İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZE EDİLMİŞ BULANIK GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISININ SİSTEM KARARLILIĞINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Fatih KÜÇÜKTEZCAN

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN

Ocak 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZE EDİLMİŞ BULANIK GÜÇ SİSTEMİ KARARLIKILICISININ SİSTEM KARARLILIĞINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Fatih KÜÇÜKTEZCAN
(504051004)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2008

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ayşen DEMİRÖREN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Coşkun SÖNMEZ

Yrd. Doç. Dr. İstemihanGENÇ

Ocak 2008

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren ve yardımcı olan hocam Prof. Dr. Ayşen Demirören'e ve öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren sevgili aileme teşekkür ederim.

Aralık 2007 Fatih Küçüktezcan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **ix**
ÖZET **x**
SUMMARY **xii**

1. GİRİŞ **1**

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK **5**
2.1. Güç Sistemlerinde Kararlılık Tanımı 5
2.2. Rotor Açısı Kararlılığı 6
2.2.1. Küçük İşaret Kararlılığı 8
2.2.2. Geçici Hal Kararlılığı 9
2.3. Gerilim Kararlılığı 11
2.4. Güç Sistemlerinde Kullanılan Kontrol Elemanları 11
2.4.1. Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) 11
2.4.2. Devir Sayısı Regülatörü (DSR) 12
2.4.3. Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK) 14
2.4.4. Statik VAR Kompanzatörü (SVK) 16

3. BULANIK MANTIK **18**
3.1. Bulanık Kümeler 18
3.1.1. Dilsel Değişkenler 19
3.1.2. Üyelik Fonksiyonları 19
3.1.3. Bulanık Küme İşlemleri 20
3.2. Bulanık Kontrol 21
3.2.1. Bulanık Kontrolör Yapısı 21
3.2.2. Bulanıklaştırma Operatörü 21
3.2.3. Bulanık Koşullu İfadeler ve Bulanık Kontrol Kuralları 22
3.2.4. Durulaştırma Operatörü 23
3.2.5. Ölçekleme Çarpanları 24

4. GENETİK ALGORİTMA **25**
4.1. Temel Kavramlar 26
4.2. Genetik Algoritma'nın Çalışma Şekli 26
4.3. Genetik Algoritma Bileşenleri 27
4.3.1. Kodlama Yöntemleri 28

4.3.2. Seçim Operatörleri 29
4.3.3. Çaprazlama Operatörleri 29
4.3.4. Mutasyon Operatörleri 31
4.4. Genetik Algoritma ile Bulanık Kontrolör Katsayılarının Optimizasyonu 32

5. MODELLEME 36
5.1. Güç Sistemi Modeli 36
5.2. Senkron Generatör Modeli 37
5.2.1. Diferansiyel Eşitlikler 37
5.2.2. Cebirsel Eşitlikler 38
5.2.3. Sürekli Hal Değerleri 39
5.3. Kontrol Elemanlarının Modelleri 41
5.3.1. Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) 41
5.3.2. Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK) 42
5.3.3. Bulanık Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (BGSKK) 44
5.3.4. Statik VAR Kompanzatörü (SVK) 49
5.4. Bozucu Etki Modeli 53
5.5. Tüm Sistemin SIMULINK Programındaki Modeli 54

6. BENZETİM SONUÇLARI 61
6.1. Senkron Generatör ve IEEE Tip1 Uyarma Sistemi Davranışı 61
6.2. GSKK Davranışı 63
6.3. BGSKK Davranışı 65
6.4. SVK Davranışı 67
6.5. BGSKK ve SVK Davranışı 69

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 71

KAYNAKLAR 73

EKLER 76

ÖZGEÇMİŞ 84

KISALTMALAR

OGR	: Otomatik Gerilim Regülatörü
USK	: Uyarma Sistemi Kararlayıcısı
DSR	: Devir Sayısı Regülatörü
GSKK	: Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı
BGSKK	: Bulanık Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı
SVK	: Statik VAR Kompanzatörü
PI	: Oransal ve İntegral Tabanlı Kontrolör
PD	: Oransal ve Türev Tabanlı Kontrolör
PID	: Oransal, İntegral ve Türev Tabanlı Kontrolör
EMK	: Elektromotor Kuvveti
GA	: Genetik Algoritma
IATE	: Hatanın Mutlak Değerinin Zamana Bağlı İntegrali

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1 G.A. ile elde edilen en uygun GSKK değerleri..... 44
Tablo 5.2 BGSKK için oluşturulan kural tablosu..... 46
Tablo 5.3 G.A. ile elde edilen en uygun SVK değerleri..... 53
Tablo A.1 Senkron generatör ve iletim hattına ait parametreler..... 76
Tablo A.2 DSR ve IEEE Tip1 uyarma sistemine ait parametreler..... 76

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması..... 6
Şekil 2.2 : İki senkron makina ve iletim hattından oluşan sistem..... 7
Şekil 2.3 : Farklı rotor açısı davranışları..... 10
Şekil 2.4 : OGR'nün uyarma sistemi ile bağlantısı..... 12
Şekil 2.5 : DSR'nün türbin ve generatöre bağlantısı..... 13
Şekil 2.6 : DSR'nün mekanik güç ve rotor hızı davranışına etkisi..... 13
Şekil 2.7 : GSKK ve senkron generatör bağlantısı..... 15
Şekil 2.8 : Geleneksel yapıdaki GSKK.....15
Şekil 2.9 : SVK eklendikten sonraki güç sistemi modeli.....16
Şekil 2.10 : SVK kontrol karakteristiği..... 17
Şekil 3.1 : **"**Orta Boy" kümesine ait üyelik fonksiyonu..... 19
Şekil 3.2 : "Kısa Boy" kümesi ve tümleyeni..... 20
Şekil 3.3 : "Kısa Boy" ve "Uzun Boy" kümelerinin birleşimi.....20
Şekil 3.4 : "Kısa Boy" ve "Uzun Boy" kümelerinin kesişimi.....21
Şekil 3.5 : Bulanık kontrolörün iç yapısı.....21
Şekil 3.6 : Herhangi bir sistemin cevabı..... 23
Şekil 3.7 : Örnek bir kuralın işleyişi..... 23
Şekil 3.8 : Ağırlık merkezi yöntemiyle durulaştırma..... 24
Şekil 4.1 : Genetik algoritmaların genel çalışma yapısı.....27
Şekil 4.2 : Gauss dağılımına ait olasılık yoğunluğu fonksiyonu.....34
Şekil 5.1 : Tek makina-sonsuz bara güç sistemi modeli.....36
Şekil 5.2 : Tek makina-sonsuz bara güç sistemine ait fazör diyagram.....40
Şekil 5.3 : IEEE Tip1 uyarma sistemi modeli..... 42
Şekil 5.4 : Geleneksel GSKK yapısı..... 43
Şekil 5.5 : Giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları..... 46
Şekil 5.6 : Çıkış için kullanılan üyelik fonksiyonları.....47
Şekil 5.7 : PID yapıdaki bulanık kararlı kılıcı.....48
Şekil 5.8 : PD yapıdaki bulanık kararlı kılıcı..... 49
Şekil 5.9 : SVK blok diyagramı.....50
Şekil 5.10 : SVK eklenmiş güç sistemi modeli.....51
Şekil 5.11 : SVK akımının d ve q eksenlerine ait bileşenleri.....52
Şekil 5.12 : Kısa devreye maruz kalan güç sistemi.....53
Şekil 5.13 : Güç sisteminin Simulink programındaki modeli..... 54
Şekil 5.14 : Sisteme ait durumların Simulink programındaki modeli..... 55
Şekil 5.15 : Türbin ve hız regülatörü modeli.....56
Şekil 5.16 : Senkron generatöre ait mekanik alt sistem.....57
Şekil 5.17 : Güç sistemine ait elektriksel alt sistem.....58
Şekil 5.18 : Yapısına SVK eklenmiş güç sistemine ait elektriksel alt sistem....59
Şekil 6.1 : OGR'lü senkron generatör rotor açısı değişimi..... 62
Şekil 6.2 : OGR'lü senkron generatör uç gerilimi değişimi.....63

Şekil 6.3 : GSKK'nın senkron generatör rotor açısına etkisi..... 64
Şekil 6.4 : GSKK'nın senkron generatör uç gerilimine etkisi..... 65
Şekil 6.5 : GSKK ve BGSKK'lı durumlarda generatör rotor açısı değişimi... 66
Şekil 6.6 : GSKK ve BGSKK'lı durumlarda generatör uç gerilimi değişimi..66
Şekil 6.7 : Sisteme SVK eklenmesinin generatör rotor açısına etkisi..... 68
Şekil 6.8 : Sisteme SVK eklenmesinin generatör uç gerilimine etkisi..... 68
Şekil 6.9 : SVK ve BGSKK'nın birlikte generatör rotor açısına etkisi..... 69
Şekil 6.10 : SVK ve BGSKK'nın birlikte generatör uç gerilimine etkisi..... 70
Şekil D.1 : P=0,6 p.u., Q=0,4 p.u. hafif endüktif yük durumunda rotor açısı değişimi..... 81
Şekil D.2 : P=0,6 p.u., Q=0,4 p.u. hafif endüktif yük durumunda uç gerilimi değişimi..... 81
Şekil D.3 : P=0,4 p.u., Q=0,2 p.u. hafif endüktif yük durumunda rotor açısı değişimi..... 82
Şekil D.4 : P=0,4 p.u., Q=0,2 p.u. hafif endüktif yük durumunda uç gerilimi değişimi..... 82
Şekil D.5 : P=0,4 p.u., Q=-0,2 p.u. hafif kapasitif yük durumunda rotor açısı değişimi..... 83
Şekil D.6 : P=0,4 p.u., Q=-0,2 p.u. hafif kapasitif yük durumunda uç gerilim değişimi.....83

SEMBOL LİSTESİ

δ	: Rotor açısı
ω	: Açısal hız
ΔT_e	: Elektriksel moment değişimi
T_S	: Senkronizasyon moment katsayısı
T_D	: Sönüm moment katsayısı
$\Delta\delta$	: Rotor açısı değişimi
$\Delta\omega$	: Açısal hız değişimi
V_T	: Senkron generatör uç gerilimi
V_{Tref}	: Senkron generatör referans uç gerilimi
E_{fd}	: Uyarma gerilimi
V_T	: Senkron generatör uç gerilimi
U_{GSKK}	: Karalı kılıcı gerilim değeri
P_M	: Mekanik güç
P_E	: Elektriksel güç
ω_0	: Açısal hız başlangıç değeri
$P_{M\,0}$	: Mekanik güç başlangıç değeri
ΔP_M	: Mekanik güç değişimi
ΔP_E	: Elektriksel güç değişimi
r_e	: Eşdeğer hat direnci
x_e	: Eşdeğer hat reaktansı
I_{SVK}	: SVK akımı
μ	: Üyelik değeri
$Ç_1$	: Birinci çocuk
$Ç_2$	: İkinci çocuk
J	: Amaç fonksiyonu
V_∞	: Sonsuz baranın gerilimi
D	: Sönüm katsayısı
M	: Eylemsizlik sabiti
E'_d	: Geçici gerilim d ekseni bileşeni
E'_q	: Geçici gerilim q ekseni bileşeni
T'_{d0}	: Açık devre zaman sabiti d ekseni bileşeni
T'_{q0}	: Açık devre zaman sabiti q ekseni bileşeni
r_a	: Senkron generatör iç direnci
x'_d	: Geçici senkron reaktans d ekseni bileşeni
x_d	: Senkron reaktans d ekseni bileşeni
x_q	: Senkron reaktans q ekseni bileşeni
V_{Td}	: Senkron generatör uç gerilimi d ekseni bileşeni
V_{Tq}	: Senkron generatör uç gerilimi q ekseni bileşeni
I_d	: Stator akımı d ekseni bileşeni
I_q	: Stator akımı q ekseni bileşeni
I_0	: Generatör akımı sürekli hal değeri
P	: Aktif güç

Q : Reaktif güç
φ : Yük açısı
V_{TR} : Senkron generatör referans uç gerilimi
ΔP_r : Hız rölesi çıkış gücü değişimi
K_G : Hız rölesi kazancı
T_{SR} : Hız rölesi zaman sabiti
ΔP_h : Servomotor çıkış gücü değişimi
T_{SM} : Servomotor zaman sabiti
ΔP_c : Ara ısıtıcı çıkış gücü değişimi
T_{CH} : Ara ısıtıcı zaman sabiti
K_{RH} : Isıtıcı kazancı
T_{RH} : Isıtıcı zaman sabiti
K_A : OGR kazancı
T_A : OGR zaman sabiti
K_E : Uyarma sistemi kazancı
T_E : Uyarma sistemi zaman sabiti
S_E : Uyarmaya ilişkin doyma değeri
K_F : Uyarma kararlayıcısı kazancı
T_F : Uyarma kararlayıcısı zaman sabiti
K_{GSKK} : GSKK kazancı
T_W : GSKK sıfırlama filtresi zaman sabiti
T_1, T_2, T_3, T_4, : GSKK faz kompanzasyon filtresi zaman sabitleri
Kf_1, Kf_2, Kf_3 : Bulanık kontrolör ölçekleme çarpanları
B_{SVK} : SVK süseptans değeri
V_{SVKref} : SVK refarans gerilimi
T_M, T_C : SVK zaman sabitleri
K_P : Kontrolör oransal katsayısı
K_I : Kontrolör integral katsayısı
β : Üretim barasının geriliminin açısı
I_{SVK} : SVK akımı

Alt indisler

0 : Değişken sürekli hal değeri
d : d ekseni bileşeni
q : q ekseni bileşeni

GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZE EDİLMİŞ BULANIK GÜÇ SİSTEMİ KARARLI KILICISININ SİSTEM KARARLILIĞINA ETKİSİ

ÖZET

Gelişen dünyada her geçen gün enerji ihtiyacının artması, elektrik enerjisi talebinin de sürekli artmasına neden olmaktadır. Bu durumda, elektrik enerjisinin belli standartlarda ve sürekli olarak tüketiciye sağlanması bir zorunluluk halini almıştır. Elektrik enerjisini, sabit gerilim ve frekans değerlerinde, kesintisiz olarak sağlamak ancak güç sistemlerinin kararlı çalışmasıyla mümkün olabilir.

Bilindiği gibi güç sistemleri, elektrik enerjisi üretimi için senkron generatörlere bağımlıdır. Sistemin düzgün çalışması için gerekli koşul bütün senkron generatörlerin senkronizmada kalması ve çalışmaya devam etmesidir. Bu açıdan bakıldığında güç sistemlerinde kararlılık, senkron generatörlerin rotor açılarına bağlıdır.

Sürekli artan enerji ihtiyacından dolayı enerji iletim hatlarının aşırı yüklemesi, iletim hatlarında meydana gelebilecek kısa devreler, enerji talebindeki ani değişimler, güç sisteminde sıkça karşılan ve sistemin açısal kararlılığını bozabilecek olaylardır. Bu olaylara rağmen kararlılığı sağlamak için güç sistemleri kontrol elemanları ile donatılır. Güç sisteminin kararlılığı, kullanılan kontrol elemanlarının verimli çalışmasına bağlıdır. Literatürde, güç sistemlerinde kullanılan kontrol elemanlarını geliştirme amaçlı birçok çalışma mevcuttur.

Klasik Aristo mantığı kesin yargıları temel alır. Bulanık mantık belirsizlik içeren bir yapıya sahiptir. Belirsizlik, normal hayatta kullanılan hızlı, yavaş, soğuk, sıcak gibi dilsel değişkenler ile ifade edilir. Bu yönden çalışma şekli insanın düşünce tarzına benzer. Kesin matematiksel verilere ihtiyaç duymayan bulanık mantık, basit yapısıyla birçok uygulamada kullanılmıştır.

Bulanık mantığın kullanıldığı bir dal da kontrol teorisidir. Günümüzde, bulanık mantığa dayalı akıllı kontrol elamanlarının, klasik kontrol tekniklerini temel alan kontrol elemanlarından daha verimli çalıştığı birçok uygulama mevcuttur. Yapıları gereği bulanık kontrolörlerin verimli çalışması, kural tabanına ve ölçekleme çarpanlarına bağlıdır. Bulanık kontrolörün performansını artırmak için kural tabanını ve ölçekleme çarpanlarını optimize etmek gerekir.

Akademik çalışmalarda ve endüstride karşılaşılan birçok problem farklı optimizasyon yöntemleri ile çözülmeye çalışılmaktadır. Geleneksel yöntemler ancak belli şartları sağlayan problemlerin çözümünde kullanılabilirler. Örnek olarak, matematiksel modele sahip olmayan bir kontrolörün optimizasyonu geleneksel

yöntemlerle gerçekleştirilemez. Ayrıca birden fazla yerel en iyi çözüme sahip problemlerde, geleneksel yöntemler çözüm yapıları gereği global en iyi çözüme ulaşamayabilirler. Evrim teorisine dayalı genetik algoritmalar geleneksel optimizasyon yöntemlerinde karşılaşılan bu sorunları ortadan kaldırmıştır. Bu sebeple akademik çalışmalarda ve endüstride oldukça fazla kullanılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, ele alınan tek makina-sonsuz bara güç sisteminde rotor açısı kararlılığını, bulanık mantık teorisi kullanılarak tasarlanmış ve genetik algoritma ile iyileştirilmiş bulanık güç sistemi kararlı kılıcısı ile iyileştirmektir. Çalışmada, bulanık kararlı kılıcı ile rotor açısı kararlılığı iyileştirilirken, generatör uç geriliminde meydana gelen tepe değerleri yok etmek amacıyla güç sisteminin üretim barasına bir statik var kompanzatörü eklenmiştir. Bulanık kararlı kılıcı ve diğer kontrolörlerin optimizasyonu için kullanılan genetik algoritma Matlab programında yazılmıştır. Sistem ve kontrol elemanlarının matematiksel modelleri yine Matlab altında çalışan Simulink programına aktarılmış ve elde edilen benzetim sonuçlarına göre bulanık yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısının rotor açısı kararlılığı üzerine etkisi, klasik yapıdaki kararlı kılıcı ve diğer kontrol elemanlarıyla karşılaştırılmıştır.

EFFECTS OF GENETIC ALGORITHM OPTIMIZED FUZZY LOGIC POWER SYSTEM STABILIZER ON SYSTEM STABILITY

SUMMARY

Electric energy demand increases continuously because of increasing on energy consumption day by day in developing world. In this case, providing uninterrupted electric energy in certain standarts to consumers became necessary. Providing uninterrupted electric energy with constant voltage and frequency is possible only if power systems work stable.

As known, power systems are devoted to synchronous generators for electric energy production. All synchronous generators must be kept in synchronism for proper system working. According to that, power system stability is related to rotor angles of synchronous generators.

Overloaded transmission lines, faults and sudden changes in load are typical events in power systems which can disturb rotor angle stability. Despite of these disturbances to provide system stability, controllers are used in power systems. Stability of system depends on effectiveness of controllers. In literature, there are plenty of studies to enhance controllers used in power systems.

Classic Aristo logic is based on certain statements. On the other hand, fuzzy logic structure includes indefiniteness which is expressed by linguistic variables used in daily life such as fast, slow, cold, hot etc.. Working progress of fuzzy logic is similar to human thinking. Fuzzy logic don't deal with diffucult and certain mathematical statements. Because of its simple structure, fuzzy logic is used in many different applications.

Fuzzy logic is also used in control theory. In present time, there are many applications where fuzzy logic based intelligent controllers work more effective than controllers based on classical control theory. According to their structures, effectiveness of fuzzy logic controllers depends on their rule table and also scale coefficients. So, their rule table and also scale coefficients can be optimized to improve performance of fuzzy logic controllers.

Different optimization methods are used to solve problems appeared in industrial applications and surveys. Traditional methods can only be used for problems which include several conditions. For example, traditional methods can't be used for optimization of controllers without mathematical models. Also, traditional methods may not reach global solution of problems with multi local optimums. Disadvantages of traditional methods are removed by evolutionary theory based

genetic algorithms. So genetic algorithms are prefered in industrial cases and academic studies.

Aim of this work is to improve rotor angle stability of one machine-infinite bus system, using fuzzy logic based and GA optimized power system stabilizer. While improving rotor angle stability by fuzzy power system stabilizer, static var compensator is installed to generation bus to prevent peak values of terminal voltage caused by fuzzy logic controller. Power system and all controllers are modeled by Matlab Simulink program. In addition, genetic algorithms which are used for optimization of all controllers are designed by Matlab. Simulation results are analyzed to make comparison between power system stabilizers in different structures and other controllers considering their effects on rotor angle stability.

1. GİRİŞ

Tüketiciler, elektrik enerjisinin sabit bir gerilim ve frekans değerinde kesintisiz olarak kendilerine sağlanmasını talep ederler. Bunun gerçekleştirilebilmesi için güç sistemlerinde kararlılığın sağlanması şarttır. Güç sistemlerinde kararlılık sistemin hem normal şartlarda dengeli bir çalışma noktasında kalması, hem de oluşan bir bozucu etkinin ardından sistemin dengeli bir çalışma noktasına oturmasıdır.

Kararlılık sadece tek bir sistem dinamiğine bağlı bir kavram değildir ve farklı şekilde sınıflandırılabilir. Açısal kararlılık sisteme senkron makinaların senkronizmada kalma yeteneği olarak tanımlanırken, gerilim kararlılığı da normal çalışmada veya bir bozucu etkinin ardından tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalma yeteneğidir. Kararlılık bunun dışında bozucu etkinin büyüklüğü ve sistem dinamiğinin incelendiği zaman aralığına bağlı olarak da çeşitli şekiller de sınıflandırılabilir. Geçici hal kararlılığında, büyük bir bozucu etki sonrasında sistemin birkaç saniyelik zaman dilimindeki cevabı incelenirken, dinamik kal kararlılığı birkaç saniye ile birkaç dakika arasındaki zaman dilimini inceler. Sürekli hal kararlılığı da küçük bir bozucu etki ardından sistemin birkaç dakikadan daha uzun sürede verdiği cevabı inceler.

Güç sistemlerinde oluşabilecek bozucu etkiler sonucu mekanik ve elektriksel güç dengesinin bozulması durumunda sistemin açısal kararlılığını koruyabilmesi için öncelikle yeterli senkronizasyon momentinin üretilmesi gerekir. Senkronizasyon momentini güçlendirmek adına generatörlerin uyarma sistemine etkiyen otomatik gerilim regülatörleri kullanılır. Ancak senkronizasyon momenti kararlılığı tek başına sağlayamaz. Rotor açısının referans değerine göre değişimi karşılayan senkronizasyon momenti, rotor açısının kayma yapmasını engeller. Ancak rotor açısal hızındaki değişimi karşılayan sönüm momentinin eksikliği söz konusu olursa rotor açısı salınımlarının genlikleri azaltılamaz ve kararlılık sağlanamaz. Yeterli sönüm momentini üretmesi için sisteme güç sistemi kararlı kılıcıları eklenir.

Giriş olarak rotor hızı değişimi, frekans veya mekanik-elektriksel güç farkını kullanan güç sistemi kararlı kılıcısı, OGR ve uyarma sistemine verdiği çıkış sinyaliyle, senkron generatörün rotoruna ilişkin elektriksel momente etki eder. Bu sayede sönüm momentini artırarak olası rotor açısı salınımlarını söndürebilir. Farklı giriş kombinasyonlarının kullanıldığı pek çok kararlı kılıcı modeli geliştirilmiştir. Güç sistemlerinde geleneksel kontrol teorisine dayalı kontrol elemanları dışında bulanık mantık teorisine dayalı kontrol elemanlarının da başarılı sonuçlar elde ettikleri uygulamalar mevcuttur.

Klasik mantık kesin yargılara dayanan bir mantık sistemidir. Bulanık mantık ise klasik mantıktan farklı olarak yapısında belirsizlik içeren dilsel değişkenlere yer verir. Klasik mantığın çalışmasına örnek vermek gerekirse oda sıcaklığı 30 derecenin altındaysa "oda soğuk", 30 derecenin üstündeyse "oda sıcak" yargılarına varılır. İnsan olarak 30,1 derece ile 29,8 derece arasındaki farkı algılayamasak da, klasik mantık bu iki değeri kesin bir sınırla sıcak ve soğuk olarak birbirinden ayırır. Bulanık mantığa göre ise 30,1 derece 0,95 kadar sıcak ve 29,8 derece 0,9 kadar sıcak olarak ifade edilebilir. Bulanık mantığın çalışma şekli bu noktada insanınkine benzer.

Klasik mantık ve matematik kullanılarak karmaşık sistemleri modellemek ve kontrol etmek zordur. Eldeki değerler kesin ve eksiksiz olmalıdır. Klasik mantık için arabanın hızı 210 km/saat olarak verilmelidir. Bulanık mantık ise kesin olmayan bilgiler ve insan deneyimlerini temel alır. Bulanık bir sisteme girilecek verilerin ise yaklaşık olması yeterlidir ve arabanın hızı için "çok hızlı" demek yeterli olacaktır. Böylece her türlü sistem, uzman görüşü alınarak oluşturulan kuralları kullanan bulanık mantıkla modellenebilir.

Bu çalışmada da klasik kontrol teorisi temel alınarak tasarlanmış bir güç sistemi kontrol elemanı, bulanık mantık teorisine göre yeniden tasarlanmıştır. Kontrolörün yapısı gereği, kesin girişler, dilsel değişkenlerle bulanıklaştırılır. Bulanık veriler, uzman deneyimleriyle oluşturulan kurallar yardımıyla bulanık çıkışlara dönüşür Bulanık çıkışlar da gerçek sistemlere uygulanmak üzere kesin değerlere dönüştürülür. Kontrolörün performansı, uzmanın kural tablosunu oluşturmadaki becerisine ve kontrolörün giriş ve çıkışındaki ölçekleme çarpanlarına bağlıdır. Ölçekleme çarpanlarının optimizasyonu ile kontrolörün verimi daha da artırılır.

