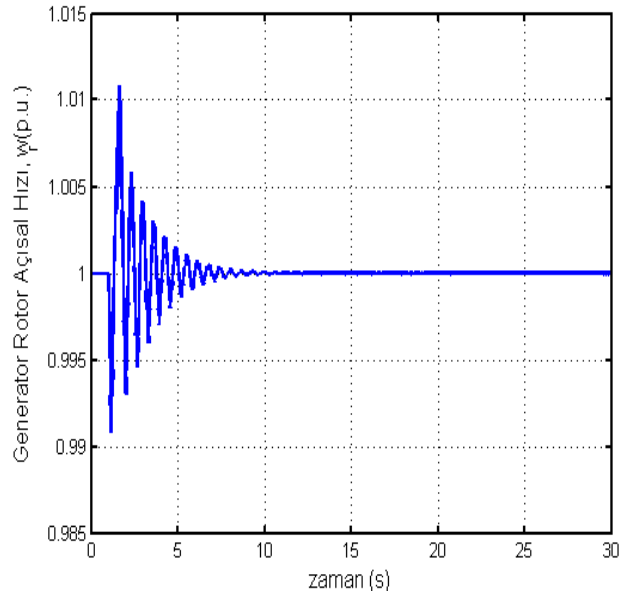


Şekil 9. DFC ve AVR'in blok şeması

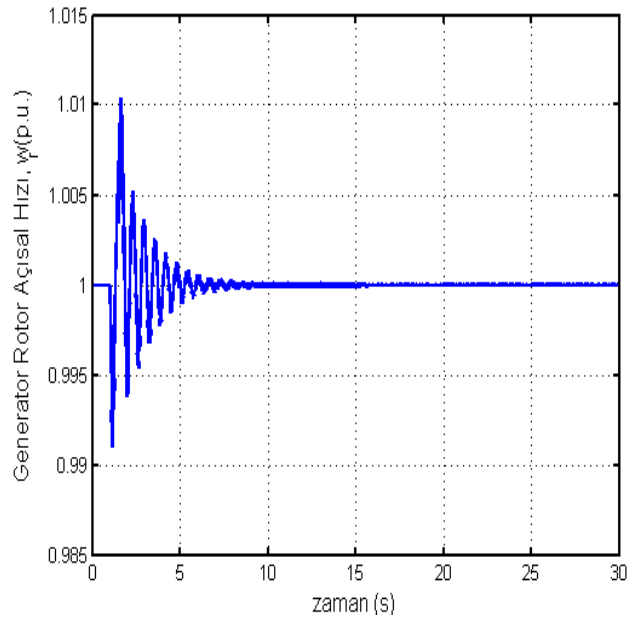
AVR'in gerilim düzenlemedeki etkinliğini çok fazla zayıflatmamak için, DFC çıkış sinyali bir sınırlayıcıdan geçirilir. Ayrıca, DFC'nin kararsız burulma salınımlarını söndürme etkinliği değerlendirilirken, benzetimlerin gerçekçiliği açısından, AVR sınırlayıcıları da modele dahil edilmiştir.

DFC'nin etkinliği, incelenen güç sisteminin kararsız olduğu farklı seri kompanzasyon seviyelerinde yapılan benzetimler ile test edildi. Şekil 10-12'de, sırasıyla %55, %65 ve %75 seri kompanzasyon değerleri için senkron makine açılma hızı gösterilmektedir. Uygun seçilmiş zaman gecikmesi ve kazanç değeri ile DFC, burulma salınımlarını etkin bir biçimde söndürmektedir.

DFC ve AVR sınırlayıcıları devrede iken elde edilen başarılı söndürme etkinliği değerlendirildiğine, tasarlanan kontrolörün doğru seçilmiş ayar değerleri ile seri kapasitör kopmanzasyonunun pratik işletme değerlerinde (%20-70) uygulanabileceği düşünülmektedir.