Evrim teorisine göre, her canlı türünün varoluşundan itibaren yaşamış tüm nesilleri içinde en iyi neslin günümüzde yaşayan nesil olduğu kabul edilir. Başka bir deyişle evrim neticesinde her canlı türünün kendisinden bir önceki nesle göre daha gelişmiş olduğu söylenebilir. Bir ceylan sürüsünü örnek alırsak, sürü içindeki ceylanlardan yavaş ve güçsüz olanlar çita saldırıları sonucu ölürken geriye kalan daha iyi niteliklere sahip ceylanlar çiftleşerek kalıtsal özelliklerini sürünün yeni bireyleri olacak çocuklarına aktarmış olurlar. Evrim teorisine bu açıdan bakan bir optimizasyon yöntemi olan genetik algoritmanın temelleri 1960'larda atılmıştır.

Genetik algoritmaların çalışma mantığına göre öncelikle çözüm uzayından rasgele alternatif çözümler seçilerek en iyi çözüm aranmaya başlanır. Bu alternatif çözümler popülasyon içindeki bireyleri temsil eder ve her çözüm belirlenen uygunluk fonksiyonuna göre farklı uygunluk değerine sahiptir. Uygunluk değerleri yüksek olan bireylerin çiftleme ve bir sonraki nesle genlerini aktarma olasılığı yüksektir. Tabi gerçek hayatta olduğu gibi küçük bir olasılık da olsa bireyler mutasyona uğrayabilir veya şans eseri kötü bireyler de çiftleşebilir. Sonuç olarak genetik algoritmalar, nesilden nesle iyileşen bir çözüm kümesi sayesinde en iyi çözüme ulaşma mantığıyla çalışırlar.

Darwin'in evrim teorisini örnek alan genetik algoritmalar, klasik optimizasyon yöntemlerinin sonuca gidemediği problemlerin çözümünde başarılı olmuştur. Klasik yöntemlerin getirdiği süreklilik, türeve sahip olma, tek optimuma sahip olma gibi kısıtlamalar genetik algoritmaların kullanımı ile ortadan kalkmıştır. Bu sebeple günümüzde mühendislik, finans, akademik ve benzeri birçok alanda optimizasyon amacıyla kullanılmaktadır.

Güç sistemi kararlı kılıcısının geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda öncelikle farklı girişlerin ve kontrolör çıkış limitlerinin kararlı kılıcı davranışına etkisi üzerinde durulmuştur. Bunun dışında klasik yapıdaki kararlı kılıcılı parametreleri, küçük işaret analizi sonucu elde edilen özdeğerlere göre tasarlanmış genetik algoritmalarla optimize edilmeye çalışılmıştır [1]. Güç sistemi kararlı kılıcılarının başka kontrol elemanlarıyla birlikte çalıştığı durumlarda sistemin sürekli hal kararlılığını incelemiş çalışmalar da mevcuttur [2]. Klasik kontrol teorisine dayanan kontrolörler yerine bulanık mantık tabanlı kontrolörler de araştırılmıştır. Geleneksel kararlı kılıcının yerine basit yapıya sahip bulanık güç sistemi kararlı kılıcıları tasarlanarak

kontrolörlerin sistemin sürekli hal davranışına etkileri incelenmiştir [3]. Ayrıca güç sistemlerinden bağımsız olarak, bulanık kontrolörlerin verimlerini artırmak amacıyla kural tablosu ve üyelik fonksiyonlarının optimizasyonu ile ilgili çalışmalar da mevcuttur [4].

Bu çalışmada, güç sistemi kararlı kılıcısının rotor açısı geçici hal kararlılığına ilişkin performansını artırmak amacıyla bulanık mantık teorisine dayalı bir güç sistemi kararlı kılıcısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bulanık kararlı kılıcının giriş ve çıkış ölçekleme çarpanları da probleme uygun olarak oluşturulan bir genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Bulanık kararlı kılıcısının diğer kontrol elemanlarıyla karşılaştırmasının tutarlı olması açısından, sistemde kullanılan diğer kontrol elemanları da yine genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir.

Bu yüksek lisans çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, çalışmada ele alınan problem ve problemin çözümü için kullanılan yöntemler hakkında ön bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, güç sistemlerinde kararlılık ile çalışmada ele alınan ana problem olan rotor açısı kararlılığına değinilmiş ve karalılığı sağlamak için çalışmada kullanılan güç sistemi kontrol elemanları tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde, bulanık mantık temeli ve bulanık mantığın kontrol teorisine uygulanabilirliği açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, genetik algoritmalar ve çalışmada kullanılan genetik algoritmanın amacı ile yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde, çalışmada kullanılan güç sisteminin, geleneksel ve bulanık yapıdaki kontrol elemanlarının matematiksel modelleri yanında bilgisayar programına aktarılmış modelleri açıklanmıştır. Altıncı bölümde, güç sisteminin farklı kontrol elemanlarını içerdiği her bir durum için bilgisayar benzetim sonuçları verilmiştir. Yedinci ve son bölümde de bilgisayar benzetim sonuçları temel alınarak farklı yapıdaki kontrol elemanları arasında karşılaştırmalar yapılmıştır.

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

Bu bölümde güç sistemlerinde kararlılık problemi incelenecektir. Güç sistemlerinde kararlılığın tanımı açıklanıp güç sistemlerinde kararlılığa ilişkin bir sınıflandırma yapılacaktır. Son olarak da güç sistemlerinde kararlılığı sağlamak amacıyla kullanılan elemanlar ele alınacaktır.

2.1 Güç Sistemlerinde Kararlılığın Tanımı

Güç sistemlerinde kararlılık, güç sisteminin normal çalışma koşullarında dengeli çalışma durumunda kalması ve bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra kabul edilebilir bir denge durumuna tekrar geri dönmesi, olarak tanımlanabilir [5].

Güç sistemi ancak sisteme ilişkin mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış güç değerleri arasında sürekli bir denge sağlanması şartıyla kararlı olarak çalışabilir. Güç sistemi, elektrik enerjisi üretimi bakımından senkron generatörlere bağlıdır. Sisteme ilişkin mekaniksel giriş, tahrik makinalarıyla senkron generatörlere verilen mekanik güçtür. Elektriksel çıkış ise güç sistemindeki elektriksel yüklerdir. Elektriksel yüklerde oluşabilecek bir değişim, sisteme enjekte edilen mekaniksel güçteki karşı değişimlerle dengelenmelidir [6].

Güç sistemlerinde, ani yük değişimleri, enerji iletim hatlarındaki kısa devreler, açma kapama işlemleri gibi olaylar gerçekleşebilir. Bozucu etki olarak adlandırılan bu olaylar sistemin mekanik ve elektriksel güç dengesini bozar. Bu durumda senkron generatörlerin rotor açılarında salınımlar meydana gelir. Eğer oluşan senkronizasyon momenti generatörlerin açısal farkını azaltamazsa bazı generatörler senkronizmadan çıkabilir.

Kararsızlık sadece senkron makinaların senkronizmadan çıkması olarak nitelendirilemez. Senkronizmada bir kayıp olmasa bile kararsızlık ile karşılaşılabilir. Senkron generatörün bir iletim hattı üzerinden yük olarak asenkron motoru beslediği

bir sistemde yük geriliminin çökmesi sebebiyle de kararsızlık meydana gelebilir. Bu sebeple kararlılık problemini daha rahat anlamak için kararlılık çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir [7]. Kararsızlık, bozucunun cinsine, bozucunun etkilediği sistem dinamiğine veya bozucunun ilgili sistem dinamiğine etki ettiği zaman dilimine göre Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılabilir.



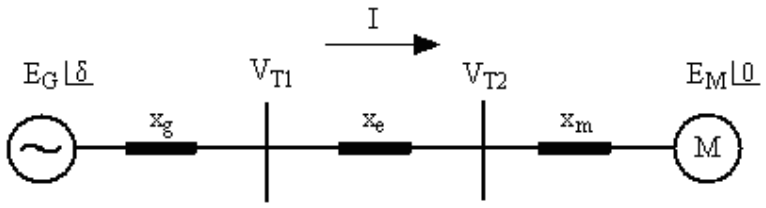
Şekil 2.1: Güç sistemlerinde kararlılığın sınıflandırılması

2.2 Rotor Açısı Kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı, güç sistemine bağlı senkron makinaların senkronizmada kalma yeteneği olarak tanımlanabilir. Kararlılık problemi, güç sistemindeki elektromekanik salınımların incelenmesini kapsar. Problemin ana ilkesi, senkron generatörlere ait çıkış güçlerinin rotor açısı salınımlarına bağlı olarak değişmesidir.

Senkron makinaların, uyarma ve endüvi sargıları olmak üzere iki temel elemanı vardır. Uyarma sargısı rotorda, endüvi sargısı ise statorda bulunur. Uyarma sargısı doğru akım ile beslenir. Rotor bir türbin ile döndürüldüğü zaman uyarma sargısının dönen manyetik alanı statorda bulunan üç fazlı endüvi sargısında alternatif gerilim endükler. Stator uçlarına yük bağlandığında akan akımın ve stator uçlarındaki gerilimin frekansı rotorun hızına bağlıdır. İki veya daha çok senkron generatör beraber çalıştığında tüm generatörlerin stator gerilimleri ve akımları aynı frekansa sahip olmalıdır ve her generatörün rotorunun hızı bu frekansla senkronizedir. Bu sebeple, sisteme bağlı tüm senkron generatörlerin rotor hızları senkronizmada olmalıdır [5].

Güç sistemi kararlılığına ilişkin önemli bir özellik de değişen güç ve rotorun açısal konumu arasındaki bağıntıdır. Bu bağıntıyı açıklamak için Şekil 2.2'deki gibi senkron generatör, iletim hattı ve senkron motordan oluşan basit bir sistemi ele alalım.



Şekil 2.2: İki senkron makina ve iletim hattından oluşan sistem

Şekil 2.2'deki x_g ve x_m senkron makinalara ilişkin senkron reaktanslar ve x_e de direnci ve kapasitesi ihmal edilen iletim hattının reaktansıdır. Senkron generatör ve motor arasındaki güç aktarımı iki makinanın rotorları arasındaki açısal fark δ'ya bağlıdır. (2.1) ile de δ ile generatörden motora aktarılan güç arasındaki eşitlik verilmiştir.

$$P_E = \sin\delta \frac{E_G E_M}{(x_g + x_e + x_m)} \qquad \textbf{(2.1)}$$

(1.1)'den de görüleceği gibi elektriksel güç ile rotor açısı arasındaki bağıntı sinüzoidal şekildedir. δ açısı 0 iken iki makine arasında bir iletim söz konusu olmaz. Açının artırılması güç iletimini artırır ve δ açısı 90 derecede iken güç iletimi en büyük değerine ulaşır. Açının daha da artması güç iletimini azaltacaktır.

Enterkonnekte sistemde, sürekli durumda her makinanın mekanik giriş momenti ile elektriksel çıkış momenti arasında bir denge vardır ve hız sabittir. Sistem bozulmuşsa, bu denge de ortadan kalkar. Bir generatör diğerinden sürekli olarak hızlı ise bu generatörün rotorunun açısal konumu yavaş makinanın rotorunun açısal konumundan daha ileridedir. Yukarıda anlatılan güç bağıntısından da görüleceği gibi, rotorunun açısal konumu ileride olan generatör diğer generatörün yükünün bir kısmını üzerine alacaktır. Bu durumda yükü artan hızlı generatör yavaşlayacak ve generatörlerin rotorlarının açısal farkları azalacaktır. Sonuç olarak sistem kararlılığı, rotorların açısal konumlarındaki sapmaların, açısal farkı azaltacak senkronizasyon

momentini oluşturup oluşturamadıklarına bağlıdır. Yukarıda verilen bağıntı yüksek dereceden doğrusal değildir. Büyük bir bozucu etki ile belli sınırların ötesinde bir açısal fark oluşursa, yeterli senkronizasyon momenti sağlanamaz ve açısal farktaki artış güç iletiminde bir azalmaya sebep olur, bu da açısal farkın daha da artırır ve generatörü senkronizmadan çıkarır [5].

Senkronizmadan çıkan generatör, sistem frekansında gerilimleri üretmek için normalinden daha hızlı veya daha yavaş çalışır. Dönen stator alanı ve rotor alanı arasındaki kayma, makine çıkışında büyük gerilim ve akım dalgalanmalarına neden olur ve koruma sistemi kararsız generatörü sistemden ayırır.

Güç sistemlerinde, bozulma sonucu senkron makinanın elektriksel momentindeki değişim (2.2) ile ifade edilebilir.

$$\Delta T_e = T_S \Delta\delta + T_D \Delta\omega \qquad \textbf{(2.2)}$$

Senkronizasyon momenti bileşeni $T_S.\Delta\delta$, rotor açısı değişimiyle momentteki değişimi ifade eder. T_S senkronizasyon moment katsayısıdır. Sönüm momenti bileşeni $T_D.\Delta\omega$, hız değişimiyle momentteki değişimi ifade eder. T_D sönüm moment katsayısıdır. Yeterli sönüm momentinin eksikliği rotor açısı salınımlarında kararsızlığa sebep olur. Yeterli senkronizasyon momentinin eksikliği rotor açısında periyodik olmayan kayma neticesinde kararsızlığa sebep olur.

Kararlılık analizinde elverişli olması açısından rotor açısı kararlılığını küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı olarak iki sınıfa ayırabiliriz.

2.2.1 Küçük İşaret Kararlılığı

Küçük işaret kararlılığı güç sisteminin küçük bozulmalar altında senkronizmayı koruyabilme yeteneğidir. Yük ve üretimdeki ufak değişimlerden dolayı bu tür bozulmalar sürekli oluşabilir. Bu bozulmaların sistem eşitliklerinin doğrusallaştırılması için yeteri kadar küçük oldukları kabul edilir. Küçük işaret kararlılığı problemi iki nedene dayanır. Yeterli senkronizasyon momentinin eksikliğinden dolayı rotor açısı sürekli artar veya yeterli sönüm momenti eksikliğinden dolayı rotor açısı salınımlarının genliği artar. Senkronizasyon momenti otomatik gerilim regülatörleri sayesinde yeterli seviyeye yükseltildiğinden, küçük

işaret kararlılığında karşılaşılan genel sorun rotor açısı salınımlarının yetersiz sönümüdür.

Küçük işaret kararlılığını dinamik hal ve sürekli hal kararlılığı olarak ayırabiliriz. Dinamik hal kararlılığı, birkaç saniyelik geçici olay sonrasında (devir sayısı regülatörlerinin devrede olduğu birkaç dakikalık sürede) sistemin bozucu etkiye cevabıdır. Geçici olay sonrası devreye giren hız regülatörleri mekanik giriş enerjisini artırarak veya azaltarak, mekanik güç ile elektriksel güç dengesiin sağlamak isterler. Sürekli hal kararlılığı da beklenen yük değişimleri ve küçük bozucu etkilere sistemin birkaç dakika ve daha uzun sürede verdiği cevaptır. Senkron makinaların bazılarında oluşabilecek üretim değişikliği veya yükte oluşabilecek bir değişim karşılaşılabilecek küçük bozucular olarak kabul edilir. Kararlılık koşulu, küçük bozucular geçici veya kalıcı olsa da sistemin bir süre sonra tekrar işletme koşullarında çalışmayı sürdürmesidir.

Küçük bozucu etki sebebiyle, sisteme ait tüm durum değişkenlerinde oluşan farklar çok küçükse, sistemin bozucu etki sonrasındaki çalışma noktası başlangıç çalışma noktası yakınlarındadır. Bu durumda, doğrusal olmayan bu sistem davranışı doğrusal bir matematiksel model gibi incelenebilir. Doğusallaştırılan sistem eşitlikleri yardımıyla A sistem matrisi elde edilir. Sistem matrisinden elde edilen özdeğerlerin imajiner eksendeki konumları ile sistemin küçük işaret kararlılığı analiz edilir [7].

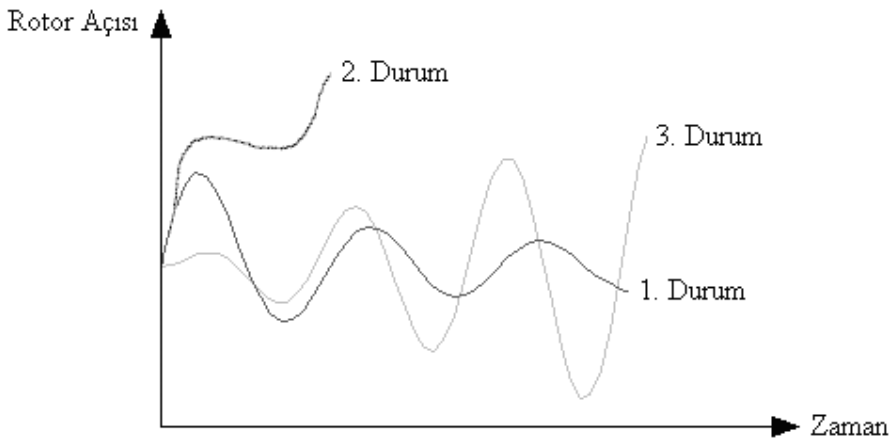
2.2.2 Geçici Hal Kararlılığı

Geçici hal kararlılığı, güç sisteminin büyük bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra senkronizmayı koruma yeteneğidir. Ani yük değişimleri, enerji iletim hatlarındaki kısa devreler gibi bozucu etkiler ile senkronizmanın ani kaybı söz konusu olabilir. Genellikle faz-toprak, iki faz-toprak ve üç faz toprak kısa devreleri ele alınır. Geçici hal kararlılığı analizinde bozucu etkiden sonraki birkaç saniyelik süre incelenir. Bu zaman aralığında, tahrik sistemlerinin senkron generatöre giriş olarak verdiği mekanik gücün sabit olduğu yani zaman sabiti yüksek mekanik regülatörlerin devreye girmediği kabul edilir [6].

Bozucu etki öncesi ve sonrasında, durum değişkenlerinde oluşan farklar ihmal edilemeyecek kadar büyük olduklarından sistemin matematiksel modeli küçük işaret

kararlılığı analizindeki gibi doğrusal eşitliklerle ifade edilemez. Bu sebeple geçici hal kararlığı analizi için sistemin doğrusal olmayan eşitliklerden meydana matematiksel modeli oluşturulur ve çözüm bilgisayar yardımıyla yapılır. Bozucu etki sonrası yeni çalışma durumunun kararlılığı, rotor açısının zamana göre değişimine bakılarak elde edilir. Eğer tek makinalı sistemler ele alınıyorsa kararlılık analizi eşit alan kriteri ile de yapılabilir [7].

Enerji sistemi büyük bir bozucu etkiye maruz kaldığında sistemdeki senkron generatörlerin rotor açılarının ilk salınımları oldukça önemlidir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği ya da kararlı olarak çalışması, ilk salınımdan sonra salınımların genliklerinin giderek azalması ile mümkündür. Bozucunun türünü, yerini ve süresini içeren darbenin etkisi, geçici olay sırasında enerji iletim sisteminin güçlü senkronizasyon yeteneği, türbin-generatör ve iletim sistemi parametreleri, rotor açısının ilk salınımına ilişkin geçici olayları en çok etkileyen etmenlerdir [6]. Şekil 2.3'de farklı rotor açısı davranışları ele alınmıştır.



Şekil 2.3: Farklı rotor açısı davranışları [5]

Şekil 2.3'deki birinci duruma göre rotor açısı salınımlarının genlikleri zamana bağlı olarak azalmaktadır bu sebeple birinci durum kararlı durumdur. İkinci durumda senkronizma kaybından dolayı rotor açısı sürekli artmaktadır. Bu duruma ilk salınım kararsızlığı denir. İlk salınım kararsızlığı yetersiz senkronizasyon momenti nedeniyle meydana gelir. Üçüncü durumda ise sistem ilk salınıma göre kararlı olmasına rağmen zaman ile salınım genlikleri büyümektedir. Genellikle en çok karşılaşılan kararsızlık üçüncü durumdaki kararsızlıktır.

2.3 Gerilim Kararlılığı

Sistemin normal çalışmada veya bir bozucu etkiye maruz kaldıktan sonra tüm bara gerilimlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalma yeteneği gerilim kararlılığı olarak tanımlanabilir. Gerilim kararlılığı problemi, iletim hatları üzerinden enerji akışı olduğunda hatların endüktif reaktansları sebebiyle oluşan gerilim düşümüne dayanır.

Gerilim kararlılığı için gerek koşul sisteme ait her baraya giren reaktif gücün artması durumda bara geriliminin genliğinin artmasıdır. Bu durumda gerilim-reaktif güç duyarlılığı pozitiftir. Sistemin en az bir barası için gerilim-reaktif güç duyarlılığı negatif ise gerilim kararsızlığı söz konusu olur. Gerilim kararsızlığına neden olan ana faktör güç sisteminin reaktif güç talebini karşılayamamasıdır [5].

2.4 Güç Sistemlerinde Kullanılan Kontrol Elemanları

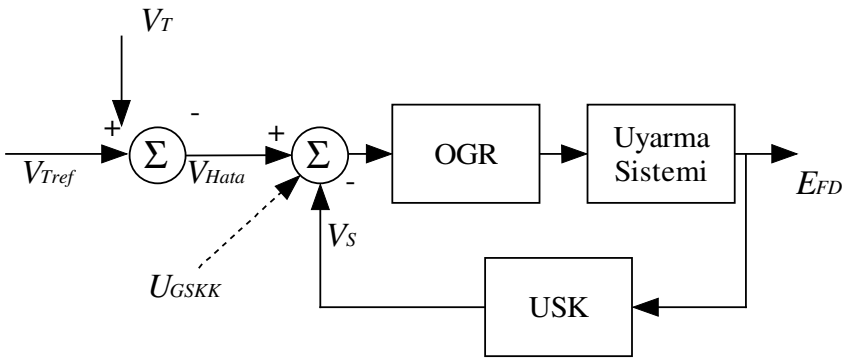
Bu bölümde, çalışmada kullanılan güç sistemi kontrol elemanları ele alınmıştır. Elemanların çalışma şekilleri, hangi sistem dinamiklerine etki ettiklerine dair teorik bilgiler verilmiştir. Elemanlara ait matematiksel modeller, transfer fonksiyonları ve parametreler beşinci bölümde anlatılmıştır.

2.4.1 Otomatik Gerilim Regülatörü

Bir uyarma ve uyarma kontrol sistemi uyarma akımını üretmek ve otomatik regülatörler ile kontrol etmek için tasarlanmış bileşik bir sistemdir. Tahrik edilen senkron generatörün uç gerilimi bu uyarma akımına bağlıdır. Uyarma akımını ve dolayısıyla uyarma gerilimini, otomatik gerilim regülatörüyle kontrol ederek senkron generatör uç gerilimi kontrol edilmiş olur [6].

Şekil 2.4'de otomatik gerilim regülatörünün uyarma sistemiyle bağlantısı verilmiştir. Bir bozucu etki sonucu senkron generatör uç gerilimi, referans değerinden farklı bir değer alır ve yüksek genlikli salınımlara sahip hata sinyali gerilim regülatörüne giriş olarak verilir. Düşük zaman sabitine sahip regülatör, hızlı bir şekilde harekete geçer ve yapısı gereği fark sinyalini belli sınırlar içerisinde tutarak uyarma sistemine iletir. Gerilim regülatörünün olmadığı durumda, uyarmaya giren yüksek genlikli fark sinyali salınımlı uyarma gerilimi ve uç gerilimine sebep olur. Regülatör, uyarma

sistemine daha düzgünleştirilmiş bir fark sinyali yollayarak uyarma gerilimi ve uç geriliminin yüksek salınımlı davranışlarını engeller. Gerilim regülatörünün uyarma gerilimi üzerindeki etkisiyle, generatör tarafından üretilen reaktif güç ve güç faktörü de kontrol edilmiş olur [8].



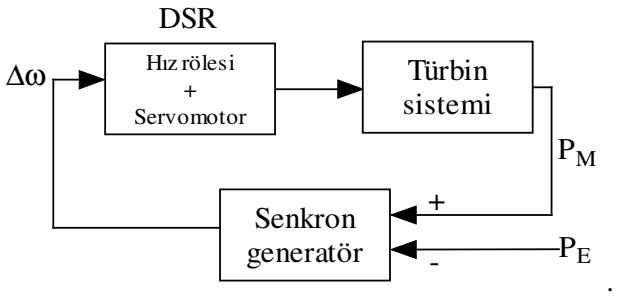
Şekil 2.4: OGR'nün uyarma sistemi ile bağlantısı [8]

Uyarma sisteminin kararlı çalışma bölgesini genişletmek amacıyla, uyarma gerilimini giriş olarak alan uyarma sistemi kararlayıcısı yine otomatik gerilim regülatörüne ek bir giriş olarak verilmiştir [8]. Blok diyagramlara ait transfer fonksiyonları ve parametreler modelleme bölümünde açıklanmıştır.

2.4.2 Devir Sayısı Regülatörü

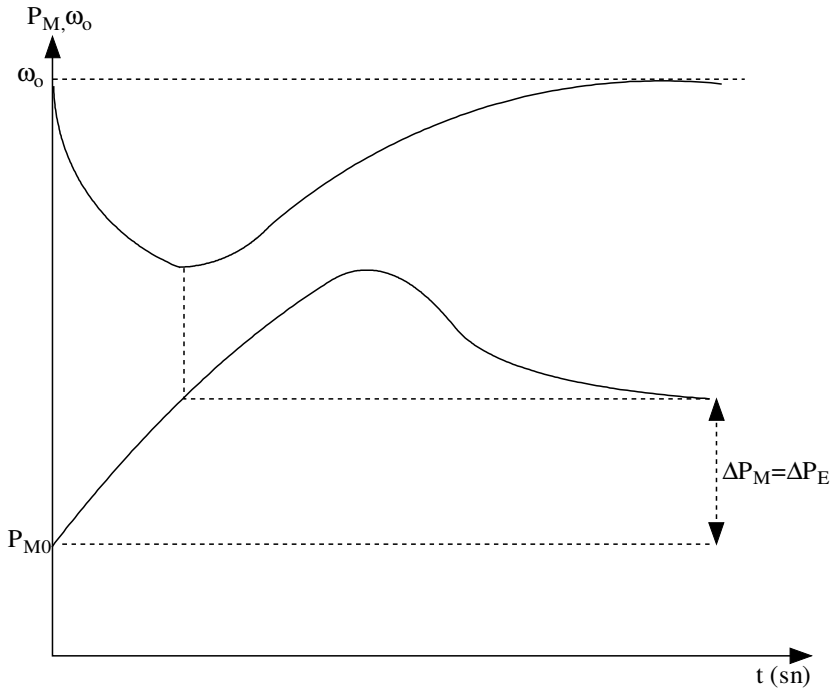
Devir sayısı regülatörleri, senkron generatörlere ilişkin mekanik giriş ve elektriksel çıkış gücü dengesini sağlayarak, senkron generatörün hızını sabit tutmak için kullanılan kontrol elemanlarıdır. Bu güç dengesini sağlamak için devir sayısı regülatörleri, generatörün mekanik giriş gücüne etki ederler.

Şekil 2.5'de devir sayısı regülatörünün türbin ve senkron generatöre bağlantısı verilmiştir. Regülatör bir hız rölesi ve servomotordan oluşur. Bir bozucu sebebiyle senkron generatörün yavaşlaması durumda, hız rölesi girişi sıfırdan farklı bir değer alır bu durumda hız rölesinden geçip servomotora iletilen hata sinyali sayesinde servomotor türbine verilen buhar veya su miktarını artıracak şekilde vanaları açar. Devir sayısı regülatörü, zaman sabiti yüksek mekanik bir sisteme etki ettiğinden etkisi hızlı meydana gelmez. Bu sebeple devir sayısı regülatörlerinin geçici hal kararlılığı incelenirken devre dışı oldukları kabul edilir.



Şekil 2.5: DSR'nün türbin ve generatöre bağlantısı [9]

Şekil 2.5 ile Şekil 2.6 beraber yorumlanarak devir sayısı regülatörünün senkron generatöre ilişkin mekanik güç ve hız değerleri üzerine etkisi incelenebilir.



Şekil 2.6: DSR'nün mekanik güç ve rotor hızı davranışına etkisi [5]

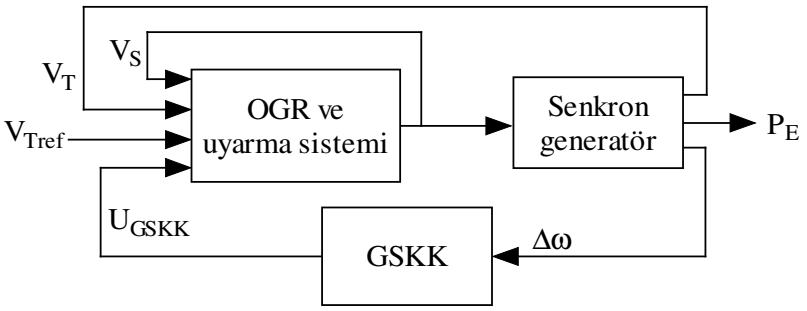
Bozucu etki olarak artan bir yük değişimi ele alındığında, generatör yavaşlamaya başlar. Oluşan hız farkı devir sayısı regülatörünü harekete geçirir. Regülatör, türbine ve generatöre daha fazla mekanik güç sağlar. Artan mekanik güç, yeni yük değerine eşit olduğu noktada generatör yavaşlamayı keser. Ancak aradaki hız farkından dolayı regülatör mekanik gücü artırmaya devam eder. Artan mekanik ve elektriksel güç farkı sebebiyle generatör hızı nominal değerine doğru yaklaşırken hız farkı da

azalmaya başlar. Azalan hız farkıyla beraber devir sayısı regülatörü mekanik güç artışını azaltır. Hız farkı azalırken, halen mekanik güç yeni elektriksel güçten fazla olduğundan, regülatörler tekrardan devreye girerek mekanik gücü azaltmaya başlarlar. Mekanik güç değeri, yeni yük değerine otururken, generatör hızı da ilk değerine erişir. Regülatörlerin mekanik gücü değiştirmesi sırasında rotor açısında salınımlar meydana gelir. Kararlılık koşulu olarak bu salınımların genliklerinin zamana bağlı olarak küçülerek yok olması gerekir [6].

2.4.3 Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı

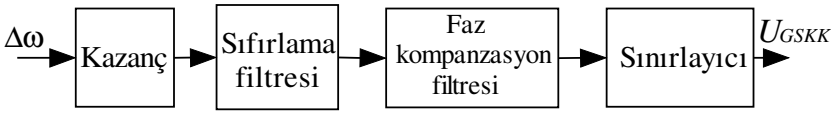
Güç sistemi bir bozucu etkiye maruz kaldığında, bozulan mekanik-elektriksel güç dengeleri sebebiyle generatör hızında ve rotor açısında salınımlar meydana gelir. Senkronizasyon ve sönüm momentleri sayesinde rotor açısının davranışı kararlılık sınırları içinde tutulabilmektedir. Rotor açısının referans değerine göre değişimini karşılayan senkronizasyon momenti, rotor açısının kayma yapmasını engeller. Senkronizasyon momentinin yeterli olması rotor açısı kararlılığı için yeterli değildir. Yeterli senkronizasyon momentine rağmen, rotor açısal hızındaki değişimi karşılayan sönüm momentinin eksikliğinden dolayı rotor açısı salınımlarının genlikleri azaltılamayabilir. Rotor açısı kararsızlığında genellikle bu sorunla karşılaşılır [5]. Güç sistemi kararlı kılıcısı burada devreye girer ve ürettiği sönüm momentiyle rotor açısı salınımlarına ait genliklerini azaltarak, senkron makinanın açısal kararlılığını sağlar [10].

Şekil 2.7'de güç sistemi kararlı kılıcısının senkron generatör ve uyarma sistemine nasıl bağlandığı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kararlı kılıcı tarafından üretilen işaret otomatik gerilim regülatörü ve uyarma sistemine ek bir giriş olarak verilir. Kararlı kılıcı, giriş verisi olarak açısal hız değişimi frekans, mekanik-elektriksel güç farkını kullanılabilir. Genellikle, sadece açısal hız değişiminin tek başına giriş olarak seçildiği modeller kullanılır. Ancak hız değişimi ile güç farkının beraber kullanıldığı modeller de bulunmaktadır.



Şekil 2.7: GSKK ve senkron generatör bağlantısı

Şekil 2.8'de sadece açısal hız değişimini giriş olarak alan güç sistemi kararlı kılcısının geleneksel yapısı verilmiştir.



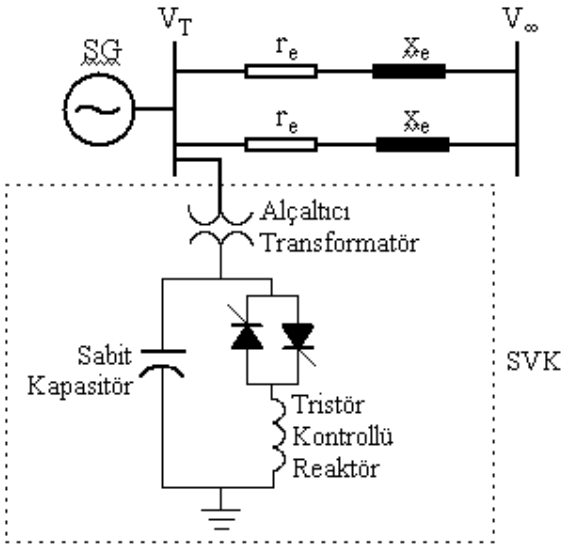
Şekil 2.8: Geleneksel yapıdaki GSKK [11]

Kazanç bloğu, kararlı kılıcının çıkış sinyalinin genliğine etki eder. Sadece açısal hız değişimini giriş olarak alan yapılarda kazanç değeri yüksek seçilir. Sıfırlama filtresinin temel amacı yüksek geçiren filtre gibi davranıp, girişindeki sinyale ait doğru akım bileşenlerini yok eder böylece hızın sürekli hal değişimi, generatör çıkış gerilimini etkileyemez. Bunun için filtreye ait zaman sabiti yeterince büyük seçilir. Ancak çok büyük zaman sabitleri de, generatör ada çalışma durumunda iken kararlı kılıcının generatör uç gerilimde dalgalanmalara yol açmasına neden olur. Rotor açısı salınımlarını söndürebilmek için, kararlı kılıcı sebebiyle senkron generatör rotoruna etkiyen elektriksel momentin, rotor hızı değişimiyle aynı fazda olması gerekir. Kullanılan faz kompanzasyon filtresi uyarma girişi ile elektriksel moment arasındaki kapasitif faz farkını kompanze etmek için kullanılırlar. Bu sebeple faz kompanzasyon filtresi endüktif yapıdadır. Yukarıda blok diyagramlar olarak verilen kararlı kılıcıya ait filtreler, modelleme bölümünde transfer fonksiyonları ve parametreleriyle beraber verilmiştir [12].

2.4.4 Statik VAR Kompanzatörü

Bu çalışmada esnek alternatif akım iletim sistemlerinden biri olan statik var kompanzatörü de incelenmiştir. Bu kontrol elemanın en temel görevi, bağlı olduğu baranın gerilimini ve dolayısıyla da reaktif güç akışını kontrol etmektir [13].

Yapısal olarak SVK, kapasitif ve endüktif sınırlar içinde değeri değişebilen ve sisteme paralel bağlı bir süseptans olarak tanımlanabilir. Şekil 2.9'da statik var kompanzatörünün iç yapısı ve bir güç sistemine nasıl bağlandığı gösterilmiştir.

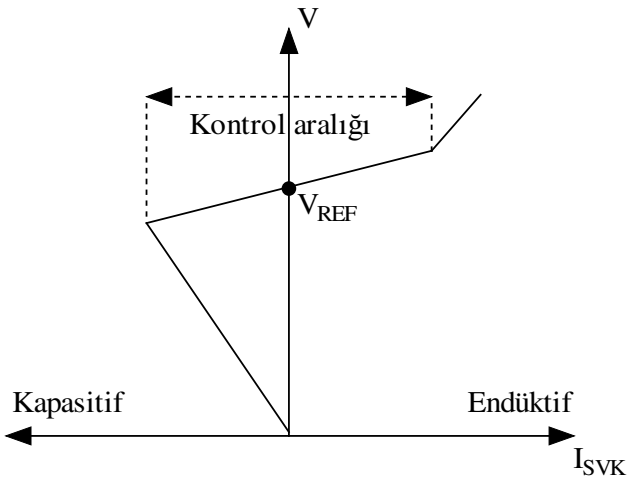


Şekil 2.9: SVK eklendikten sonraki güç sistemi modeli [14]

SVK bir alçaltıcı transformatör üzerinden sistem üzerinde gerilimi kontrol edilmek istenen baralara paralel olarak bağlanır. Yapısal olarak sabit değerli bir kondansatör (sabit kapasitör) ve kondansatöre paralel bir endüktanstan meydana gelir. Endüktans değeri sabit değildir ve Şekil 2.9'da görülen tristörlerin ateşleme açılarına bağlıdır. Ateşleme açıları bir PI kontrolör ile kontrol edilir. PI kontrolör hata değeri olarak baranın referans gerilim değeri ile o anki gerilim değeri arasındaki farkı kullanır. Tristör ateşleme açılarını kontrol eden PI kontrolör dolayısıyla endüktans değerini ve de SVK'nün süseptans değerini kontrol etmiş olur.

Şekil 2.10'da statik var kompanzatörünün kontrol karakteristiğine ilişkin akım-gerilim grafiği verilmiştir. Bara gerilimi referans değerin altına düştüğü durumlarda SVK kapasitif bir yük gibi davranarak gerilim seviyesini yükseltecektir. Gerilim

değerinin referans değeri geçtiği durumlarda ise tristörlerin ateşleme açılarının kontrolü ile SVK daha fazla endüktif yapıda bir yük gibi davranarak, gerilim seviyesini referans değerine indirecektir. Süseptans ve süseptansa bağlı olarak SVK'nün akım kontrolü Şekil 2.10'da gösterilen grafikteki sınırlar içerisinde gerçekleştirilir. Kontrol aralığını, grafiğin düşey eksenini kesen doğrunun eğimi belirler. Eğimin fazla olması kontrol aralığının dar olmasına sebep olacaktır. Kontrol aralığının dışında, yani çok yüksek veya düşük gerilimlerde SVK değeri belli kapasitif veya endüktif yük gibi davranacaktır [14].



Şekil 2.10: SVK kontrol karakteristiği

3. BULANIK MANTIK

Bulanık mantık, klasik mantığın kesin yargılarının aksine günlük yaşama ait belirsizlik ifade eden dilsel değişkenleri kullanmaya dayalı bir kavramdır [15].

Bulanık mantık insanın düşünüş tarzına benzer bir yapıya sahiptir. Kesin matematiksel ifadelerle tanımlanması zor veya tanımlanamayan sistemlerin modellenmesinde kolaylıklar sağlar. Uygulamalarında matematiksel modellere ihtiyaç duyulmadığı için kullanımı basittir bu sebeple ev aletleri, otomotiv sistemleri, çevresel kontrol gibi birçok alanda bulanık mantıktan yararlanılmaktadır. Ancak kullanımı için mutlaka uygulama konusu hakkında uzman görüşlerine ihtiyaç vardır.

Bu bölümde, bulanık mantık kavramına ilişkin temel kavramlar açıklandıktan sonra, bulanık mantık teorisinden yola çıkılarak tasarlanan kontrolörün yapısı incelenecektir.

3.1 Bulanık Kümeler

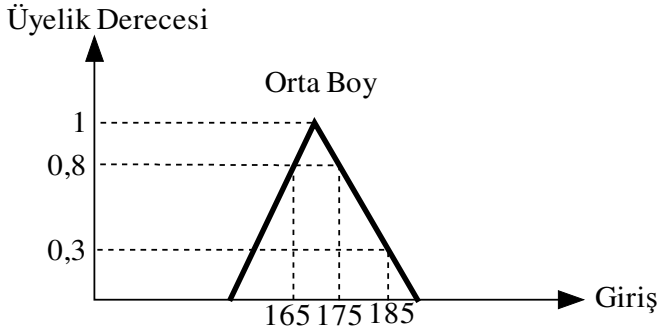
Klasik kümeler teorisine göre bir eleman herhangi bir kümeye ya aittir ya da ait değildir. Başka bir deyişle kümeye ait elemanların üyelik dereceleri 1 iken, kümeye ait olmayan elemanların üyelik dereceleri 0'dır. Kümenin elemanları, kümeye [0,1] aralığında değişen üyelik dereceleri ile bağlıysa o kümeye bulanık küme denir [16]. Örneğin, boy kavramını ele alarak "Uzun Boy", "Orta Boy" ve "Kısa Boy" şeklinde 3 bulanık küme olduğunu varsayalım. Cihan 175 cm, Aslı 165cm, Fatih 185 cm boyunda 3 küme elemanı olsun. Bu durumda Cihan, Aslı ve Fatih sırasıyla 0,35, 0,6 ve 0 üyelik dereceleriyle "Kısa Boy" bulanık kümesinin birer elemanı olabilir. Bulanık küme teorisinin bir diğer özelliğine göre de bir eleman farklı üyelik dereceleriyle farklı kümelere ait olabilir. Yani Cihan 0,8 üyelik derecesiyle "Orta Boy" ve 0,5 üyelik derecesiyle "Uzun Boy" bulanık kümesinin de bir elemanı olabilir.

3.1.1 Dilsel Değişkenler

Bulanık kümeler günlük yaşamda kullandığımız, belirsizlik içeren dilsel değişkenler ile ifade edilirler. Bölüm başında verilen örnekteki gibi dilsel değer olarak boy ele alınırsa, "Uzun Boy", "Orta Boy" ve "Kısa Boy" birer dilsel değişkendir.

3.1.2 Üyelik Fonksiyonları

Üyelik fonksiyonu, bir kümenin elemanlarının o kümeye hangi üyelik dereceleri ile ait olduklarını belirleyen fonksiyondur. Her bir eleman için üyelik fonksiyonu çıkışı [0,1] aralığındadır [17]. Bir önceki örneği ele alarak, "Orta Boy" kümesine ilişkin üyelik fonksiyonu ve küme elemanlarının üyelik değerleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: "Orta Boy" kümesine ait üyelik fonksiyonu

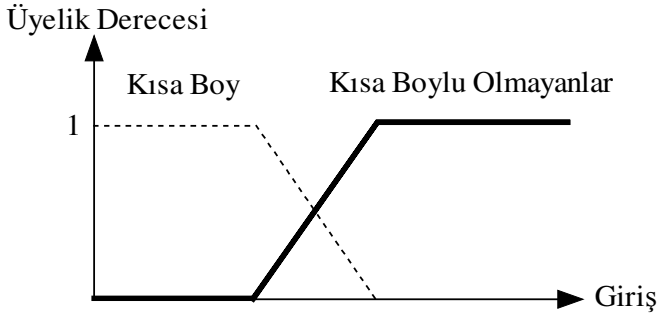
"Orta Boy" bulanık kümesine ait üyelik fonksiyonuyla her eleman için hesaplanan üyelik değerleri $\mu_{ortaboy}$ (165) = 0,8 , $\mu_{ortaboy}$ (175) = 0,8 ve $\mu_{ortaboy}$ (185) = 0,3 şeklinde ifade edilir.

Şekil 3.1'de orta boylular kümesi için üçgen bir üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Üyelik sınırları olan [0,1] aralığını aşmamak şartıyla, üçgen yatay eksende kaydırılarak ve 2 ucu birbirine yaklaştırılıp uzaklaştırılarak istenen amaca uygun üyelik fonksiyonları elde edilebilir. Üçgen dışında, sinüzoidal, trapezoidal, Gauss çanı gibi farklı tip üyelik fonksiyonları da kullanılabilir [17].

3.1.3 Bulanık Küme İşlemleri

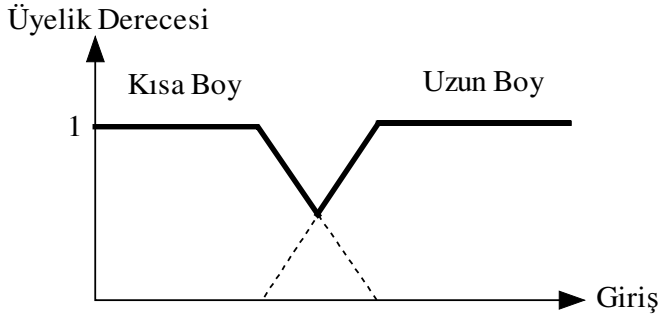
Klasik küme teorisinde kullanılan küme işlemleri, bulanık kümelere de uygulanabilir. Daha anlaşılır olması açısından işlemler "Uzun Boy" ve "Kısa Boy" bulanık kümeleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

a) Tümleme: "Kısa Boy" kümesine tümleme işlemi uygulanırsa elde edilen yeni kümeye ait (Kısa boylu olmayanlar kümesi) elemanların üyelik değerleri $\mu_{kısaboyluolmayanlar} = 1-\mu_{kısaboy}$ şeklinde hesaplanır [18] ve yeni kümeye ait üyelik fonksiyonu Şekil 3.2'deki gibidir.



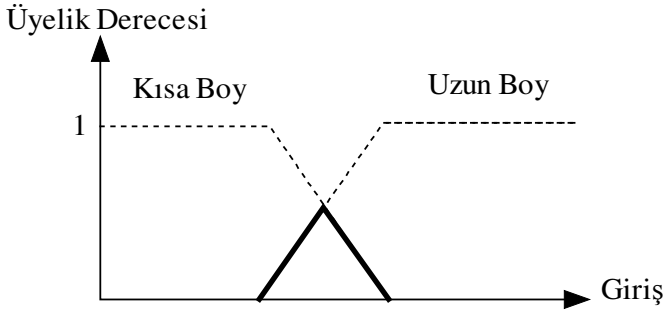
Şekil 3.2: "Kısa Boy" kümesi ve tümleyeni

b) Birleşim: "Kısa Boy" ve "Uzun Boy" kümelerine birleşim işlemi uygulanırsa yeni kümeye ait üyelik fonksiyonu Şekil 3.3'deki gibidir. Küme elemanların üyelik değerleri $\mu_{kısaboy \cup uzunboy} = \max(\mu_{kısaboy}, \mu_{uzunboy})$ olarak hesaplanır [18].



Şekil 3.3: "Kısa Boy" ve "Uzun Boy" kümelerinin birleşimi

c) Kesişim: "Kısa Boy" ve "Uzun Boy" kümelerine kesişim işlemi uygulanırsa yeni kümeye ait üyelik fonksiyonu Şekil 3.4'deki gibidir. Küme elemanların üyelik değerleri $\mu_{kısaboy \cap uzunboy} = \min(\mu_{kısaboy}, \mu_{uzunboy})$ olarak hesaplanır [18].

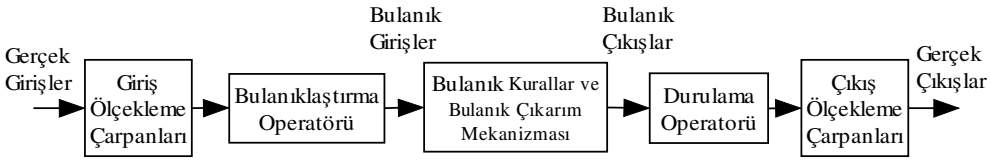


Şekil 3.4: "Kısa Boy" ve "Uzun Boy" kümelerinin kesişimi

3.2 Bulanık Kontrol

3.2.1 Bulanık Kontrolör Yapısı

Şekil 3.5'de bulanık kontrolörün temel yapısı verilmiştir. Kontrolör girişine gelen veriler, bulanık kümelere ait tanım bölgelerinin aralıklarına yerleşecek şekilde ölçeklendirilirler. Ölçeklenmiş gerçek veriler, bulanıklaştırma operatörüyle bulanık değerlere dönüştürülürler. Genelde EĞER - O HALDE yapısındaki kurallar ile oluşturulan kural tabanı ve bulanık çıkarım mekanizması ile bulanık çıkış değerleri elde edilir. Bulanık çıkış değerleri durulaştırma operatörüyle reel değerlere çevrildikten sonra, çıkış değerlerini gerçek sistemlere uygulayabilmek için uygun ölçekleme çarpanlarıyla çarpılır [19].



Şekil 3.5: Bulanık kontrolörün iç yapısı

3.2.2 Bulanıklaştırma Operatörü

Bulanıklaştırma operatörü, gerçek hayata ilişkin kesin giriş değerlerini, bulanık kümelerin elemanlarına dönüştürür. Her bir bulanık kümeye ait üyelik fonksiyonları, giriş değişkenlerini üyelik dereceleriyle beraber bulanık kümelere eşler. Örnek olarak

65 kg giriş değeri 0,6 üyelik derecesiyle "ağır" ve 0,4 üyelik derecesiyle "çok ağır" bulanık kümelerine eklenir.

3.2.3 Bulanık Koşullu İfadeler ve Bulanık Kontrol Kuralları

Bulanık kontrolör yapısındaki karar mekanizması genelde koşul-sonuç ilişkisine dayanır. Bu ilişki temelinde oluşturulan kuralların temel yapısı şu şekildedir:

EĞER (koşul), O HALDE (sonuç). **(3.4)**

Bu yapının koşul ve sonuçları dilsel değişkenlerle birleştirilirse bulanık koşullu ifadeler olarak adlandırılır. Bir bulanık kontrol kuralı, bir bulanık koşullu ifadedir.

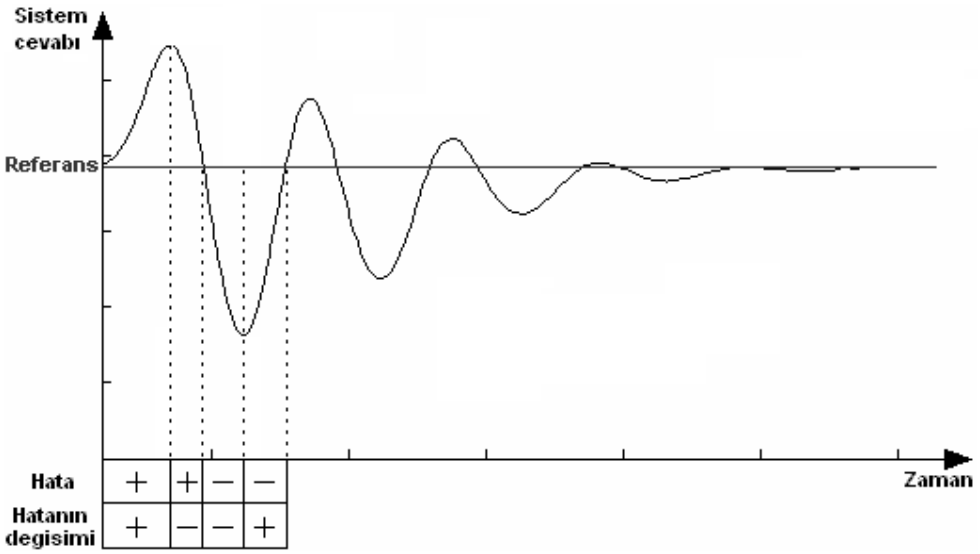
(3.4)'de verilen kural yapısı, tekli giriş-tekli çıkış olarak tasarlanan bir bulanık kontrolör için uygundur. Ancak giriş ve/veya çıkış sayısının çoklu olduğu durumlar için kural yapısı "Ve", "Veya" ,"Değil" gibi cümle birleştirme işlemcileri ile beraber kullanılır. (3.5)'de 2 giriş-tek çıkışlı bulanık kontrolöre uygun kural yapısı verilmiştir.

EĞER (koşul1) (birleştirme işlemcisi) (koşul2) O HALDE (sonuç). **(3.5)**

Birleştirme işlemcilerinin, küme işlemlerindeki eşdeğerlerine benzer işlevleri vardır. "Ve" işlemcisi sonuç olarak, birinci ve ikinci koşula ait üyelik değerlerinin en küçüğü veya çarpımı verir. "Veya" işlemcisi ise her iki koşula ait üyelik değerlerinin en büyüğünü veya toplamlarının çarpımlarından farkını sonuç olarak verir. "Değil" işlemcisi, bağlı olduğu koşulun üyelik değerinin 1'den farkını verir.