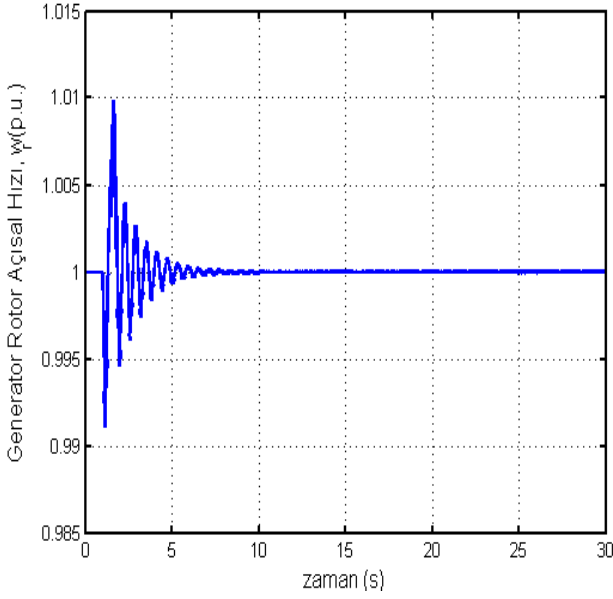


Şekil 10. DFC devrede iken, bozucu bir etki sonrası ω_r ($\mu=0.55$, $\tau=0.018s$, $K_{DFC}=70$)

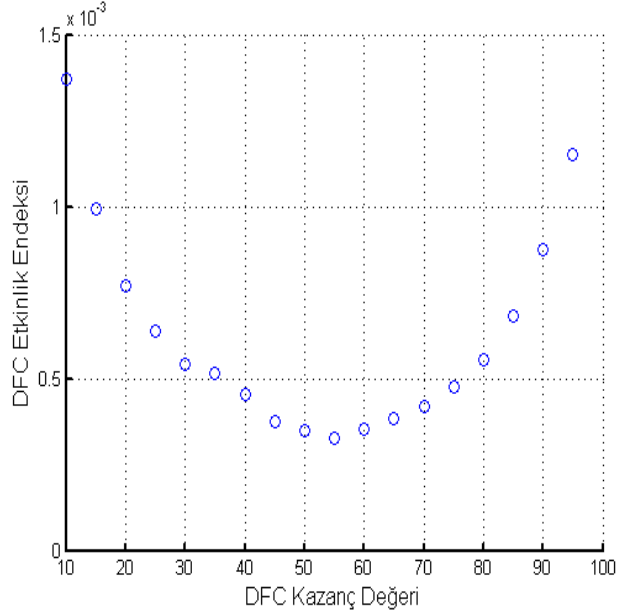


Şekil 11. DFC devrede iken, bozucu bir etki sonrası ω_r ($\mu=0.65$, $\tau=0.018s$, $K_{DFC}=70$)

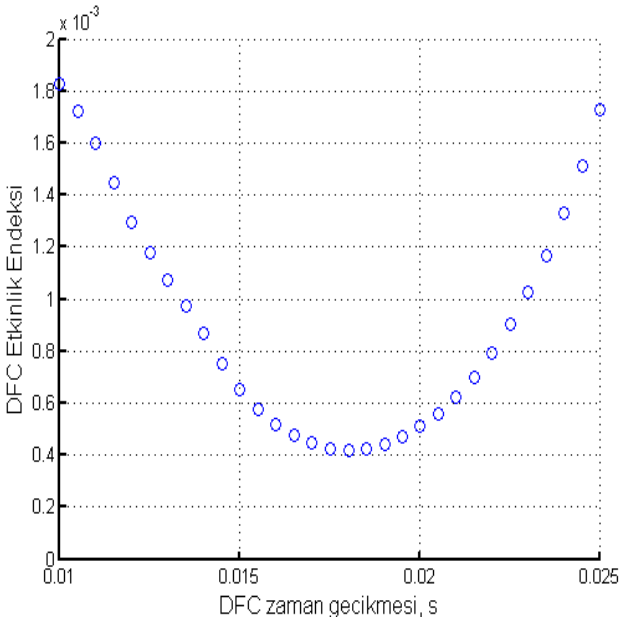
Zaman gecikmeli fark denklemlerin analiz zorlukları nedeniyle, DFC uygun ayar değerlerinin belirlenmesi için benzetimlerin değerlendirilmesi ile hesaplanan bir etkinlik endeksi tanımlanmıştır. 8. ve 10. saniye zaman aralığında en yüksek ve en düşük ω_r değerlerinin farkı olan etkinlik endeksi, Şekil 13-14'de gösterilmektedir.