Örnek olarak birim basamak cevabı Şekil 3.6'daki gibi bir sistemi ele alalım. Sistem cevabı incelendiğinde bir salınım hata ve hatanın değişimi cinsinden farklı bölgelere ayrılabilir.

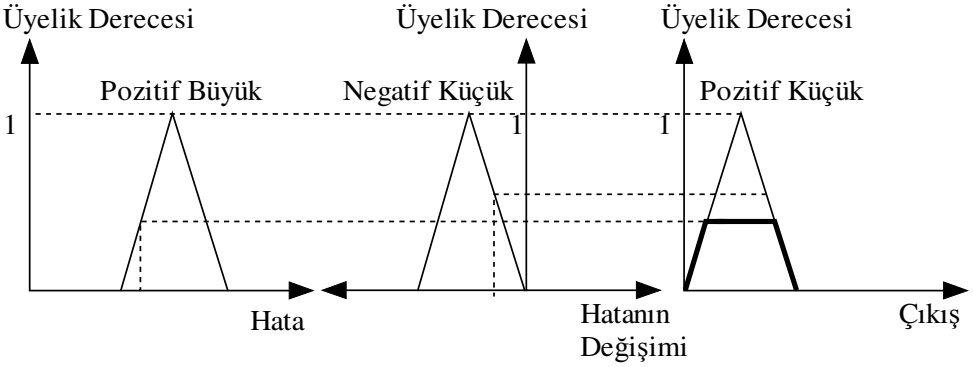
Sisteme uygun bir kural tabanı oluşturmak için "Pozitif Büyük (PB)", "Pozitif Küçük (PK)", "Negatif Büyük (NB)", "Negatif Küçük (NK)" ve "Sıfır (S)" olarak 5 dilsel değişken atayalım.



Şekil 3.6: Herhangi bir sistemin cevabı

İkinci bölgenin başlarında, sistem cevabı referanstan oldukça fazla ve hatanın değişimi de negatif yönde ancak yavaş bir şekilde ise kural tablosunu hazırlayan uzman görüşüne göre kontrolör çıkışı "Pozitif Küçük (PK)" olarak seçilirse, bu duruma ilişkin kural aşağıdaki gibi yazılabilir. Kurala ilişkin bulanıklaştırma, karar verme ve bulanık çıkış oluşturma evreleri Şekil 3.7'deki gibidir.

EĞER "Hata PB" VE "Hatanın Değişimi NK" ise "Çıkış PK"dür. **(3.5)**

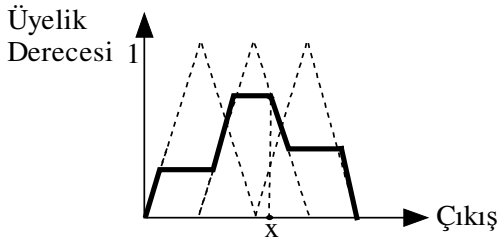


Şekil 3.7: Örnek kuralın işleyişi

3.2.4 Durulaştırma Operatörü

Kural tabanı ve bulanık çıkarım mekanizmasıyla elde edilen bulanık çıkış değerlerinin kullanılabilmesi için gerçek değerlere dönüştürülmeleri gerekir. Bu

işlem için durulaştırma operatörleri kullanılır. Durulaştırma için en büyük üyelik veya ortalama en büyük üyelik yöntemi gibi seçenekler olsa da genellikle, çıkış üyelik fonksiyonlarının sınırladığı alanın ağırlık merkezinin bulunmasını temel alan ve Şekil 3.8'de gösterilen ağırlık merkezi yöntemi kullanılır [20].



Şekil 3.8: Ağırlık merkezi yöntemiyle durulaştırma

3.2.5 Ölçekleme Çarpanları

Bulanık kümeler için üyelik fonksiyonları oluşturulurken eğer normalize edilmiş tanım bölgeleri kullanılmışsa bulanıklaştırma operatörünün girişine ve durulaştırma operatörlerinin çıkışına ölçekleme çarpanları yerleştirilmelidir. Tasarımda ölçekleme çarpanlarının önemi oldukça fazladır. Tasarlanan bulanık kontrolörün daha verimli çalışmasını sağlamak için ölçekleme çarpanları optimize edilebilir. Bu çalışmada optimizasyon işlemi için genetik algoritmadan faydalanılmıştır.

4. GENETİK ALGORİTMA

Genetik algoritmalar, Darwin'in evrim kuramını örnek alan bir arama yöntemi olarak tanımlanabilir. Doğanın zorlayıcı koşullarına uyum sağlayabilen bireylerin yaşamlarını sürdürmesi ve yaşayan bireyler arasında seçilenlerin çiftleşerek yeni bireyler meydana getirmeleri genetik algoritmanın temelini oluşturur [21].

Diğer geleneksel yöntemlerden farklı olarak, genetik algoritmalarda parametrelerin kendileri yerine kodlanmış biçimleri kullanılır. İncelenen problemin çözümü, çözüm uzayının tek noktası yerine birçok noktasında eş zamanlı olarak aranır. Diğer yöntemlerde amaç fonksiyonlarının türevleri üzerine bir ilerleme söz konusuyken, genetik algoritmalarda doğrudan amaç (uygunluk) fonksiyonları kullanılır. Genetik algoritma rastlantısal işlemciler kullandığından geleneksel yöntemlerden farklı olarak her çalıştığında farklı çözümler elde eder [22].

Geleneksel arama yöntemlerini kullanmak için probleme ilişkin amaç fonksiyonunun sürekli olması ve türevinin varlığı gereklidir. Genetik algoritma, bu şartları sağlamayan amaç fonksiyonlarına dayalı problemlerin çözümü için de kullanılabilir. Diğer yöntemlerin tek noktadan çözüm aramaya başlayarak yerel en iyi sonuçlara takılması sorunu, çözüm uzayının birçok noktasından aramaya başlayan ve mutasyon operatörü kullanan genetik algoritma ile ortadan kalkar.

Genetik algoritmalar, uygunluk fonksiyonuna dayalı optimizasyon dışında makine öğretisi ve genetik programlamanın iyileştirilmesi amacıyla da kullanılır. Sanayide ise genetik algoritmalar ar-ge, proje planlama, finans [23] ve mühendisliğin [24] birçok dalında kullanılmaktadır.

Bu bölümde, öncelikle genetik algoritmaya ilişkin temel kavramlar açıklanacak, ardından genetik algoritmanın nasıl çalıştığı ve yapısında kullanılan operatörler incelenecektir. Bölümün sonunda, çalışmada kullanılan bulanık kontrolörün katsayı optimizasyonu için tasarlanan genetik algoritmaya ilişkin bilgiler verilecektir.

4.1 Temel Kavramlar

Bundan sonraki bölümlerde kullanılan, genetik algoritmaya ait temel kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Kromozom: İncelenen problemin aday çözümü olan her bir bireydir. Popülasyon içindeki her birey birer kromozomdur.

Gen: Kromozomun üzerinde bulunan ve tek başına anlamlı bilgi taşıyan en küçük birimdir.

Lokus: Kromozomlar üzerinde genlerin bulunduğu yere verilen isimdir.

Popülasyon: Bireylerin oluşturduğu topluluktur. İncelenen problemin alternatif çözüm kümesini oluşturur. Kesin kural olmamakla birlikte genelde popülasyon sayısı sabit tutulur.

Seçim: Popülasyon içinde hangi bireylerin çaprazlamaya gireceği ve mutasyona uğrayacağının belirlenmesidir.

Çaprazlama: Popülasyon içinden seçilen kromozomlar arası gen değiş tokuşudur.

Rekombinasyon: Çaprazlama ile anne-babadan farklı gen kombinasyonlarına sahip yeni çocukların oluşmasıdır.

Mutasyon: Bireylerin genlerinde meydana gelen rastlantısal değişikliklerdir.

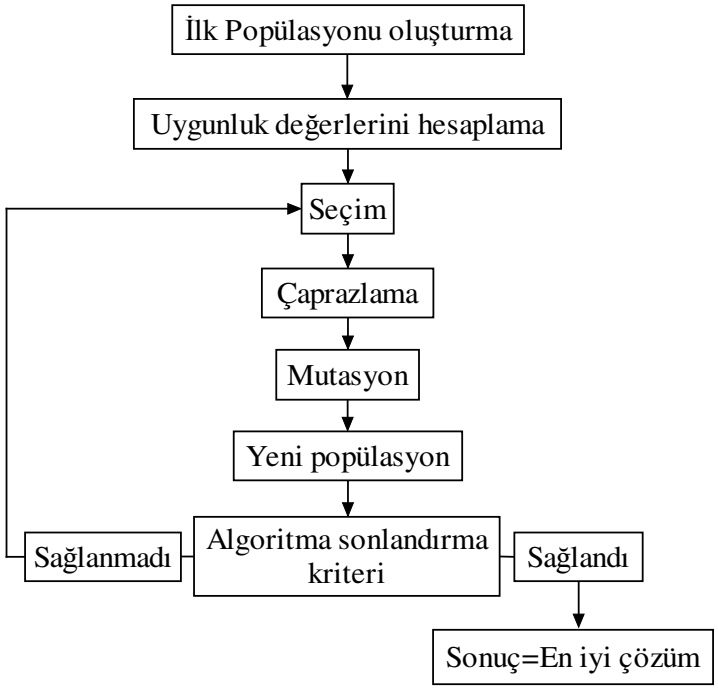
Uygunluk fonksiyonu: Popülasyon içindeki bireylerin problemi çözme performansını değerlendirmekte kullanılan fonksiyondur. Uygunluk fonksiyonu, bireyin uygunluk değerini verir.

Elitizm: İyilik değerleri yüksek olan bireylerin doğrudan bir sonraki jenerasyonda da yer almasıdır.

4.2 Genetik Algoritmanın Çalışma Şekli

Genetik algoritmaların genel olarak nasıl çalıştıkları Şekil 4.1 ‘de gösterilmiştir. İlk popülasyon oluşturulup uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra algoritma bir

döngüye girer. Döngü içerisinde ilk olarak, genellikle uygunluk değerine bağlı bir seçim yöntemiyle çaprazlamaya girecek bireyler belirlenir [22]. Kodlama yöntemiyle uyumlu bir çaprazlama operatörü ile yeni bireyler elde edilir ve yine uyumlu bir mutasyon operatörüyle bireylerin genlerinde rastlantısal değişiklikler meydana gelir. Problemin yapısına göre yeni oluşan bireylerin tamamı ya da bir kısmı popülasyona katılırken eski bireylerin bir kısmı da popülasyondan çıkartılır. Yeni popülasyonun her bir bireyi için uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra döngünün sonuna gelinir. İstenen uygunluk değerine ulaşılmışsa veya belirlenen döngü sayısına erişilmişse döngü sonlanır ve en yüksek uygunluk değerine sahip birey problemin çözümü olur. Aksi halde döngüyü sonlandıracak şartlardan biri sağlanana kadar algoritma en iyi çözümü aramaya devam eder.



Şekil 4.1: Genetik algoritmaların genel çalışma yapısı

4.3 Genetik Algoritma Bileşenleri

Karşılaşılan problemlerin çeşitliliği, çözüm aramada kullanılan algoritmaların da çeşitliliğine neden olur. Her tip problem çözümü için farklı bir bileşen diğerlerine göre daha verimlidir. Bu bölümde genetik algoritmalarda kullanılan temel kodlama, seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemcileri tanıtılmıştır.

4.3.1 Kodlama Yöntemleri

Genetik algoritmalar, problemin olası çözümü olan bireyleri kodlayarak gen ve kromozomdan oluşan yapılara dönüştürürler. İncelenen probleme bağlı olarak farklı kodlama yöntemleri kullanılır [25].

a) İkili kodlama yöntemi: Bu sistemde kromozom ikili düzendeki sayılar dizisiyle ifade edilir. Her gen 0 ya da 1 değerini alır. Örnek olarak A kromozomu A:001101 şeklindedir. Kromozomlar bir sayıyı ifade edebileceği gibi, problemde kullanılan ve kullanılmayan elemanları 0 ve 1 ile belirten bir yapıyı da ifade edebilir. İkili kodlamayla çok çeşitli bireyler oluşturulabilir. Ancak bazı problemlerde çaprazlama ve mutasyon aşamalarından sonra düzeltme yapmak gerekebilir. Parametre optimizasyonu, boyutları belli nesnelerin yine boyutları belli bir uzaya en çok sayıda yerleştirilmesi problemi için uygun bir kodlama sistemidir.

b) Permütasyon kodlama yöntemi: İkili kodlama sisteminden farklı olarak kromozomlar 0 ve 1'den farklı doğal sayı değerlerini de alabilirler. Her bir kromozom belli bir sıradaki değeri tanımlayan sayı dizilerinden oluşur. Örnek olarak A kromozomu A:524163 şeklindedir. Bu kodlama sistemi sadece iş sıralaması ve seyyar satıcı problemleri için idealdir. Örnek A kromozomu, satıcının sırasıyla 5,2,4,1,6 ve son olarak da 3 numaralı bölgeye gideceğini ifade eder.

c) Reel kodlama yöntemi: Karmaşık değerleri içeren problemlerde ikili kodlama sistemi yetersiz kalabilir. B durumda reel kodlama sistemiyle kromozomlarda reel sayılar veya alfabetik karakterler kullanılır. Örnek olarak A ve B kromozomları A:19,8 0,13 0,2 ve B:FAASTLİIH şeklindedir. Bu kodlama sistemi verimli olmasına rağmen kullanımı diğer kodlamalardan farklı uygun çaprazlama ve mutasyon operatörleri geliştirilmelidir. Reel kodlama sistemi örnek olarak bir PID kontrolörün en iyi katsayılarının aranması için kullanılabilir.

d) Ağaç kodlama yöntemi: Bu kodlama, genetik programlamada kullanılan programların ve ifadelerin geliştirilmesinde kullanılır. Kodlamada her bir kromozom programlama dilinde kullanılan fonksiyonlar ve komutlar gibi düşünülebilir. Örnek olarak A kromozumu A:(if down go f5) şeklindedir. Çaprazlama ve mutasyon anında ağaç yapıdaki program bölümleri rahatça bölünebilir. Ağaç yapıdaki kodlama, programlamanın değiştirilebilmesi probleminde oldukça verimlidir.

4.3.2 Seçim Operatörleri

Bireyler genellikle uygunluk değerlerine bağlı olarak farklı yöntemlerle çaprazlama için seçilebilirler. Seçim operatörü, doğal seleksiyonun bir taklididir [25].

a) Rulet çarkı yöntemi: Rulet çarkında, bireyler uygunluk değerleri oranında rulet çarkının üzerinden pay alırlar. Uygunluk değeri yüksek bireyler o oranda geniş bölgeye sahip olarak seçilme şanslarını artırırılar. Bu yöntem bireyler arasındaki uygunluk değerinin fazla olduğu durumlarda sorun çıkarabilir. Yüksek uygunluk değerine sahip bireyler daha sık seçilerek algoritmanın yerel optimuma takılması söz konusudur. Bu durumun önüne geçmek için turnuva veya sıralama yöntemi kullanılır.

b) Turnuva yöntemi: Bu yöntemde turnuva büyüklüğü kadar birey rasgele seçilerek turnuva grubuna girer. Grup içinde en yüksek uygunluk değerine sahip birey çaprazlama için seçilmiş olur. Turnuva büyüklüğü genelde 2 seçilir.

c) Sıralama yöntemi: Sırlama yönteminde bireyler uygunluk değerleriyle ters orantılı olarak sıralanır. En kötü iyelik derecesine sahip birey 1. sıraya, en iyi iyelik derecesine sahip birey son sıraya sahip olur. Seçilme olasılığı 1. sıradan sonra sıraya doğru azaltılarak kötü bireylere avantaj sağlanır ancak bu yöntem çözümün yakınsayacağı jenerasyon sayısını artırabilir.

4.3.3 Çaprazlama Operatörleri

Çaprazlama, seçilen bireylerin çiftleşerek popülasyona yeni olası problem çözümleri katması bakımında oldukça önemlidir. Problem türü doğrultusunda, seçilen farklı kodlama sistemleriyle uyumlu olacak çaprazlama operatörleri geliştirilmiş. Öncelikle ikili kodlama sisteminde kullanılan çaprazlama operatörleri ardından reel kodlamada kullanılan operatörlerden bahsedilecektir [26].

İkili kodlamada çaprazlama

İkili kod çaprazlama yöntemlerinin açıklanmasında kolaylık sağlaması açısından örnek A ve B kromozomları A:10010010010 ve B:11000110101 olarak seçilmiştir.

a) Tek noktalı çaprazlama: Çaprazlama için rasgele bir nokta belirlenir. Çaprazlamaya giren iki birey bu noktadan koparılır ve kopma noktasından sonraki genler yer değiştirilerek 2 yeni çocuk elde edilir. Rasgele seçilen noktanın 3 olduğu varsayılırsa çaprazlama sonrası oluşan aşağıdaki çocuklar oluşacaktır.

$Ç_1$: 100<u>00110101</u>

$Ç_2$: 110<u>10010010</u>

b) Çok noktalı çaprazlama: Çaprazlama için x adet rasgele nokta belirlenir. Çaprazlamaya giren bireylerin bu noktalar arasında kalan genleri yer değiştirilerek 2 yeni çocuk elde edilir. Bu yöntem çeşitliliği daha çok artırarak arama alanını genişletir ve başlangıçta en iyi çözüm gibi gözüken bir noktaya yakınsama olasılığını azaltır. Rasgele seçilen x=2 noktanın 3 ve 7 olduğu varsayılırsa çaprazlama sonrası aşağıdaki çocuklar oluşacaktır.

$Ç_1$: 100<u>00</u>110010

$Ç_2$: 110<u>10</u>010101

c) Düzgün çaprazlama: Bu çaprazlamada 0 ve 1 değerlerinin rasgele atanmasıyla oluşturulan birey uzunluğunda bir maskeler kullanılır. Maskeler çocukların hangi genlerinin hangi ebeveynlerden geleceğini tayin eder. Rasgele atanan maskeler birinci ve ikinci çocuk için sırasıyla 12121122122 ve 11211221212 ise çaprazlama sonrası aşağıdaki çocuklar oluşacaktır.

$Ç_1$: 11000010001

$Ç_2$: 10010110111

Reel kodlamada çaprazlama

Reel kodlama için kullanılan çaprazlama operatörlerinin çalışma şekillerini anlamak için örnek ebeveynler A:17-6-83: ve B: 2-13-80 olarak seçilmiştir.

a) Ayrık çaprazlama: İşlevsel olarak bakıldığında ayrık çaprazlama düzgün çaprazlamanın reel kodlama için tasarlanmış halidir. Düzgün çaprazlamayla arasındaki tek fark değiş tokuş edilen genlerin 0 ve 1 yerine reel sayılar olmasıdır.

Rasgele atanan maskeler 121 ve 112 olarak kabul edilirse oluşan çocuklar aşağıdaki gibidir.

$Ç_1$: 17-13-83

$Ç_2$: 17-6-80

b) Ara çaprazlama: Bu çaprazlama sayılsa işlem kullandığından sadece reel sayıların kullanılması durumdan kullanılır. A ve B ebeveynler olma üzere oluşan çocuklar Ç = A + α.(B-A) işlemiyle belirlenir. Kullanılan α katsayısı gen çeşitliliğini artırır. α katsayısı her gen için 0,25 ile 1,25 sınırlarında rasgele seçilir. Birinci çocuk için seçilen α değerleri 1-0,25-0,5 ve ikinci çocuk için seçilen α değerleri 0,3-0,2-0,8 ise oluşan çocuklar aşağıdaki gibidir.

$Ç_1$: 2-7,75-81,5

$Ç_2$: 12,5-7,4-80,6

c) Doğrusal çaprazlama: Doğrusal çaprazlamanın ara çaprazlamadan tek farkı her bir kromozom için gen sayısı kadar α değerleri yerine tek bir değerin atanmasıdır. Birinci çocuk için α değeri 0,4 ve ikinci çocuk için α değeri 0,9 ise çocuklar şu şekilde oluşur.

$Ç_1$: 11-8,8-81,8

$Ç_2$: 3,5-12,3-80,3

4.3.4 Mutasyon Operatörleri

Çaprazlama sonucu meydana gelen çocuklar mutasyon olasılığına bağlı olarak mutasyona uğrayabilirler. Mutasyon oranı genelde çok düşük seçilir ancak problemin cinsine göre de değişebilir. Mutasyon operatörü, algoritmanın olası bir yerel en iyi çözüme yakınsamasını engeller. Mutasyon oranının yüksek seçilmesi algoritmayı, arama uzayının dışına çıkartabilir veya algoritmanın çözüme hızlı yakınsamasını engelleyebilir.

İkili kodlama sisteminde mutasyon, mutasyona uğrayacak kromozom üzerinde rasgele seçilmiş bir bitin değeri 0 ise 1'e dönüşmesi, değeri 1 ise 0'a dönüşmesidir.

İkili kodlama sisteminde mutasyondan sonra oluşan yeni bireyin arama uzayının dışına çıkması gibi bir olasılığı vardır. Bu durumda kromozoma müdahale edilmesi gerekir.

Reel kodlamada ise incelenen probleme göre farklı operatörler geliştirilebilir. Eğer genleri reel sayıdan oluşan bir kromozom mutasyona girecekse, belli sınırlar içerisinde rastlantısal olarak elde edilen bir reel sayı gen değerine eklenerek mutasyona uğramış yeni birey elde edilir.

4.4 Genetik Algoritma İle Bulanık Kontrolör Katsayılarının Optimizasyonu

Genetik algoritmalarda incelenen problem ve kullanılan operatörler, kişiye özel diyet programları gibi düşünülebilir. Farklı bünyeye sahip her insan için farklı diyet programları oluşturulacağı gibi farklı problemlerin çözümleri içinde farklı operatörler daha avantajlıdır ancak kısa sürede çözüme ulaşmak için operatör seçiminde herhangi bir kural yoktur [27]. İncelenen problem en iyi kontrolör katsayılarını bulma problemidir. Problemin avantajı, aranacak katsayıların miktarının az oluşu ve sınır değerlerinin bilinmesidir. Problemin dezavantajı uygunluk fonksiyonu ile her bir birey için hesaplanacak uygunluk değerinin hesabınının zaman almasıdır. Bu bölümün devamında, problemin karakteri göz önüne alınarak nasıl bir genetik algoritma oluşturulduğu anlatılmıştır.

Kullanılan kontrol elemanlarının amacı senkron generatöre ilişkin gerilim, açısal hız ve buna bağlı olarak rotor açısının davranışını düzgünleştirmektir. Başka bir deyişle amaç, bozucu etkiye maruz kalan sistem dinamiklerinin cevabının mümkün olduğunca düşük genlikli salınımlara ve oturma zamanına sahip olmasıdır. Bu durumda uygunluk fonksiyonu J, gerilim hata ve açısal hız değişiminin ölçekli toplamının, benzetim süresi olan 0-10 saniye arasındaki integralinin çarpma işlemine göre tersi olarak (4.1)'deki gibi seçilmiştir.

$$J = \frac{1}{\int_0^{10} \left| \Delta\omega. + \frac{(V_{TR} - V_T)}{a} \right| dt} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Kromozom büyüklüğü aranacak katsayı miktarı kadar seçilmiştir. Yani kromozom yapısı her lokus içinde bir katsayı olacak şekildedir. İkili sistemde katsayıları kodlama algoritma için zaman kaybına neden olacağından reel sayılı kodlama sistemi kullanılmıştır. Bu durumda her gen bir katsayıya eşit olacaktır.

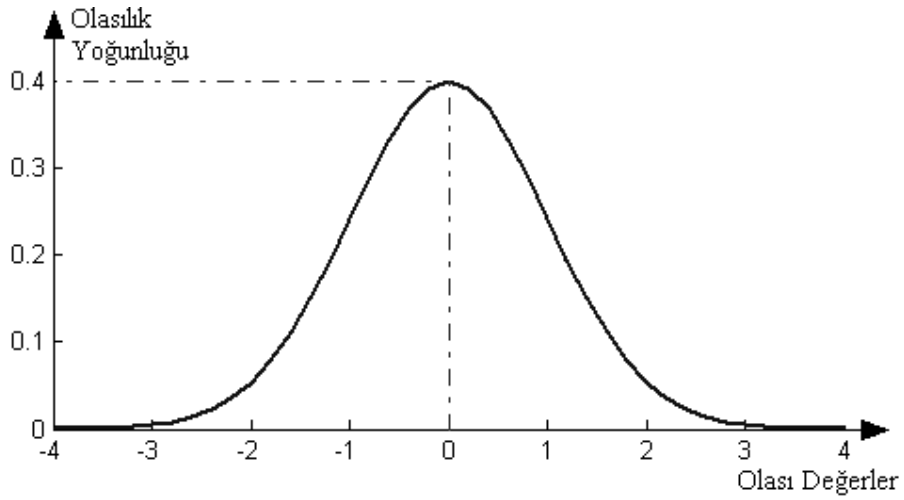
İlk popülasyonu oluşturan kromozomlar rastlantısal olarak atanmışlardır. Kontrolörde kullanılan katsayıların hangi aralıklarda değişebileceği yaklaşık olarak bilindiğinden rastlantısal atama bu bilinen sınırlar içinde gerçekleştirilmiştir.

Bireylerin uygunluk değerlerinin hesabı zaman aldığından popülasyon tipinin seçimi önemlidir. Bu duruma uygun olarak sürekli durum modeli seçilmiştir. Model yapısı elitizmi çok yüksek tutmaya dayalıdır. Her jenerasyonda sadece en kötü uygunluk değerine sahip birey popülasyondan ayrılır. Oluşan boşluk en iyi uygunluk değerine sahip çocuk ile doldurulur. Bu modelin avantajı her jenerasyonda hesaplanan uygunluk değeri miktarının oldukça az oluşu ve buna bağlı olarak her jenerasyon için bilgisayar işlemcisinin kullandığı zamanın kısalmasıdır. Yerel optimumlara takılmayı önlemek amacıyla popülasyon büyüklüğü küçük seçilmemiştir. Ancak popülasyonun çok büyük seçilmesi de algoritma üzerinde olumsuz etki yaratıp, sonuca çabuk ulaşılmasını engelleyecektir [28]. Bu nedenlerden popülasyon büyüklüğü 100 seçilmiş ve her jenerasyonda sabit tutulmuştur.

Seçilen popülasyon modeli gereği elitizm değeri çok yüksek tutulduğundan uygunluk değerleri yüksek bireylere avantaj sağlayan bir seçim operatörünün kullanımı, algoritmanın yerel bir optimum noktaya takılmasına sebep olabilir. Bu sebeple rulet çarkı yöntemi yerine turnuva yöntemi üzerine gidilmiştir. Turnuva büyüklüğünün yüksek seçilmesi yine yüksek uygunluk değerine sahip bireylere avantaj sağlayacağından turnuva büyüklüğü 2 olarak seçilmiştir. Jenerasyon sayısı arttıkça uygunluk değerleri birbirine yaklaşacağından, uygunluk değerine dayalı bir seçim operatörü yerine rasgele seçime dayalı bir operatör üzerine gidilmiştir. Jenerasyon sayısının 2/3'üne kadar turnuva yöntemiyle seçim gerçekleştirilirken geri kalan jenerasyonlarda çaprazlamaya girecek bireyler rastlantısal olarak belirlenmiştir.

Çaprazlama operatörü olarak basit yapılı ayrık çaprazlama yöntemi kullanılmıştır. Her jenerasyonda sadece 2 birey çaprazlama için kullanılarak 2 yeni çocuk

oluşturulur. Ayrık çaprazlama operatörünün kullanılmasından dolayı, 2 yeni çocuğun genleri ebeveynlerin genleriyle aynı ancak farklı kombinasyondadır. Gen çeşitliliğinde karşılaşılan bu sorunu çözmek için oluşan çocukların her geni için mutasyon operatörü kullanılmıştır. Mutasyon operatörü ile her gene eklenecek reel sayı değeri, mutasyonun uygulandığı genin alabileceği değer aralığının genişliği, normal (Gauss) dağılımla elde edilen katsayı ve jenerasyon sayısına bağlı bir katsayısının çarpımıyla elde edilir.



Şekil 4.2: Gauss dağılımına ait olasılık yoğunluğu fonksiyonu

Şekil 4.2 'de Gauss dağılımına ait olasılık fonksiyonu verilmiştir. Fonksiyona göre sıfır ve sıfıra yakın küçük sayıların seçilme olasılığı yüksektir. Buna göre mutasyon gen çeşitliğini sağlarken olası çözüm olan çocuğun genleri arasındaki bağıntıyı ve uygunluk değerini çok büyük oranda değiştirmeyecektir. Jenerasyonlar arttıkça popülasyondaki bireylerin uygunluk değerleri artacak ve birbirine yaklaşacaktır. Jenerasyona bağlı mutasyon katsayısı, jenerasyon sayısının artması ile beraber mutasyon etkisinin azaltılmasını sağlayacaktır. Mutasyon etkisi (4.2) numaralı eşitlikle gösterilmiştir.

$$\alpha = \frac{1 - \sqrt[4]{\frac{dongü}{jenerasyon}}}{2} \qquad \textbf{(4.2)}$$

Eşitliğe göre, döngü sayısı toplam jenerasyon sayısına yaklaştıkça mutasyon etkisi α da üstel olarak azalacak ve son jenerasyonda sıfıra eşit olacaktır.

Problemin çözümü mümkün olduğunca düzgün sistem cevabı elde etmek olduğundan, uygunluk değeri için bir üst sınır atanmamıştır. Bu durumda algoritmayı sonlandırmak için bir uygunluk değerinin yerine jenerasyon sayısı temel alınmıştır. Algoritmanın alıştığı durumlarda jenerasyon sayısı ile en iyi uygunluk değerinin değişimine bakıldığında jenerasyon sayısının 500 seçilmesi yeterlidir.

Her geni belli sınırlar içinde rasgele seçilen 100 kromozomdan oluşan popülasyonun uygunluk değerleri hesaplandıktan sonra jenerasyon sayısı kadar devam edecek olan döngü başlayacaktır. Öncelikle rasgele iki birey seçilip ayrık çaprazlamayla iki çocuk oluşturulacaktır. Gen aralığı, Gauss dağılımı ve jenerasyon sayısına bağlı mutasyona maruz kalan her iki yeni çocuğun uygunluk değerleri hesaplanıp, uygunluk değeri yüksek çocuk 100 bireyden oluşan popülasyonun en kötü uygunluk değerine sahip bireyiyle yer değiştirerek yeni popülasyonu oluşturacaktır. Bu döngü 500 defa devam ettikten sonra algoritma sonlanacak ve problemin çözümü en yüksek uygunluk değerine sahip birey olacaktır.

Bu çalışmada, bulanık güç sistemi kararlı kılıcısı ve diğer kontrol elemanlarının optimizasyonu için kullanılan genetik algoritma Matlab programında yazılmıştır ve Ek-C'de mevcuttur.

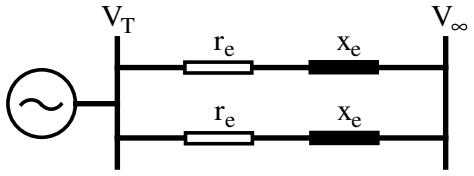
5. MODELLEME

Bu yüksek lisans çalışmasında, önceki bölümlerde bahsi geçen kontrol elemanlarının senkron generatörün geçici hal kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bölümde de, geçici hal kararlılık analizi için oluşturulan güç sistemi ve bileşenlerine ait modeller adım adım anlatılmaktadır.

5.1 Güç Sistemi Modeli

Oluşturulan güç sistemi modelinin sadeliği, kararlılık analizi ile sistem dinamiklerinin davranışlarının incelenebilmesi açısından kolaylık sağlayacaktır. Bu sebeple güç sistemlerinde kararlılık analizi yapılırken genelde senkron generatörün bir iletim hattı üzerinden sonsuz güçlü bir şebekeye bağlı olduğu sistem modeli tercih edilir.

Bu çalışmada oluşturulan güç sistemi modelinde, senkron generatör birbirine paralel iki eşdeğer iletim hattı üzerinden sonsuz güçlü şebekeye bağlıdır. Kullanılan güç sistemi modeli Şekil 5.1'de verilmiştir. İletim hattının bu şekilde modellenmesindeki amaç, hatlardan birinde oluşan üç faz-toprak kısa devresi sebebiyle, bir hattın belli bir süre devre dışı kalması ve bu süre içinde değişen bara gerilimleri ve eşdeğer hat empedansı sonucunda senkron generatör uç gerilimi ile rotor açı davranışlarının incelenmesidir.



Şekil 5.1: Tek makina-sonsuz bara güç sistemi modeli

5.2 Senkron Generatör Modeli

Ele alınan güç sisteminde, senkron generatörün dördüncü dereceden doğrusal olmayan matematiksel modeli kullanılmıştır. Senkron generatörün matematiksel modeli diferansiyel ve cebirsel eşitliklerden oluşmaktadır.

5.2.1 Diferansiyel Eşitlikler

Generatörün matematiksel modeline ait diferansiyel eşitlikler, salınım denklemleri, rotor sargısı eşitlikleri, uyarma sistemi eşitlikleri, türbin ve regülasyon sistemi eşitliklerinden oluşur. Senkron generatör rotasyonal bir sisteme sahip olduğundan salınım denklemleri (5.1) ve (5.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{(P_M - P_E - D.\Delta\omega)}{M} \qquad \textbf{(5.1)}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \qquad \textbf{(5.2)}$$

Eşitliklerden de görüleceği gibi, açısal hız 'ω' ve ona bağlı olarak rotor açısı 'δ' değerlerindeki değişim, mekanik, elektriksel ve sönüm momentlerine bağlıdır. Eşitliklerdeki M, senkron generatörün eylemsizlik sabitini, D ise sönüm katsayısını temsil eder.

Rotor sargısı eşitlikleri, senkron generatöre ilişkin EMK'nin geçici gerilim değerinin hesabı için kullanılır. Bu gerilimin d ve q eksenlerine ait bileşenleri olan E'_d ve E'_q, (5.3) ile (5.4) numaralı denklemlerle ifade edilebilir [9].

$$\frac{dE'_d}{dt} = \frac{I_q(x'_d - x_q) - E'_d}{T'_{q0}} \qquad \textbf{(5.3)}$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{I_d(x'_d - x_d) + E_{fd} - E'_q}{T'_{d0}} \qquad \textbf{(5.4)}$$

T'_{d0} ve T'_{q0} açık devre geçici hal zaman sabitinin d ve q eksenlerine ait bileşenleridir. E_{fd} uyarma gerilimini temsil eder. x_d ve x_q senkron reaktansın d ve q eksenlerine ait bileşenleri, x'_d ise geçici senkron reaktansın d eksenine ait bileşenidir.

Türbin ve hız regülatörü sistemi, ardı ardına sıralanmış hız rölesi, servomotor, ara ve ana ısıtıcı elemanlarından meydana gelir. Hız rölesinin girişi, senkron generatörün açısal hızındaki değişimdir. Hız rölesine ait eşitlik (5.5)'de verilmiştir.

$$\frac{d\Delta P_r}{dt} = \frac{K_G.\Delta\omega - \Delta P_r}{T_{SR}} \quad \textbf{(5.5)}$$

Açısal hız değişimi, hız rölesi kazancı K_G ve zaman sabiti T_{SR}'ye bağlı bir transfer fonksiyonundan geçerek servomotora giriş sinyali olarak verilir. Aynı şekilde servomotordan çıkan sinyal, ara ısıtıcı girişine ve ara ısıtıcının çıkışı da ısıtıcı girişine verilir. Son olarak ısıtıcı çıkışında, mekanik güç değişimi elde edilmiş olur. Bu değer, mekanik gücün sürekli hal değerine eklenerek o anki mekanik güç değeri elde edilir. Servomotor, ara ve ana ısıtıcıya ait eşitlikler sırasıyla (5.6), (5.7) ve (5.8)'de verilmiştir. T_{SM} ve T_{RH} sırasıyla servomotor ve ara ısıtıcı zaman sabitleri, K_{RH} ise ara ısıtıcı kazancını temsil eder. Türbin ve hız regülatörüne ait blok diyagram sistemin Simulink programında modellenmesinde verilecektir [9].

$$\frac{d\Delta P_h}{dt} = \frac{\Delta P_r - \Delta P_h}{T_{SM}} \quad \textbf{(5.6)}$$

$$\frac{d\Delta P_c}{dt} = \frac{\Delta P_h - \Delta P_c}{T_{CH}} \quad \textbf{(5.7)}$$

$$\frac{d\Delta P_M}{dt} = \frac{d\Delta P_c}{dt} - \frac{\Delta P_M}{T_{RH}K_{RH}} \quad \textbf{(5.8)}$$

5.2.2 Cebirsel Eşitlikler

Matematiksel modelin cebirsel eşitlikleri stator sargısı eşitlikleri, şebeke eşitlikleri ve elektriksel güç eşitliğinden oluşur. Stator sargısı eşitlikleri, senkron generatörün iç direnci ve reaktansı sonucu oluşan gerilim düşümünü hesaba katarak generator uç geriliminin d ve q eksenlerindeki bileşenleri olan V_{Td} ve V_{Tq}'yu verir. Stator sargısı eşitlikleri (5.9) ve (5.10)'de verilmiştir.

$$V_{Td} = E'_d - r_a I_d - x'_d I_q \quad \textbf{(5.9)}$$

$$V_{Tq} = E'_q - r_a I_q - x'_d I_d \quad \textbf{(5.10)}$$

Şebeke eşitlikleri, üretim barası ile sonsuz güçlü şebekeyi temsil eden bara arasındaki iletim hattı üzerinde meydana gelen gerilim düşümünü ifade ederler. Buna göre şebeke eşitlikleri (5.11) ve (5.12)'deki gibi yazılabilir. V_∞ sonsuz güçlü baranın gerilimini, r_e iletim hattının direncini, x_e ise iletim hattının reaktansını temsil eder.

$$V_{\mathrm{Td}} = -V_\infty \sin\delta + r_a \mathrm{I_d} + x_a \mathrm{I_q} \tag{5.11}$$

$$V_{\mathrm{Tq}} = V_\infty \cos\delta + r_a \mathrm{I_q} - x_a \mathrm{I_d} \tag{5.12}$$

Senkron generatöre ilişkin elektriksel güç P_E de (5.13) eşitliği ile elde edilir.

$$P_{\mathrm{E}} = E'_d \, \mathrm{I_d} + E'_q \, \mathrm{I_q} \tag{5.13}$$

5.2.3 Sürekli Hal Değerleri

Bu bölümde verilen eşitlikler ile, senkron generatörün bilgisayar benzetiminde kullanılacak sürekli hal değerleri hesaplanacaktır. Bazı sürekli hal değerlerinin hesaplanabilmesi için Şekil 5.2'deki fazör diyagram kullanılmıştır.

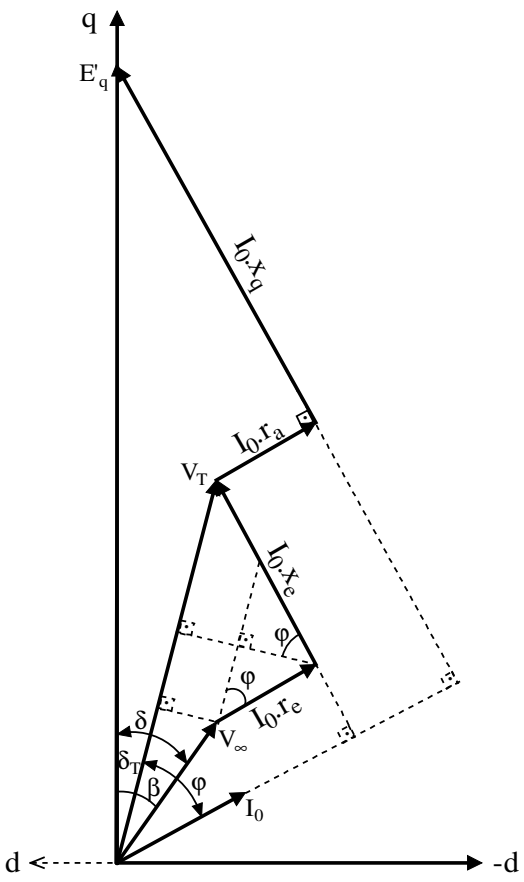
İletim hattı üzerinden sonsuz güçlü şebekeye akan akım I_0 ve yük açısı φ_0 sırasıyla (5.14) ve (5.15) eşitlikleriyle elde edilir.

$$I_0 = \frac{\sqrt{P_0^{\,2} + Q_0^{\,2}}}{V_0} \tag{5.14}$$

$$\varphi_0 = \arctan\frac{Q_0}{P_0} \tag{5.15}$$

Fazör diyagramdan, uç gerilimin başlangıç değeri V_{T0}, (5.16) ile hesaplanır.

$$V_{\mathrm{T0}} = \sqrt{V_\infty^{\,2} - (x_e I_0 \cos\varphi_0 + r_e I_0 \sin\varphi_0)^2} + I_0 (x_e \sin\varphi_0 + r_e \cos\varphi_0) \tag{5.16}$$



Şekil 5.2: Tek makina-sonsuz bara güç sistemine ait fazör diyagram

Güç açısı (rotor açısı) δ_0 , E'_q ile V_∞ gerilimleri arasındaki açıdır. Güç açısı δ_0'ı elde etmek için yine fazör diyagram yardımıyla δ_T ve β açıları hesaplanır.

$$\delta_T = \arctan \frac{x_q I_0 \cos\varphi_0 - r_a I_0 \sin\varphi_0}{V_{T0} + x_q I_0 \sin\varphi_0 + r_a I_0 \cos\varphi_0} \quad \textbf{(5.17)}$$

$$\beta = \arctan \frac{x_e I_0 \cos\varphi_0 - r_e I_0 \sin\varphi_0}{V_{T0} - x_e I_0 \sin\varphi_0 - r_e I_0 \cos\varphi_0} \quad \textbf{(5.18)}$$

$$\delta_0 = \delta_T + \beta \quad \textbf{(5.19)}$$

Senkron generatörden, şebekeye akan akımın d ve q bileşenleri artık hesaplanabilir.

$$I_{d0} = -I_0 \sin(\delta_T + \varphi_0) \quad \textbf{(5.20)}$$

$$I_{q0} = I_0 \cos(\delta_T + \varphi_0) \quad \textbf{(5.21)}$$

Ayrıca E'_{d0} ve E'_{q0} değerleri yine fazör diyagram yardımıyla elde edilir.

$$E'_{d0} = -V_{T0} \sin\delta_T + r_a I_{d0} + x'_d I_{q0} \quad \textbf{(5.22)}$$

$$E'_{q0} = V_{T0} \cos\delta_T + x'_d I_{d0} + r_a I_{q0} \quad \textbf{(5.23)}$$

Bu durumda elektriksel gücün sürekli hal değeri P_{E0} da (5.24) ile hesaplanır.

$$P_{E0} = E'_{d0} I_{d0} + E'_{q0} I_{q0} \quad \textbf{(5.24)}$$

Uyarma gerilimi E_{fd0} ve referans uç gerilimi V_{TR0} (5.25) ve (5.26) ile bulunur.

$$E_{fd0} = V_\infty \cos\delta_0 - (x_d + x_e) I_{d0} + (r_a + r_e) I_{q0} \quad \textbf{(5.25)}$$

$$V_{TR0} = V_{T0} + \frac{E_{fd0}}{K_A} \quad \textbf{(5.26)}$$

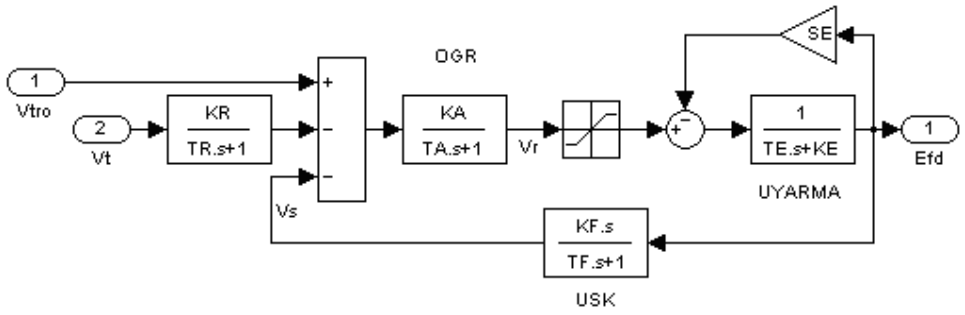
Senkron generatör matematiksel modeline ait eşitlikler, Laplace dönüşümü ile sonraki bölümlerde anlatılacak bilgisayar benzetiminde kullanılacak hale gelecektir. Eşitliklerde kullanılan, makinanın karakteristik değerleri Ek-A'da verilmiştir.

5.3 Kontrol Elemanlarının Modelleri

Sisteme uygulanacak bozucu etki sonuncunda, senkron generatörün rotor açısı ve uç geriliminin sürekli hal değerlerine hızlıca geri dönebilmesi için güç sistemi ve senkron generatöre bazı kontrol elemanları eklenmiştir. Bu bölümde, önceki bölümlerde anlatılan kontrol elemanlarının bilgisayar benzetiminde kullanılacak modelleri açıklanacaktır.

5.3.1 Otomatik Gerilim Regülatörü

Otomatik gerilim regülatörü, bozucu etki sonucu oluşan gerilim salınımlarını söndürerek, uç gerilim değerini mümkün olduğunca çabuk sürekli hal değerine geri getirmek amacıyla kullanılır. Şekil 5.3'de regülatör bloğunu içeren yeni uyarma sisteminin bilgisayar benzetiminde kullanılan blok diyagramı verilmiştir [29].



Şekil 5.3: IEEE Tip1 Uyarma Sistemi modeli [8]

Şekil 5.3'den de görüldüğü gibi uyarma sistemi girişine, referans uç gerilim ile uç gerilimi arasındaki salınımlı fark sinyali yerine, regülatör üzerinden geçen ve sınırlayıcılar ile belli sınırlar içinde kalan bir V_r sinyali verilir. Böylece bir bozucu etki altında, yüksek tepe değerine sahip bir uyarma gerilimi üretilmesi engellenir.

Otomatik gerilim regülatörüne giriş olarak referans uç gerilim ve anlık uç gerilim değerleri verilir. Ayrıca, modeli daha sonra açıklanacak olan güç sistemi kararlı kılıcısının çıkışı da regülatöre giriş olarak verilecektir.

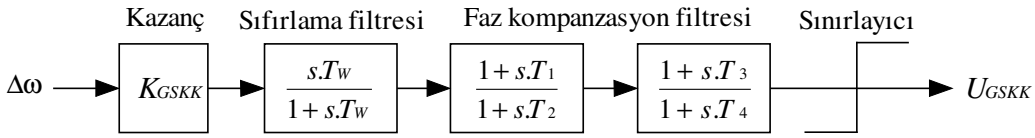
Regülatör yapısı tek bir zaman sabiti T_A ve pozitif kazanç K_A ile tanımlanmıştır. Modern yapıdaki regülatörlerde kazanç değeri yüksek tutulurken zaman sabiti düşüktür. Uyarma sistemi kazancı K_E ve zaman sabiti T_E ile gösterilmiştir. S_E uyarma geriliminin bir fonksiyonudur ve uyarma sisteminin doymasını temsil eder. Uyarma sisteminden alınan geri besleme sinyali uyarma sistemi kararlı kılıcısından geçirilerek sistem girişine verilir. Buradaki amaç uyarma sisteminin kararlı çalışma bölgesini genişletmektir. Bu sistem sekonder uçlarına yüksek bir empedans bağlı ideal bir transformatör gibi düşünülebilir ve transfer fonksiyonu bir zaman sabiti T_F ile kazanç K_F ile ifade edilir. Bu durumda zaman sabiti T_F, empedansın direncinin endüktansına oranıyla hesaplanır. Zaman sabitinin değeri de transformatör çevirme oranıyla çarpılarak kazanç K_F elde edilir [8]. Bilgisayar benzetiminde kullanılan uyarma sistemi ve regülator katsayıları Ek-A'da verilmiştir.

5.3.2 Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı

(5.1) ve (5.2) numaralı eşitliklere göre, sistemde oluşan herhangi bir arıza sonucu bozulan mekanik ve elektrik güç dengesi, açısal hızda değişime ve senkron

generatörün rotor açısında istenmeyen salınımlara yol açar. Güç sistemi kararlı kılıcısı da rotor açısında oluşan bu salınımları söndürerek senkron generatörün senkronizmadan çıkmamasını sağlar. Giriş olarak, açısal hız değişimi ile mekanik-elektriksel güç farkı kullanılabilir. Bu çalışmada açısal hız değişiminin tek başına giriş olarak kullanıldığı kararlı kılıcı modeli ele alınmıştır.. Kararlı kılıcının çıkışı ise otomatik gerilim regülatörü ve uyarma sistemine ek bir giriş olarak verilmiştir.

Kararlı kılıcının girişine gelen sinyal, kazanç ve çeşitli filtrelerden geçerek uyarma sistemi girişine verilir. Şekil 5.4'de, bu çalışmada kullanılan kararlı kılıcının yapısındaki parametreler, transfer fonksiyonlarının içinde gösterilmiştir.



Şekil 5.4: Geleneksel GSKK yapısı [11]

Geleneksel güç sistemi kararlı kılıcısına ait parametrelerin optimizasyonu genetik algoritma yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Kazanç değeri için alt ve üst sınırlar, 0.1 ile 50 olarak alınmıştır. T_1 ve T_3 zaman sabitleri için alt ve üst sınırlar, 0.2 ile 1.5 saniye iken T_2 ve T_4 için bu değerler 0.02 ile 0.15 saniye seçilmiştir [11]. Sıfırlama filtresi zaman sabiti T_w değeri 1 ile 20 saniye arasında değişir bu değer yeterince büyük olduğunda, hızın sürekli hal değişimi, generatör çıkış gerilimini etkileyemez. Ancak çok büyük T_w değerleri ada çalışma durumda, generatör uç gerilimde dalgalanmalar yaratır [12]. Bu çalışmada seçilen uygun T_w değeri 3'dür.

Genetik algoritmada kullanılan uygunluk fonksiyonu J, bozucu etki sonucu oluşan açısal hızdaki değişimin 0 ile bilgisayar benzetim süresi olan 10 saniye arasındaki integrali ile ters orantılı olarak hesaplanmıştır. Uygunluk fonksiyonu, (5.27) ile ifade edilebilir.

$$J = \frac{1}{\int_0^{10} |\Delta\omega| dt} \qquad \textbf{(5.27)}$$

Daha önce verilen (5.2) numaralı salınım denklemine göre, açısal hız değişiminin rotor açısına doğrudan etki ettiği açıktır. Açısal hız değişiminin belirtilen zaman aralığındaki integralinin azalması rotor açısındaki salınımlarını da azaltacaktır ayrıca uygunluk fonksiyonu J'yi de artıracaktır. Oluşturulan algoritma, iyileştirilmesi istenen kazanç ve zaman sabitlerine ait en iyi değerleri yukarıda belirtilen sınırlar içinde arayarak en yüksek uygunluk değerine sahip kombinasyonu elde edecektir. Optimizasyon sonucunda rotor açısındaki dalgalanmaları en yüksek performansla söndüren kararlı kılıcı parametreleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: GA ile elde edilen en uygun GSKK değerleri

Parametre	Değer
K_{GSKK}	21,6849
T_1 , T_3	0,2155
T_2 , T_4	0,0227

Geçici hal durumunda generatör uç gerilimindeki dalgalanmaları sınırlamak amacıyla kararlı kılıcının çıkışına da alt ve üst sınırları -0,1 ile 0,1 birim değer olan bir sınırlayıcı yerleştirilmiştir. Optimize edilmiş kararlı kılıcının kullanıldığı duruma ilişkin kararlılık analizine ait rotor açısı ve uç gerilim değerlerinin zamana göre değişimlerine ait grafikler, son bölümde verilmiştir.