Şekil 12. DFC devrede iken, bozucu bir etki sonrası ω_r ($\mu=0.75$, $\tau=0.014s$, $K_{DFC}=70$)



Şekil 13. DFC etkinlik endeksi ($\mu=0.55$, $\tau=0.018s$)



Şekil 13. DFC etkinlik endeksi ($\mu=0.55$, $K_{DFC}=70$)

Sonuçlar

Bu çalışmada, senkronaltı rezonans oluşan bir güç sistemindeki Hopf çatallanmaları incelendi ve ortaya çıkan kararsız burulma salınımlarının sönümlendirilmesi için tasarlanan bir zaman gecikmeli geri besleme kontrolörü sunuldu. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Sabit ikazda, SSR çalışmaları için geliştirilen IEEE İkinci Gösterge Modelinin birinci sisteminde oluşan Hopf çatallanması kritik-altıdır.
- Otomatik gerilim düzenleyicisinin modele dahil edilmesi durumunda, kritik-üstü Hopf çatallanması oluşur.
- Zaman gecikmeli geri besleme kontrolörü, uygun ayar değerleri ile, kararsız burulma salınımlarını etkili biçimde sönümlendirmiştir.
- Sadece tek bir ölçülebilir durum değişkeni işaretine gereksinim duyması, ayar değerlerinin iki tane olması ve kararsız burulma salınımlarını çok hızlı bir şekilde sönümlendirmesi, tasarlanan kontrolörün üstünlükleridir.

İleriki aşamada, tasarlanan kontrolörün yerel salınım modunu sönümlendirme etkinliği incelenmeli ve kontrolör ayar değerlerinin belirlenmesi için daha pratik bir yöntem araştırılmalıdır.

Kaynaklar

Ahlborn, A. ve Parlitz, U., (2004). Stabilizing unstable steady states using multiple delay feedback control, *Physical Review Letters*, **93**, 264101.

- Anderson, P.M., Agrawal, B.L. ve Van Ness, J.E., (1990). *Subsynchronous Resonance in Power Apparatus and Systems*, IEEE Press, New York.
- Drazin, P.G., (1992). *Nonlinear Systems*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Farmer, R.G., Katz, E. ve Schwalb, A.L., (1977). Navajo Project on Subsynchronous Resonance analysis and solutions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **96**, 1226-1232.
- Harb, A.M., (1996). Application of bifurcation theory to Subsynchronous Resonance in power systems, *Doktora Tezi*, Department of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- Harb, A.M. ve Widyan, M.S., (2004), Chaos and bifurcation control of SSR in the IEEE second benchmark model, *Chaos Solitons and Fractals*, **21**, 537-552.
- Hingorani, N.G., (1981). A new scheme for Subsynchronous Resonance, *IEEE Transactions on Power Systems*, **7**, 1, 150-157.
- IEEE Committee Report, (1992). Reader's guide to Subsynchronous Resonance, *IEEE Transactions on Power Systems*, **7**, 1, 150-157, February 1992.
- IEEE SSR Working Group, (1977). First Benchmark Model for computer simulation of Subsynchronous Resonance, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **96**, 1565-1572.
- IEEE SSR Working Group, (1985). Second Benchmark Model for computer simulation of Subsynchronous Resonance, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **104**, 1057-1066.
- Kucukefe, Y. ve Kaypmaz, A., (2008). Hopf bifurcations in the IEEE Second Benchmark Model for SSR studies, *16th Power Systems Computations Conference*, Glasgow, United Kingdom, July 14-18.
- Kundur, P., (1994). *Power system stability and control*, McGraw-Hill, New York.
- Kuznetsov, Y.A., (2004). *Elements of applied bifurcation theory*, Springer-Verlag, New York.
- Padiyar, K.R. ve Prabhu, N., (2008). Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 1, 1398-1405.
- Pyragas, K., (1992). Continuous control of chaos by self-controlling feedback, *Physics Letters A*, **170**, 421-428.
- Pyragas, K., Pyragas, V. ve Benner, H., (2004). Delayed feedback control of dynamical systems at a subcritical Hopf bifurcation, *Physical Review E*, **70**, 056222.
- Wang, L. ve Hsu, Y.Y., (1988). Damping of Subsynchronous Resonance using excitation controllers and static VAR compensators: A comparative study, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **3**, 1, 6-13.
- Zhu, W., Mohler, R.R., Spee, R., Mittelstadt, E.A. ve Maratukulam, D., (1995). Hopf bifurcations in a SMIB power system with SSR, *IEEE Transactions on Power Systems*, **11**, 3, 1579-1584.