5.3.3 Bulanık Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı

Bir önceki bölümde modellenen klasik yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısı bloğu, tasarlanacak bulanık kontrolör ile değiştirilecektir. Kontrolör, bozucu etkiden kaynaklanan mekanik ile elektriksel güç arasındaki fark ve buna bağlı olarak açısal hız değişimi sebebiyle uyarma sistemine bir gerilim işareti yollayacaktır. Bu işaret ile rotor açısı salınımlarını söndürerek, rotor açısının sürekli hal değerine geri dönmesi sağlanacaktır. Bu durumda, açısal hız değişimi sıfır olup mekanik-elektriksel güç dengesi tekrar sağlandığından, kontrolör bir çıkış işareti üretmeyecektir.

Bulanık kontrol bölümünde ikinci dereceden bir sistemin birim basamak cevabı üzerinde hata ve hatanın değişimi giriş değerleri olarak alınmış ve teorik olarak bulanık kontrolörün kural tabanın nasıl oluşturulabileceğine dair açıklamalar yapılmıştır.

Tasarlanan bulanık kararlı kılıcının girişlerine mekanik ve elektriksel güç farkı ΔP ve açısal hız değişimi Δω verilmiştir. Senkron generatöre ait (5.1) numaralı salınım eşitliğine tekrardan bakılacak olursa, mekanik ve elektriksel güç arasındaki fark ile açısal hız değişimi arasında türevsel bir bağıntı olduğu görülür. Bu doğrultuda Δω'yı hata ve ΔP'yi hatanın değişimi gibi kabul ederek, daha önceki bölümde anlatılan kural tabanı oluşturma işlemi gerçekleştirilebilir.

Kural tabanı oluşturulmadan önce hata ve hatanın değişimi için dilsel değişkenler atanacaktır. Bu dilsel değişkenler –1 ile 1 arasında simetrik olarak yerleştirilmiş, negatif büyük (NB), negatif küçük (NK), sıfır (S), pozitif küçük (PK) ve pozitif büyük (PB) olarak adlandırılmış 5 adet değişkendir. Tasarlanan çok girişli-tek çıkışlı kontrolörün 2 giriş ve 1 çıkışı vardır. Oluşturulan kurallarda sadece "ve" işlemi kullanılmıştır. Bu durumda kural tablosu en fazla 25 adet kuraldan oluşur [30].

Örnek olarak, açısal hızın referans değerden çok yüksek ve mekanik gücün elektriksel güçten çok büyük olduğu bir durumu ele alınırsa, bu durum, hatanın pozitif büyük ve hatanın değişiminin de pozitif büyük olması ile ifade edilir. Hata değerinin büyük olması ve hızla artması, yine büyük bir düzeltici sinyal ile mümkün olur. Bu durumda kontrolör çıkışı dilsel değişken olarak büyük olarak ifade edilir. İşaretin yönü ise pozitif olmalıdır. Çünkü uyarma sistemine uygulanan pozitif büyük işaret sayesinde elektriksel güç artırılarak, mekanik ile elektriksel güç dengesi sağlanacaktır. Yukarıda açıklanan bu durum için aşağıdaki kural uygun olacaktır:

Eğer Δω PB ve ΔP PB ise çıkış PB olur.

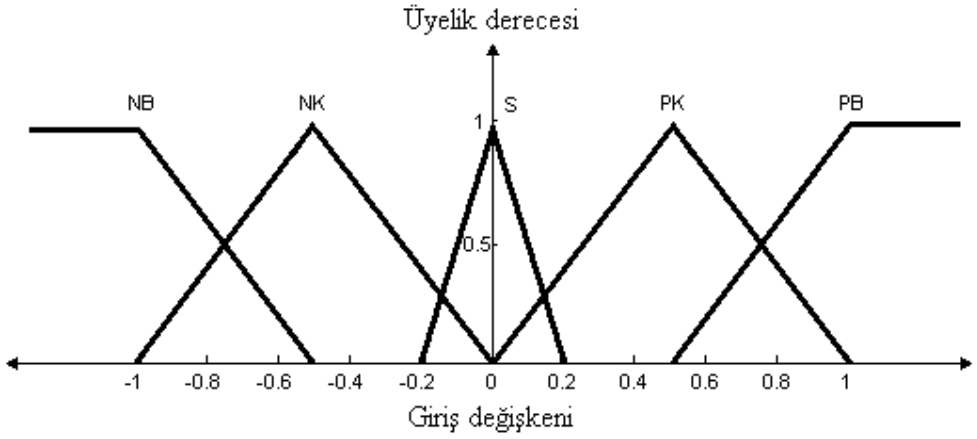
Benzer bir şekilde açısal hızın biraz düşük ve mekanik gücün elektriksel güçten biraz küçük olduğu bir durumda (Δω NK ve ΔP NK ise), çıkış değeri negatif küçük (NK) seçilerek, elektriksel güç bir miktar azaltılır ve açısal hız da bir miktar artırılabilir. Her durum incelendiğinde Tablo 5.2'deki gibi bir kural tablosu elde edilir.

Giriş verileri olan Δω ve ΔP için üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonları giriş değerinin, ilgili dilsel veriye göre üyelik derecesini gösterir. Bu sebeple fonksiyonun sıfır değerlerini ve en yüksek değerini veren noktaların konumu önem kazanır.

Tablo 5.2: BGSKK için oluşturulan kural tablosu [30]

Eğer Δω PB ve ΔP PB ise çıkış PB olur.	Eğer Δω S ve ΔP NK ise çıkış NK olur.
Eğer Δω PB ve ΔP PK ise çıkış PB olur.	Eğer Δω S ve ΔP NB ise çıkış NK olur.
Eğer Δω PB ve ΔP S ise çıkış PK olur.	Eğer Δω NK ve ΔP PB ise çıkış PK olur.
Eğer Δω PB ve ΔP NK ise çıkış PK olur.	Eğer Δω NK ve ΔP PK ise çıkış S olur.
Eğer Δω PB ve ΔP NB ise çıkış S olur.	Eğer Δω NK ve ΔP S ise çıkış NK olur.
Eğer Δω PK ve ΔP PB ise çıkış PB olur.	Eğer Δω NK ve ΔP NK ise çıkış NK olur.
Eğer Δω PK ve ΔP PK ise çıkış PK olur.	Eğer Δω NK ve ΔP NB ise çıkış NB olur.
Eğer Δω PK ve ΔP S ise çıkış PK olur.	Eğer Δω NB ve ΔP PB ise çıkış S olur.
Eğer Δω PK ve ΔP NK ise çıkış S olur.	Eğer Δω NB ve ΔP PK ise çıkış NK olur.
Eğer Δω PK ve ΔP NB ise çıkış NK olur.	Eğer Δω NB ve ΔP S ise çıkış NK olur.
Eğer Δω S ve ΔP PB ise çıkış PK olur.	Eğer Δω NB ve ΔP NK ise çıkış NB olur.
Eğer Δω S ve ΔP PK ise çıkış PK olur.	Eğer Δω NB ve ΔP NB ise çıkış NB olur.
Eğer Δω S ve ΔP S ise çıkış S olur.	

Şekil 5.5'de kontrolör girişleri için kullanılan üyelik fonksiyonlarına ait grafik gösterilmiştir. Görüldüğü gibi sıfır dilsel değişkenine ait üyelik fonksiyonları dışındaki fonksiyonlar daha geniş olarak yayılmışlardır. Böylece üyelik fonksiyonları iç içe girerek belirsizlik değişkenlerini ifade edebilirler. Sıfır (S) dilsel değişkenine ait fonksiyonu daha dar bir üçgenden oluşturulmasındaki amaç, oluşan ufak hız ve güç değişimlerinde Sıfır (S) dilsel değişkenine ait üyelik derecesini yüksek tutarak, seçilen kurallarla, ontrolörün yüksek bir çıkış sinyali üretmesini engellemektir.

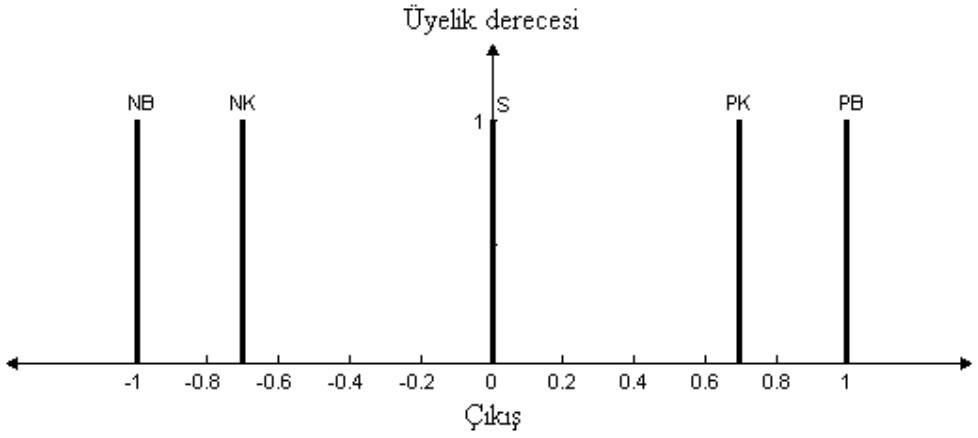


Şekil 5.5: Giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları

Bilgisayar benzetimi sonucunda, açısal hız değişiminin zaman göre integrali elde edilir ve bu değerin çarpmaya göre tersi genetik algoritma kullanılarak yapılan optimizasyonda ilgili kromozoma ait uygunluk değerini verir. Her jenerasyonda, yeni oluşan bireylerin uygunluk değerleri tekrardan hesaplanır, yani her yeni kromozom için benzetim tekrarlanır. Jenerasyon sayısı 300 ile 500 arasında değiştiğinden, artan benzetim sayısıyla beraber optimizasyon için gereken süre de oldukça artacaktır. Bu sorunun önüne geçmek için alınacak önlem, benzetim süresini kısaltmaktır. Bulanık kontrolörün durulaştırma işleminin hızını artırarak benzetim için harcanan sürensin oldukça kısaldığı görülmüştür. Durulaştırma işlemini hızlandırmak amacıyla çıkış üyelik fonksiyonları yapısal olarak daha basit olan Singleton tip üyelik fonksiyonları olarak seçilmiştir [31]. Yani çıkış dilsel değişkenleri doğrudan reel sayılarla ifade edilmiştir. Örnek olarak, aşağıdaki gibi bir kural yazılabilir:

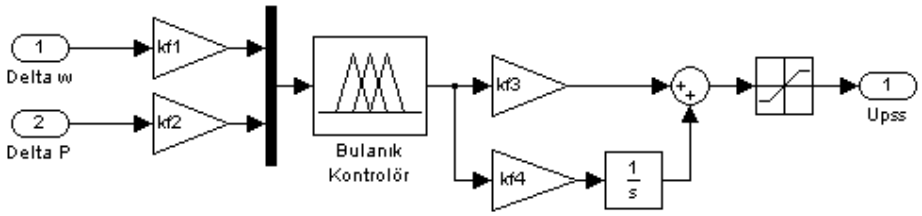
Eğer x A ve y B ise çıkış 0,7 (PK)'dır.

Şekil 5.6'da bulanık kontrolör çıkışı için oluşturulan Singleton tip üyelik fonksiyonları görülmektedir.



Şekil 5.6: Çıkış için kullanılan üyelik fonksiyonları [31]

Giriş işareti olarak hız değişimi ve mekanik-elektriksel güç farkını kullanan bulanık kontrolörün modeli Şekil 5.7'de gösterilmiştir [32, 33]. Tasarlanan bu modelde çıkış sinyalinin integrali de bir katsayı ile çarpılarak sinyalin kendisine eklenmektedir. Yüksek değerlere sahip bulanık kontrolör çıkış sinyali, generatör uç geriliminde dalgalanmalara sebep olacağından çıkış sinyali sınırlandırılmıştır.

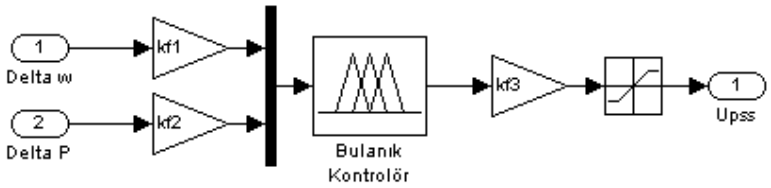


Şekil 5.7: PID yapıdaki bulanık kararlı kılıcı

Şekil 5.7'deki yapıya sahip kontrolörün hata, hatanın değişimi, çıkış sinyali ve çıkış sinyalinin integraline ait 4 adet katsayısı genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyonda kullanılan uygunluk fonksiyonu klasik yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısında kullanılan fonksiyon ile aynı olduğu zaman, senkron generatör uç gerilimde istenmeyen dalgalanmalar meydana gelmiştir. Bu sebeple oluşturulan yeni uygunluk fonksiyonunda rotor hızının zamana göre integralinin yanında uç gerilimi V_T ile referans uç gerilim V_{TR} arasındaki farkın zamana göre integrali de (5.30) numaralı eşitlikte görüldüğü gibi üyelik fonksiyonuna eklenmiştir. Fonksiyonda görülen a katsayısının değerine bağlı olarak optimizasyon sonucunda rotor açısı ve uç gerilimi değerlerinin zamana göre değişimleri incelenmiştir. Küçük a değerlerinde yapılan optimizasyon, uç gerilimi değişimi için iyi, rotor açısı değişimi için vasat sonuçlar verirken, büyük a değerlerine göre yapılan optimizasyon uç gerilimi değişimi için kötü, rotor açısı değişimi için iyi sonuçlar vermiştir. Hem uç gerilimi hem de rotor açısı değişimini kabul edilebilir sınırlar içinde elde etmek için gerçekleştirilen optimizasyonda a değeri 8 olarak seçilmiştir.

$$J = \frac{1}{\int_0^{10} \left| \Delta\omega. + \frac{(V_{TR} - V_T)}{a} \right| dt} \qquad \textbf{(5.28)}$$

Yüksek integral katsayıları uç gerilim ve rotor açısının sürekli hal değerine oldukça geç oturmasına sebep olmuştur. Yapılan optimizasyonlarda integral katsayısının her seferinde sıfır değerine oldukça yaklaştığı görülmüştür. Bu sebeple integral bloğu kaldırılarak Şekil 5.8'deki yapıya sahip bulanık kontrolörün 3 katsayısı için optimizasyon tekrarlanmıştır.



Şekil 5.8: PD yapıdaki bulanık kararlı kılıcı

Açısal hız değişimi $\Delta\omega$ değerini ait katsayı optimizasyonda 0 ile 20 arasında sınırlandırılmıştır. Mekanik-elektriksel güç farkı ΔP'ye ait katsayı ise 0 ile 1 arasında sınırlandırılmıştır. Kontrolör çıkışı için ise sınır değeler 0 ile 5 olarak seçilmiştir. Bu durumda, (5.28) eşitliğinde belirtilen uygunluk fonksiyonunun en yüksek değerini veren katsayılar, $\Delta\omega$ için1,5845, ΔP için 1,154 ve çıkış için 2,047 olarak elde edilmiştir. Optimize edilmiş bulanık güç sistemi kararlı kılıcısının kullanılması halinde, rotor açısı ve senkron generatör uç geriliminin zamana göre değişimini gösteren grafikler son bölümde verilmiştir.

5.3.4 Statik VAR Kompanzatörü

Bir önceki bölümde açıklanan bulanık güç sistemi kararlı kılıcısı modeli, rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde, klasik yapıdaki kararlı kılıcıya göre çok daha verimli çalışmaktadır. Her ne kadar bu bulanık kontrolörün katsayılarının optimizasyonunda senkron generatör uç geriliminin zamana göre değişimi de dikkate alındıysa da, bulanık kontrolör çıkış sinyalindeki sınırların yüksek tutulmasından dolayı uyarma sistemine giren kararlı kılıcı sinyali de arttığından, önerilen bulanık kontrolör senkron generatör uç geriliminin zamana göre değişimi göz önüne alındığında, klasik yapıdaki kararlı kılıcıya bir üstünlük sağlayamamıştır.

Senkron generatör uç gerilimin zamana göre değişimini bir miktar da iyileştirmek için, bulanık kararlı kılıcıyla beraber çalışmak üzere asıl görevi bağlı bulunduğu baranın gerilimini ve reaktif güç akışını kontrol etmek olan bir statik var kompanzatörü güç sistemine eklenmiştir. SVK, sisteme paralel başlı bir ayarlanabilir süseptans olarak düşünülebilir [2].

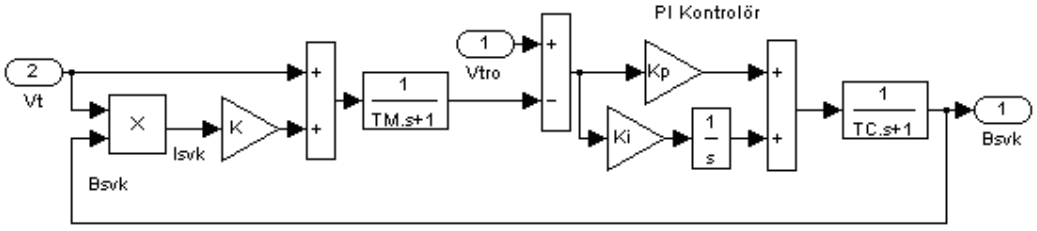
Bu çalışmada kullanılan statik var kompanzatörüne ait durum denklemleri (5.29), (5.30) ve (5.31) numaralı eşitliklerde verilmiştir [14].

$$\frac{d\mathrm{B}_{\mathrm{SVK}}}{dt} = \frac{(V_{\mathrm{SVKref}} - x_1)K_p + x_2 - \mathrm{B}_{\mathrm{SVK}}}{\mathrm{T}_{\mathrm{C}}} \tag{5.29}$$

$$\frac{dx_2}{dt} = (V_{\mathrm{SVKref}} - x_1) \tag{5.30}$$

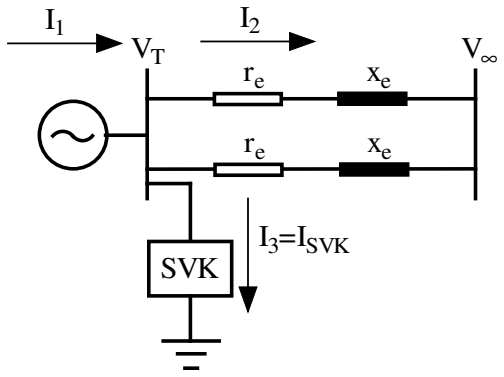
$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{V_{\mathrm{SVKref}}(\mathrm{B}_{\mathrm{SVK}}.K + 1) - x_1}{\mathrm{T}_{\mathrm{M}}} \tag{5.31}$$

Eşitliklerdeki x_1 ve x_2 durum değişkenleridir. Üçüncü durum değişkeni ise süseptans B_{SVK}'dir. SVK, generatör barasına bağlandığından kontrolörün referans gerilim değeri V_{SVKref} aynı zamanda referans uç gerilim değeri V_{TR0}'a eşit olacaktır. K_P ve K_I katsayıları tristörlerin ateşleme açılarını ve bu şekilde süseptans değerini kontrol eden PI kontrolörün katsayılarıdır. T_M ve T_C ise kontrolör zaman sabitleridir. Daha önceki bölümlerde statik var kompanzatörünün, kontrol aralığı içinde değeri değişebilen bir süseptans olduğundan bahsedilmişti. Durum denklemlerindeki K değeri, kontrol aralığını belirleyen doğrunun eğimini temsil eder. Çalışmada K değeri 0,03 olarak alınmıştır. (5.29), (5.30) ve (5.31) numaralı eşitlikler Laplace dönüşümünden sonra birbiri içine yazılırsa bilgisayar benzetiminde kullanılacak SVK blok diyagramı Şekil 5.9'daki gibi elde edilir.



Şekil 5.9: SVK blok diyagramı [14]

SVK elemanın sisteme dahil edilmesinden sonra oluşan güç sistemi modeli Şekil 5.10'da gösterilmiştir. SVK'nün blok diyagramındaki çıkışı elemanın süseptans değeridir. Bu elemanı güç sisteminin matematiksel modeline ekleyebilmek için SVK üzerinden geçen akıma ilişkin eşitliklerden faydalanılacaktır.



Şekil 5.10: SVK eklenmiş güç sistemi modeli

SVK sisteme eklenmeden önce I_1 akımı ile I_2 akımı birbirlerine eşittir. SVK'nün sisteme eklenmesiyle bu eşitlik bozulacağından ilk durumdaki güç sistemine ait matematiksel model eşitliklerinden (5.9), (5.10), (5.11) ve (5.12)'deki I_d ve I_q akımları da birbirinden farklı olacaktır. Yeni duruma ilişkin eşitlikler (5.32) ile (5.35) arasında gösterilmiştir.

$$V_{Td} = E'_d - r_a I_{d1} - x'_d I_{q1} \quad \textbf{(5.32)}$$

$$V_{Tq} = E'_q - r_a I_{q1} - x'_d I_{d1} \quad \textbf{(5.33)}$$

$$V_{Td} = -V_\infty \sin\delta + r_a I_{d2} + x_a I_{q2} \quad \textbf{(5.34)}$$

$$V_{Tq} = V_\infty \cos\delta + r_a I_{q2} - x_a I_{d2} \quad \textbf{(5.35)}$$

Şekil 5.10'a göre, akımların d ve q eksen bileşenlerine ait eşitlikler ise (5.36) ile (5.37)'da belirtilmiştir. Burada I_{d3} ve I_{q3} statik var kompanzatörüne ait akımın d ve q eksenlerine ait bileşenleridir.

$$I_{d1} = I_{d2} + I_{d3} \quad \textbf{(5.36)}$$

$$I_{q1} = I_{q2} + I_{q3} \quad \textbf{(5.37)}$$

(5.32) ile (5.33) eşitliklerinden I_{d1} ve I_{q1} çekilerek (5.38) ile (5.39) numaralı eşitlikler yazılabilir.

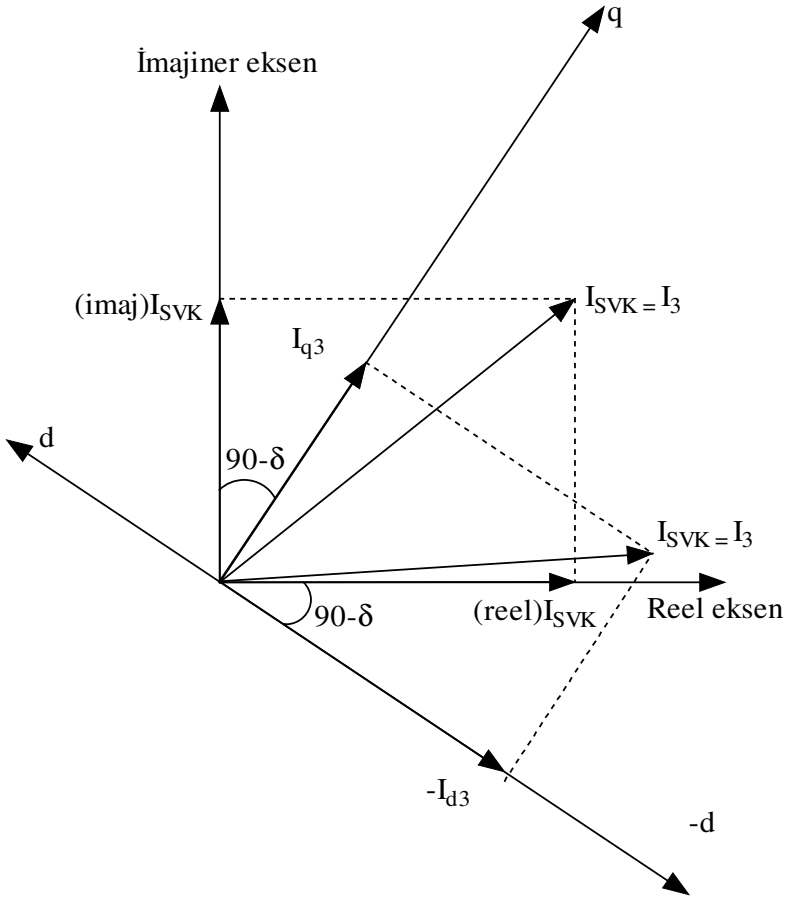
$$I_{d1} = \frac{x'_d (V_{Tq} - E'_q) + r_a (E'_d - V_{Td})}{(r_a^2 + x'^2_d)} \quad \textbf{(5.38)}$$

$$I_{q1} = \frac{x'_d (E'_d - V_{Td}) + r_a (E'_q - V_{Tq})}{(r_a^2 + x'^2_d)} \quad \textbf{(5.39)}$$

SVK elemanına ait akım, üretim barası gerilimi ile kontrol elemanın süseptans değerine bağlıdır ve (5.40) numaralı eşitlikle gösterilebilir. V_T uç gerilimi, β ise gerilimin açısını temsil eder.

$$I_3 = -B_{SVK}.V_T \sin\beta + jB_{SVK}.V_T \cos\beta \quad \textbf{(5.40)}$$

I_3 akımının d ve q eksenlerine ait bileşenlerini bulmak için Şekil 5.11'den yararlanılır. Buradan I_{d3} ve I_{q3} (5.41) ile (5.42)'deki eşitliklerle ifade edilebilir.



Şekil 5.11: SVK akımının d ve q eksenlerine ait bileşenleri

$$I_{d3} = B_{SVK}.V_T \cos\beta\cos\delta + B_{SVK}.V_T \sin\beta\sin\delta \quad \textbf{(5.41)}$$

$$I_{q3} = B_{SVK}.V_T \cos\beta\sin\delta - B_{SVK}.V_T \sin\beta\cos\delta \quad \textbf{(5.42)}$$

I_1 ve I_3 akımlarının d ve q eksenlerine ait bileşenleri elde edildikten sonra (5.36) ve (5.37) numaralı eşitliklerden de hat akımı I_2'nin d ve q eksenlerine ait bileşenleri de elde edilir.

$$J = \frac{1}{\int_0^{10} \left| \Delta\omega. + \frac{(V_{TR} - V_T)}{a} \right| dt} \quad \textbf{(5.43)}$$

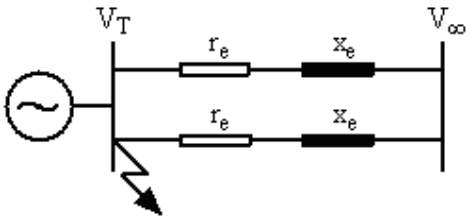
Genetik algoritmayla optimizasyon sonucunda elde edilen en uygun T_M, T_C, K_P ve K_I değerleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3: GA ile elde edilen en uygun SVK değerleri

Parametre	Değer
K_P	0,689
K_I	0,42
T_M	0,049
T_C	0,022

5.4 Bozucu Etki Modeli

Bu çalışmada, geçici hal kararlılık analizini gerçekleştirmek için bozucu etki olarak üç faz-toprak kısa devresi kullanılmıştır. Kısa devrenin, Şekil 5.12'deki paralel hatlardan biri üzerinde ve generatör barasına yakın bir noktada meydana geldiği varsayılmıştır. Bilgisayar benzetimi, kısa devre öncesi, kısa devre anı, kısa devrenin temizlenmesi ve ilk duruma dönüş olmak üzere 4 durumdan meydana gelir.

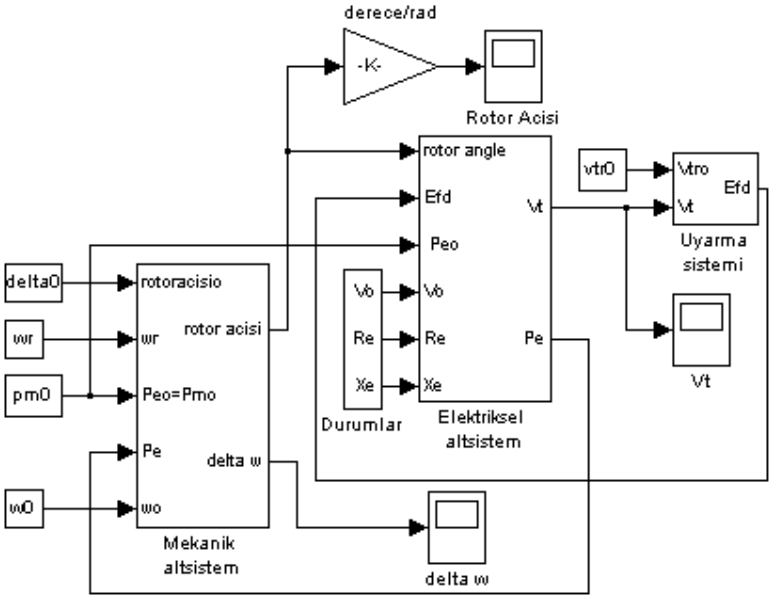


Şekil 5.12: Kısa devreye maruz kalan güç sistemi

Bilgisayar benzetiminde durumlar arası geçişler, eşdeğer hat empedansı ve bara gerilimlerinin değişimi olarak karakterize edilebilir. 0 ile 0.6 saniye aralığındaki kısa devre öncesi çalışma durumda, eşdeğer hat empedansı ve bara gerilimi nominal değerinde iken, 0,6-0,78 saniyeler arasında kısa devre sebebiyle generatör barasının gerilimi 0 olurken, hat empedansı değerleri sabit kalır. 0,78 ile 0,87 saniyeler arasında rölelerin kısa devrenin meydana geldiği hattı devre dışı bırakmasıyla eşdeğer hat empedansı bu durumda iki katına çıkar. Son durumda, arıza giderildikten sonra röleler tekrar ikinci hattı devreye sokar ve ilk çalışma koşullarına dönülmüş olur [9].

5.5 Tüm Sistemin SIMULINK Programındaki Modeli

Bundan önceki bölümlerde senkron generatör ve bağlı olduğu iletim hattı ile kullanılan kontrol elemanlarına ait matematiksel eşitlikler açıklanmıştır. Bu bölümde ise bu eşitlikler, MATLAB Simulink programına aktarılacaktır. Simulink programında modellenen güç sistemine ait genel model Şekil 5.13'de verilmiştir [7].



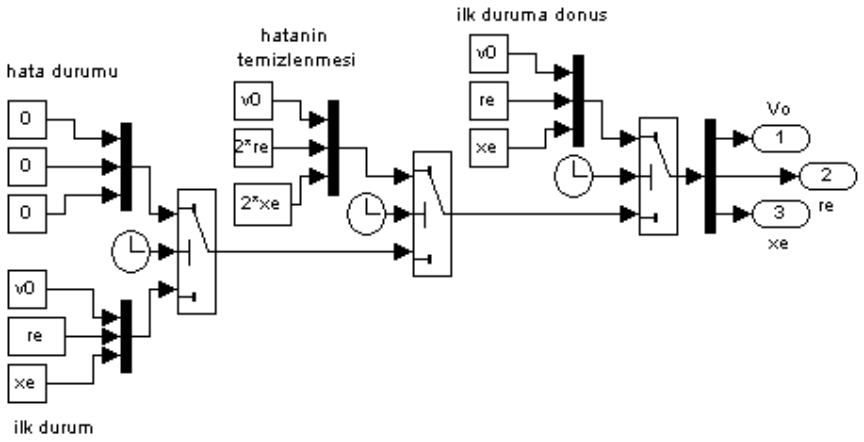
Şekil 5.13: Güç sisteminin Simulink programındaki modeli [9]

Şekil 5.13'e göre, güç sisteminin Simulink modeline giriş olarak senkron generatörün sürekli hal değerleri ile hat empedansına ait değerler verilirken, çıkış

olarak senkron generatör uç gerilimi, rotor açısı ve elektriksel güç değerleri elde edilir. Bir önceki bölümde verilen matematiksel eşitlikler diferansiyel ve cebirsel eşitlikler olarak ayrılmıştı. Cebirsel eşitlikler programdaki blok yapılar içine doğrudan yazılırken, diferansiyel eşitlikler S domeinindeki transfer fonksiyonlar olarak ifade edilmiştir. Bu işlemi gerçekleştirmek için, modele ait diferansiyel eşitliklere Laplace dönüşümü uygulanacaktır.

Sistem girişindeki sürekli hal değerleri, MATLAB programı altında bir m-file dosyası ile hesaplanıp Simulink modeline verilmiştir. Hesaplarda, (5.14) ile (5.26) arasında verilen sürekli hal eşitlikleri kullanılmıştır. Sürekli hal değerlerinin hesaplandığı m-file dosyası Ek-B'de verilmiştir.

Sürekli hal değerleri dışında sisteme giriş olarak, üç faz-toprak kısa devre ve rölelerin hatları devre dışı bırakıp devreye sokmasıyla değişen eşdeğer hat empedansı ile bara gerilimi değerleri verilmiştir. Şekil 5.13'de, bilgisayar benzetiminde gerçekleşecek tüm durumların modelleri, eşdeğer hat empedansı ve bara gerilimi cinsinden gösterilmiştir. Kullanılan zaman tabanlı anahtarlar ile, durumlar arası geçişler sağlanmaktadır.



Şekil 5.14: Sisteme ait durumların Simulink programındaki modeli

Şekil 5.14'deki modelden görüleceği gibi, hesaplanan sürekli hal değerleri senkron generatöre ait uyarma sistemi ile mekanik sistemlere verilmektedir. Yapısında gerilim regülatörü barındıran IEEE Tip1 uyarma sistemine ait blok diyagram daha önceden Şekil 5.3'de verilmişti. Bilgisayar benzetiminde, sisteme kontrol elemanları

eklenirken, senkron generatör sürekli olarak IEEE Tip1 uyarma sistemiyle beraber kullanılacaktır.

Mekanik blok, senkron generatöre ait salınım eşitlikleri ile, türbin ve devir sayısı regülatörüne ait eşitliklerden oluşur. Bu eşitlikleri zaman domeininden S domeinine geçirilirek (5.44) ile (5.49) arası ifadeler elde edilir.

$$\Delta\omega = \frac{P_M - P_E}{D + s.M} \tag{5.44}$$

$$\Delta\delta = \frac{\omega_0.\Delta\omega}{s} \tag{5.45}$$

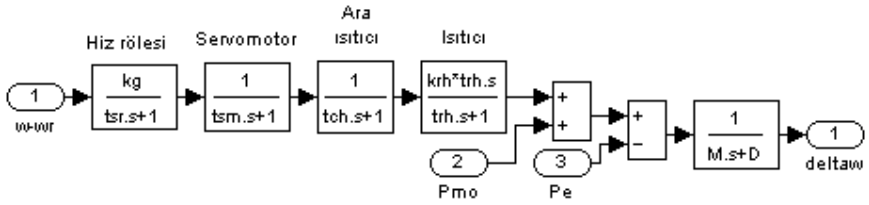
$$\Delta P_r = \frac{K_G.\Delta\omega}{1 + s.T_{SR}} \tag{5.46}$$

$$\Delta P_h = \frac{\Delta P_r}{1 + s.T_{SM}} \tag{5.47}$$

$$\Delta P_c = \frac{\Delta P_h}{1 + s.T_{CH}} \tag{5.48}$$

$$\Delta P_M = \frac{T_{RH}.K_{RH}.\Delta P_c}{s.T_{RH} + 1} \tag{5.49}$$

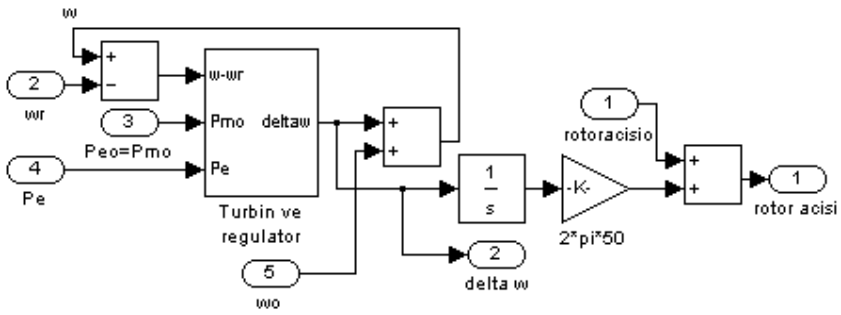
(5.46) ile (5.49) arası eşitlikler iç içe yazılırsa Şekil 5.15'deki türbin ve hız regülatörüne ait model elde edilir. Açısal hız farkını giriş alan regülatör modelinin çıkışı mekanik güçteki değişimdir.



Şekil 5.15: Türbin ve hız regülatörü modeli [9]

Regülatör modeli çıkışında elde edilen mekanik güç değişimi ΔP_M, mekanik gücün sürekli hal değeri P_{M0} ile toplanarak o anki mekanik güç değeri P_M elde edilir. (5.44)

eşitliği yardımıyla anlık mekanik güç ile elektriksek güç farkı, açısal hız farkına dönüştürülür. (5.45) numaralı eşitlikle de açısal hız farkından, rotor açısı değişimi elde edilir. Rotor açısının değişimi $\Delta\delta$, rotor açısının sürekli hal değeri δ_0 ile toplanarak, o anki rotor açısı değeri elde edilir. Bu eşitliklerden oluşan mekanik sistemin modeli Şekil 5.16'da verilmiştir.



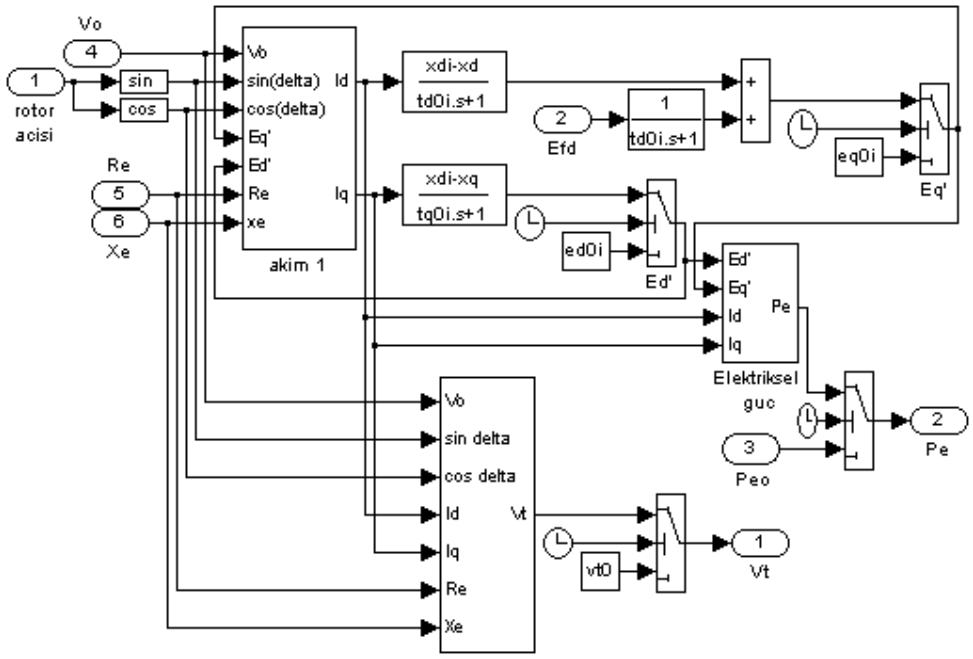
Şekil 5.16: Senkron generatöre ait mekanik alt sistem

Güç sistemi modelinin içindeki elektriksel alt sistem, senkron generatörün rotor sargısı ve stator sargısı eşitlikleri, şebeke eşitlikleri ve elektriksel güç eşitliğinden meydana gelir. (5.3) ve (5.4)'de verilen diferansiyel rotor sargısı eşitlikleri Laplace dönüşümüyle (5.50) ve (5.51)'deki duruma gelirler. Diğer eşitlikler cebirsel olduklarından model içinde doğrudan kullanılmışlardır. Şekil 5.17'de elektriksel alt sisteminin Simulink programındaki yapısı gösterilmiştir.

$$E'_d = \frac{I_q(x'_d - x_q)}{s.T'_{q0} + 1} \qquad \textbf{(5.50)}$$

$$E'_q = \frac{I_d(x'_d - x_d) + E_{fd}}{s.T'_{d0} + 1} \qquad \textbf{(5.51)}$$

Elektriksel alt sisteme giriş olarak verilen senkron generatör rotor açısı, durum bloğundan gelen bara gerilimi ve hat empedansı değerleri ile senkron generatör geçici hal geriliminin q ve d bileşenleri, (5.9) ile (5.12) arası cebirsel eşitlikler yardımıyla senkron generatör ve hat üzerinden geçen akımın q ve d bileşenlerini verir. Bu ilk elektriksel alt sistemde SVK elemanı bulunmadığından, senkron generatör ve hat üzerinden geçen akım değerleri birbirine eşittir.



Şekil 5.17: Güç sistemine ait elektriksel alt sistem [9]

I_d ve I_q akımları elde edildikten sonra, (5.50) ve (5.51) numaralı eşitlikler sayesinde senkron generatör EMK geçici hal değerine ait q ve d bileşenleri E'_d ve E'_q elde edilir. Şekil 5.17'de kullanılan zamanı temel alan anahtarlar ile senkron generatör EMK q ve d bileşenleri, kısa devre anında sürekli hal değerlerinden geçici hal değerlerine geçer. E'_d ve E'_q ile I_d ve I_q değerleri (5.13) numaralı eşitlik ile senkron generatöre ilişkin anlık elektriksel güç değerini verir. Senkron generatör rotor açısı, durum bloğundan gelen bara gerilimi ve hat empedansı değerleri ile I_d ve I_q akımları, (5.11) ve (5.12) numaralı eşitliklere konulduğunda generatör uç gerilimi elde edilir.

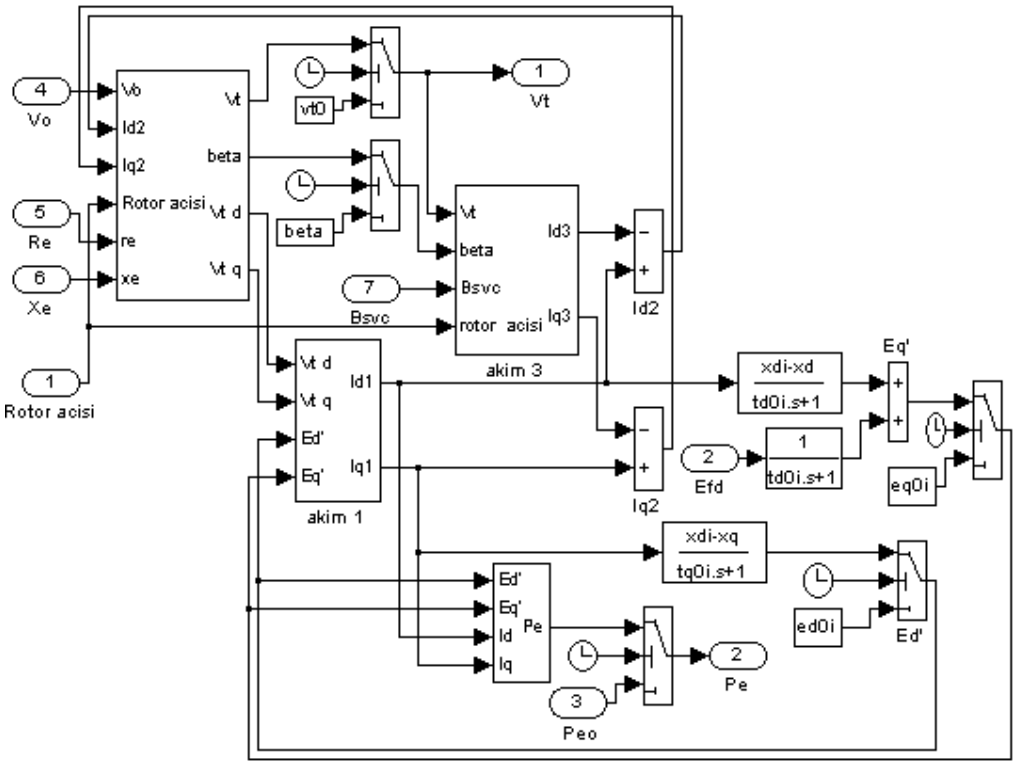
Elektriksel alt sistemin çıkışları olan elektriksel güç ve uç gerilimi değerleri de kısa devre anında birer anahtar ile sürekli hal değerlerinden geçici hal değerlerine getirilir. Alt sistemden çıkan elektriksel güç, mekanik alt sisteme giriş olarak verilerek mekanik-elektriksel güç farkından senkron generatörün hız ve rotor açısı değişimine ilişkin sonuçlar gözlenir. Diğer çıkış olan uç gerilim değeri ise uyarma sistemine giriş olarak verilerek, referans gerilim değeri ile arasındaki fark sinyalinin genliğine göre uyarma gerilimi kontrol edilir.

Güç sistemine bir SVK elemanı eklendiğinde, SVK elemanına ait akım bileşenleri I_{d3} ve I_{q3} sebebiyle artık senkron generatöre ait akımın d ve q bileşenleri I_{d1} ve I_{q1}, hat

üzerinden akan akımın d ve q bileşenleri I_{d2} ve I_{q2}'ye eşit olmayacaktır. SVK elemanın eklenmesiyle elde edilen yeni akım eşitlikleri (5.32) ile (5.42) arasındaki eşitliklerde verilmiştir. Bu durumda değişen elektriksel alt sisteme ait Simulink modeli Şekil 5.18'de verilmiştir.

Senkron generatöre ilişkin EMK ve uç gerilimi değerleri (5.38) ve (5.39) numaralı eşitliklerde kullanılarak senkron generatöre ait akım değerleri I_{d1} ve I_{q1} hesaplanır.

Generatör rotor açısı, SVK süseptans değeri, üretim barasının gerilimi ve açısı kullanılarak (5.41) ve (5.42) eşitliklerinden SVK'ne ilişkin I_{d3} ve I_{q3} akımları bulunur



Şekil 5.18: Yapısına SVK eklenmiş güç sistemine ait elektriksel alt sistem

I_1 ve I_3 akımları elde edildikten sonra, (5.36) ve (5.37) numaralı eşitliklerden yararlanılarak hat üzerinden akan akımın d ve q bileşenleri I_{d2} ve I_{q2} hesaplanır. Elde edilen hat akımı değerleri, senkron generatör rotor açısı, durum bloğundan gelen eşdeğer hat empedans değerleri ve bara gerilimi ile beraber (5.34) ve (5.35) numaralı eşitliklerin kullanıldığı blok çıkışında senkron generatör uç geriliminin d ve q ekseni bileşenleri ve buradan da uç geriliminin genliği elde edilir. Yine bu blok içerisinde,

daha önce senkron generatöre ait sürekli hal değerlerinin hesabında kullanılan Şekil 5.2'deki fazör diyagram yardımıyla, uç geriliminin açısı β aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır. Elde edilen β açısı SVK elemana ilişkin akımın hesaplanması için "akım3" isimli bloğa giriş olarak verilir.

$$\beta = \delta - \arccos(\frac{V_T}{V_{Tq}}) \qquad \textbf{(5.52)}$$

Senkron generatöre ilişkin EMK ile elektriksel güç değerleri ilk modeldeki gibi (5.50), (5.51) ve (5.13) numaralı eşitlikler ile elde edilir. Yine ilk elektriksel alt sistemde olduğu gibi senkron generatöre ilişkin uç gerilim V_T, EMK d ve q eksen bileşenleri E'_d ve E'_q ile elektriksel güç P_e'nin sürekli hal ve geçici hal değerleri, zamanı temel alan anahtar ile kontrol edilmiştir.

6. BENZETİM SONUÇLARI

Simulink programına aktarılan güç sistemi modelinden görüldüğü gibi, çıkış olarak senkron generatöre ilişkin rotor açısı δ ve uç gerilimi V_T değerleri elde edilir. Bir önceki bölümde matematiksel modelleri verilen farklı kontrol elemanları sırasıyla güç sistemine eklenerek, her farklı durum için senkron generatöre ait rotor açısı δ ve uç gerilimi V_T'nin zamana göre değişimlerini veren grafikler yardımıyla güç sistemi kontrol elemanlarının performansları karşılaştırılacaktır. Bu bölümde verilen grafikler ağır endüktif yük (0,8 p.u. aktif ve 0,6 p.u. reaktif) durumunda elde edilmiştir. Orta endüktif, hafif endüktif ve kapasitif yük durumlarına ilişkin grafikler Ek-D'de verilmiştir.

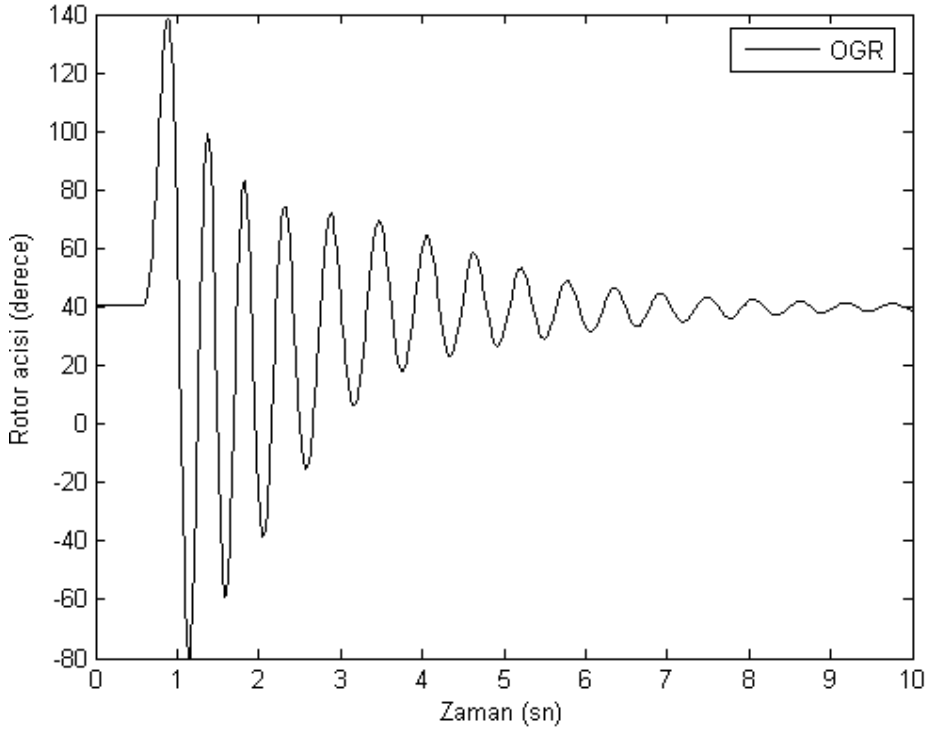
Benzetimlerde, Pentium III 650 Mhz işlemci ve 128 MB RAM'e sahip bir bilgisayar ve MATLAB programının 7.1 sürümü kullanılmıştır.

6.1 Senkron Generatör ve IEEE Tip1 Uyarma Sistemi Davranışı

Öncelikle, senkron generatöre ve sadece IEEE Tip1 uyarma sisteminden oluşan durum incelenmiştir. Daha önce tek makina-sonsuz bara güç sistemine ait fazör diyagram yardımıyla generatöre ait rotor açısının sürekli hal değeri 40,83 derece ve uç gerilimine ait sürekli hal değeri 1,116 p.u. olarak hesaplanmıştır.

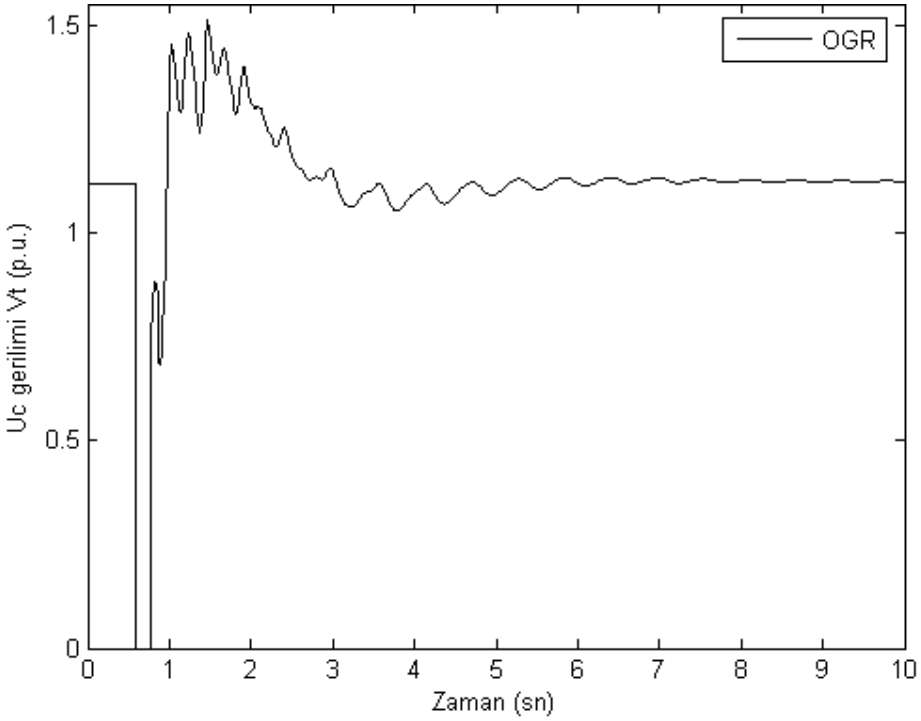
Bilgisayar benzetiminde IEEE Tip1 uyarma sistemine sahip senkron generatörün rotor açısının zamana göre değişimi Şekil 6,1'de gösterilmiştir. Senkron generatör, bozucu etkiye maruz kalmasına rağmen rotor açısı salınımlarının genlikleri benzetim süresi boyunca azalmıştır. Kısa devre sonucu senkron generatör uç geriliminin 0 değerine düşmesi durumunda tek makina-sonsuz bara güç sistemine ait fazör diyagramdan da görüleceği gibi rotor açısı değerinde ani bir artış gözlemlenmektedir. Rotor açısının sürekli hal değerinden en çok saptığı pozitif ve negatif değerler 138,59 ve –79,88 derecedir. Açısal hız değişiminin mutlak değerinin 0 ile 10 saniye arasındaki integralini ifade eden IATE değeri 0,096 olarak hesaplanmıştır. Yüksek

kazanç ve düşük zaman sabitine sahip gerilim regülatörleri rotor açısı davranışına olumsuz etkide bulunurlar [33]. Bu durum, gerilim regülatörüne ek bir giriş olarak bağlanan GSKK ile giderilmeye çalışılacaktır.



Şekil 6.1: OGR'lü senkron generatörün rotor açısı değişimi

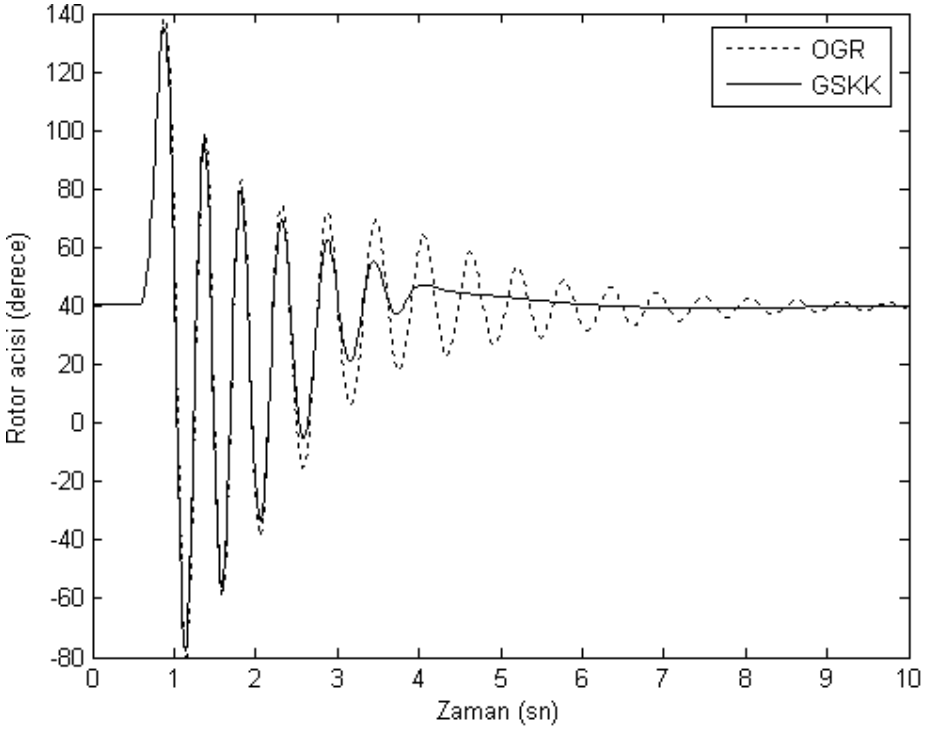
Senkron generatörün uç geriliminin zamana göre değişimi ise, Şekil 6.2'de gösterilmiştir. 0,6 ile 0,78 saniyeleri arasında meydana gelen kısa devre sebebiyle bara gerilimi ve senkron generatör uç gerilimi 0 değerini alır. Arızanın meydana geldiği hattın, 0,78'nci saniyede devre dışı kalmasıyla, senkron generatör uç geriliminde salınımlar meydana gelmeye başlar. Sürekli hal değeri 1,116 p.u. olan senkron generatör uç gerilimi, salınımlar esnasında 1,51 p.u. değerine kadar yükselir. Arızanın temizlendiği hattın da devreye girmesiyle, uç geriliminde meydana gelen salınımların genlikleri benzetim süresince giderek azalır. Uç geriliminin referans değer ile farkı gerilim hatası olarak alınarak, hatanın mutlak değerinin 0 ile 10 saniye arasındaki integralini ifade eden IATE değeri 0,6852 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.2: OGR'lü senkron generatörün uç gerilimi değişimi

6.2 Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK) Davranışı

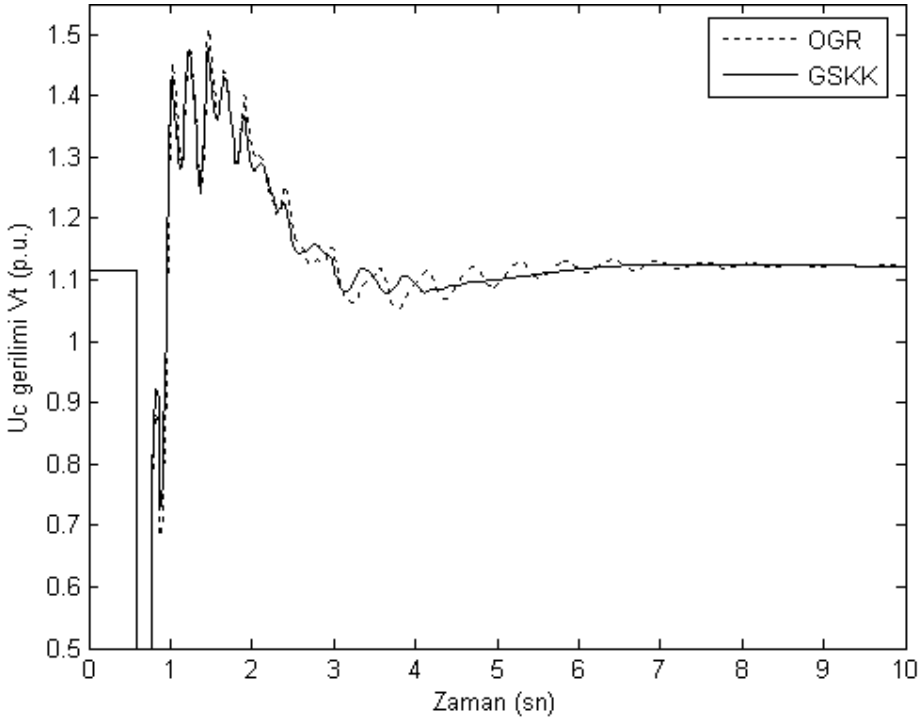
Şekil 6.3'te geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısının, otomatik gerilim regülatörüne ek bir giriş olarak eklenmeden önceki ve eklendikten sonraki durumlar için senkron generatör rotor açısının zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Şekil 6,3'den de görüldüğü gibi geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısının rotor açısının değişimi üzerinde oldukça etkisi vardır. Bozucu etki sonucu oluşan rotor açısı salınımlarının genlikleri daha hızlı azaldığı gibi, salınım sayısı da oldukça azalmış ve rotor açısı çok daha kısa sürede sürekli hal değerine oturmuştur. İlk üç salınımda, salınımların genlikleri 2 ile 5 derece arasında azalırken, takip eden salınımlarda ise fark 15 dereceye kadar çıkmıştır. Geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısının kullanılmadığı durumda benzetim süresinin sonuna kadar salınımlar devam ederken, rotor açısı salınımları güç sistemi kararlı kılıcısı sayesinde 4. saniyeden sonra gözlenmemektedir. Açısal hız değişimine ilişkin IATE değeri 0,096'dan 0,068'e düşürülerek açısal hız ve buna bağlı olarak rotor açısı değişiminde %29,16 oranında iyileşme gözlenmiştir.



Şekil 6.3: GSKK'nın senkron generatör rotor açısına etkisi

Şekil 6.4'de güç sistemi kararlı kılıcısının kullanılmasıyla senkron generatör uç geriliminin zamana göre değişimi gösterilmiştir. Kararlı kılıcının, generatör uç gerilimine etki etmesi beklenmemektedir. Buna rağmen, gerilimin tepe değeri 1.51'den 1.47 p.u. değerine düşürülmüştür. Ayrıca, kararlı kılıcı kullanılmadığı durumda gerilim salınımları benzetim süresi sonuna kadar devam ederken, kararlı kılıcı sayesine 4. saniye sonunda gerilim salınımları son bulmuş ve uç gerilimi, sürekli hal değerinin ±%5'lik bant genişliğine girmiştir. Gerilim hatasına ilişkin IATE değeri 0,6852'den 0,6551'e düşmüştür.

Sonuç olarak, geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısının amacına uygun olarak senkron generatörün rotor açısı üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Rotor açısı salınımları kısa sürede söndürülürken, generatör uç geriliminin tepe değeri düşürülmüş ve gerilim salınımları daha çabuk sönmüştür. Bir sonraki bölümde geleneksel yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısı ile bulanık yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısı rotor açısı ve uç geriliminin değişimine göre karşılaştırılacaktır.



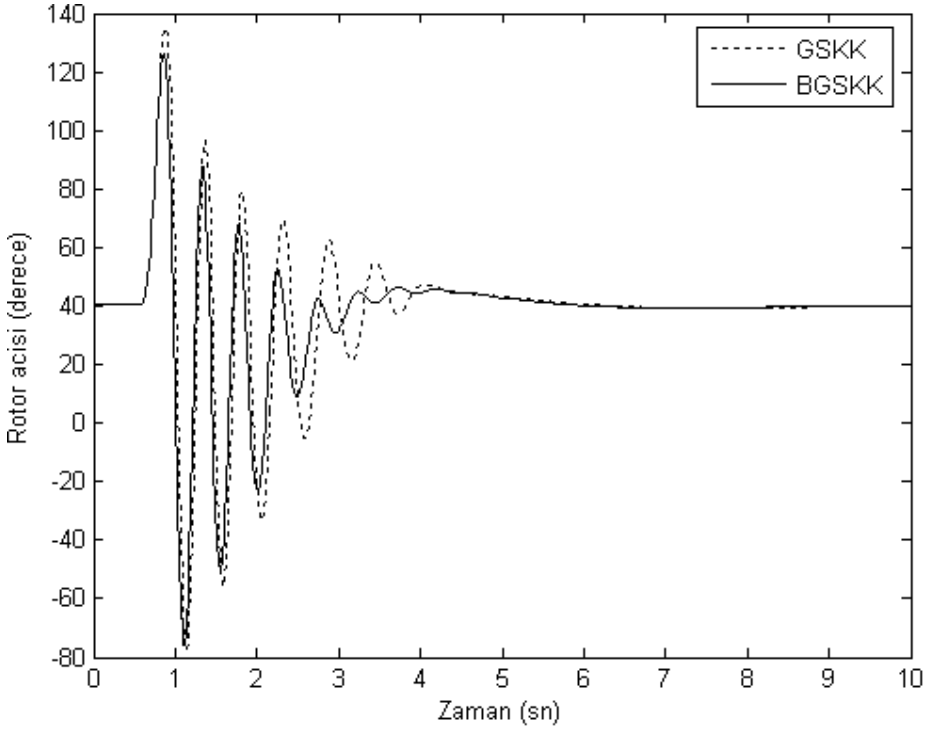
Şekil 6.4: GSKK'nın senkron generatör uç gerilimine etkisi

6.3 Bulanık Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (BGSKK) Davranışı

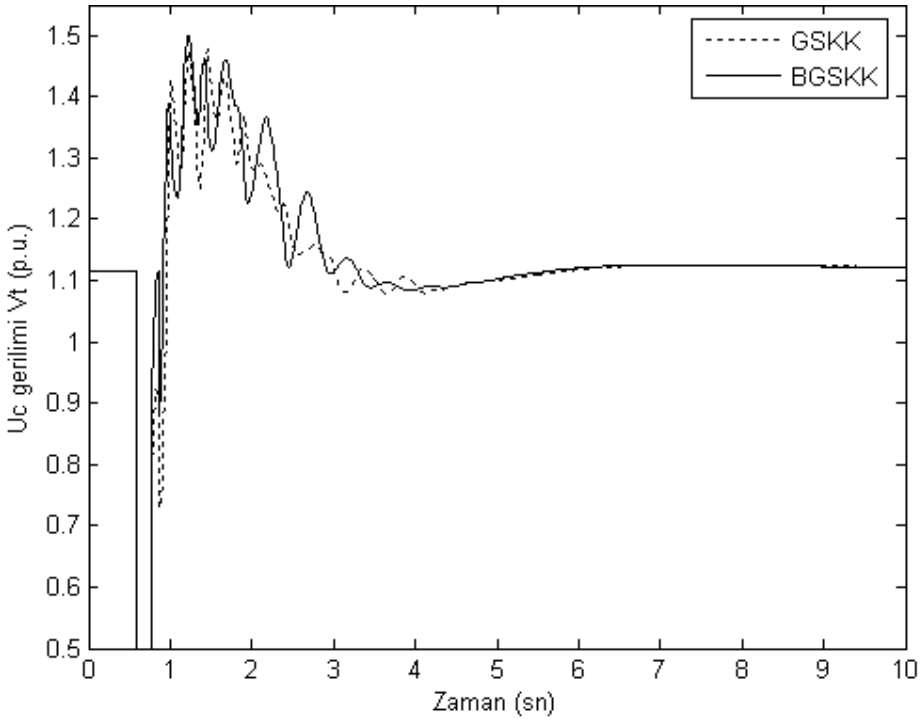
Geleneksel yapıdaki kararlı kılıcı ile bulanık güç sistemi kararlı kılıcısının kullanıldığı durumlarda senkron generatör rotor açılarının zamana bağlı değişimleri Şekil 6.5'de gösterilmektedir.

Klasik yapıdaki kararlı kılıcının sisteme eklenmesiyle rotor açısı salınımlarında büyük bir iyileşme gözlenmişti. Ancak Şekil 6.5'den de görüldüğü gibi bulanık yapıdaki kararlı kılıcı ile rotor açısı değişimi daha da iyileştirilmiştir.

Klasik yapıdaki kararlı kılıcı ile karşılaştırıldığında, bulanık kararlı kılıcı sayesinde salınım genliklerinin daha hızlı bir şekilde azaldığı gözlenmiştir. Salınım genlikleri arası fark ilk salınımda 10 derece iken takip eden salınımlarda fark daha da artmıştır. Bulanık kararlı kılıcının kullanıldığı durumda, açısal hız değişimine ilişkin IATE değeri 0,0553'e düşmüştür. Açısal hız değişiminde, kararlı kılıcısız sisteme göre %42,7 ve klasik yapıdaki kararlı kılıcıya göre de %19,1 oranlarında iyileşme sağlanmıştır.



Şekil 6.5: GSKK ve BGSKK'lı durumlarda generatör rotor açısı değişimi



Şekil 6.6: GSKK ve BGSKK'lı durumlarda generatör uç gerilimi değişimi

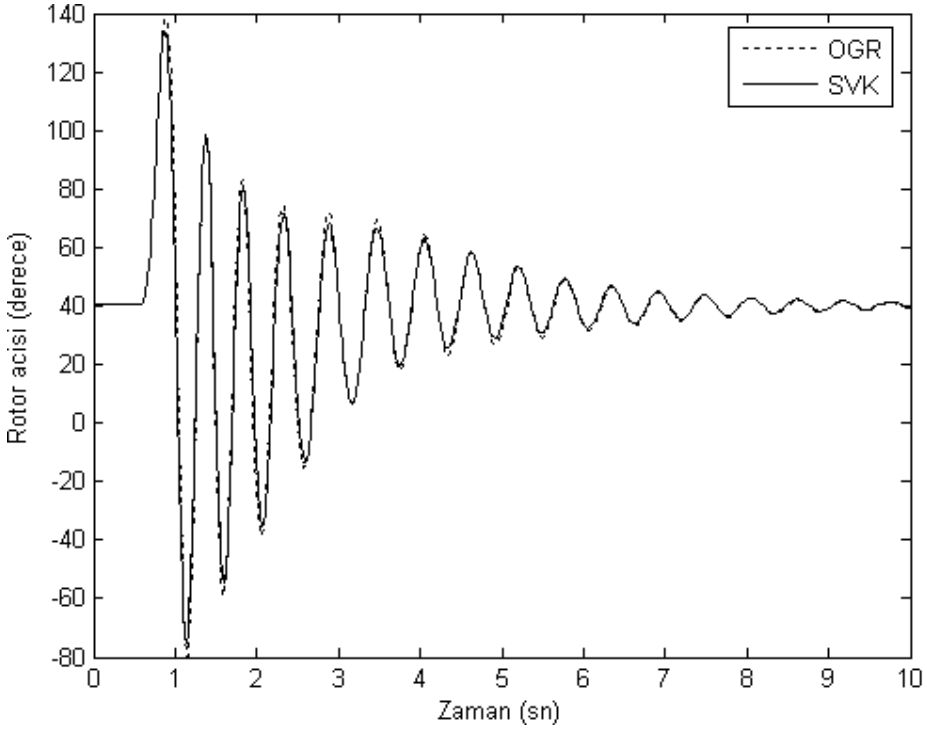
Şekil 6.6'da klasik ve bulanık yapıdaki kararlı kılıcıların ayrı ayrı kullanılmaları halinde, senkron generatör uç geriliminin zamana göre değişimi verilmiştir. Her iki yapıdaki kararlı kılıcı da, öncelikle rotor açısını bozucu etki altında mümkün olduğunca kararlılık sınırları içinde tutacak uygunluk fonksiyonları seçilerek optimize edilmiştir. Bu optimizasyon neticesinde bulanık yapıdaki kararlı kılıcının çıkış sinyaline ait sınır değerler geniş bir aralığa sahiptir. Bu durum rotor açısı kararlığı bakımından bulanık kontrolörü daha verimli hale getirmiştir. Ancak bu yüksek kararlı kılıcı sinyalini OGR ve uyarma sistemine ek bir giriş olarak girdiğinden, senkron generatör uç gerilimine ait bazı salınımların genliklerinde artışlar gözlenmiştir. Neticede uç geriliminin aldığı en büyük değer, klasik yapıdaki kararlı kılıcıya göre 0,02 p.u. artarak 1,50 p.u. seviyesine gelmiştir. Klasik yapıdaki kararlı kılcının kullanıldığı durumda uç gerilime ilişkin IATSE değeri 0,6551 iken, bulanık kararlı ile bu değer 0,6527 olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, her iki kararlı kılıcı da rotor açısı değişimine olumlu etki etse de bulanık kararlı kılıcının, klasik yapıdaki kararlı kılcıya nazaran daha da etkili olduğu görülmüştür. Bulanık yapıdaki kararlı kılcı uç gerilim tepe değerini çok az bir miktar artırsa da iki farklı kontrolöre ait IATE değerleri, iki kararlı kılıcının da uç gerilimi davranışına aynı derecede etki ettiğini göstermektedir.

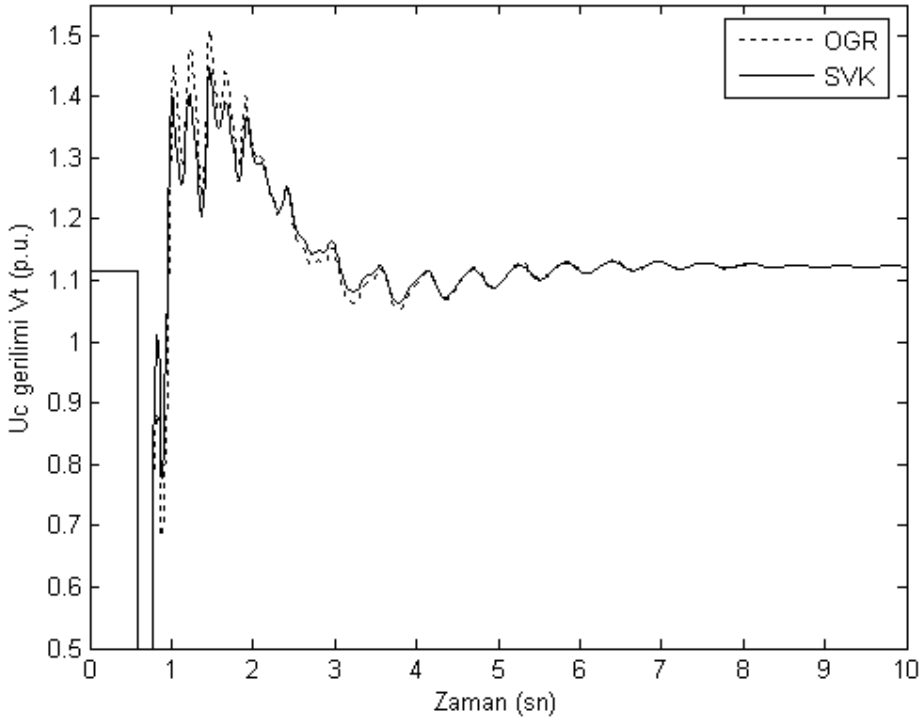
6.4 Statik VAR Kompanzatörü (SVK) Davranışı

Sistemden güç sistemi kararlı kılıcılarının çıkartılıp, sadece OGR'lü sistem ve ek olarak üretim barasına SVK'nün eklendiği durumlar için rotor açısının zamana bağlı değişimi Şekil 6.7'de gösterilmektedir. Asıl görevi gerilim kontrolü olan SVK elemanı rotor açısı davranışına çok büyük etki etmemiştir. Ancak ilk 6 salınımın genliğinde 4'er derece azalma gözlenmiştir. Bu sebeple uç gerilime ait hata değerlerine bakıldığında SVK'lü durumda ufak bir miktar azalma sağlanmış ve IATE değeri 0,6188 olarak elde edilmiştir.

SVK'nün etkisi Şekil 6.7'de verilen senkron generatör uç geriliminin davranışının incelenmesiyle görülür. SVK ile senkron generatör uç geriliminin tepe değeri 1,51'den 1,44 p.u. değerine çekilmiştir. Uç gerilime ait ve IATE değeri 0,6188'e çekilerek generatör uç gerilimi değişiminde %10 oranında iyileştirme sağlanmıştır.



Şekil 6.7: Sisteme SVK eklenmesinin generatör rotor açısına etkisi

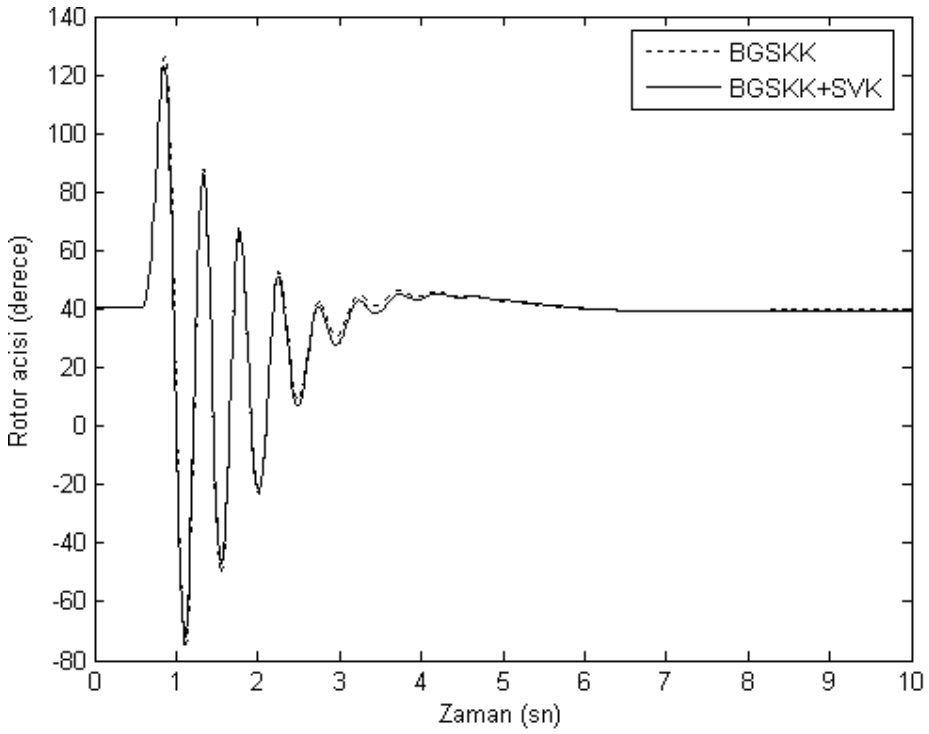


Şekil 6.8: Sisteme SVK eklenmesinin generatör uç gerilimine etkisi

Sonuç olarak üretim barasına eklenen SVK, bozucu etkiden sonra meydana gelen rotor açısı salınımlarının genliklerini az miktarda da olsa düşürerek rotor açısı değişimine olumlu katkıda bulunmuştur. Ayrıca bozucu etki sonucu generatör uç geriliminin ulaştığı tepe değeri de SVK ile düşürülerek, uç gerilim davranışı IATE değerine göre %10 oranında düzeltilmiştir. SVK bir sonraki bölümde, bulanık kararlı kılıcının generatör uç gerilimi üzerindeki bozucu etkisini kompanze etmek amacıyla kullanılmıştır.

6.5 BGSKK ve SVK Davranışı

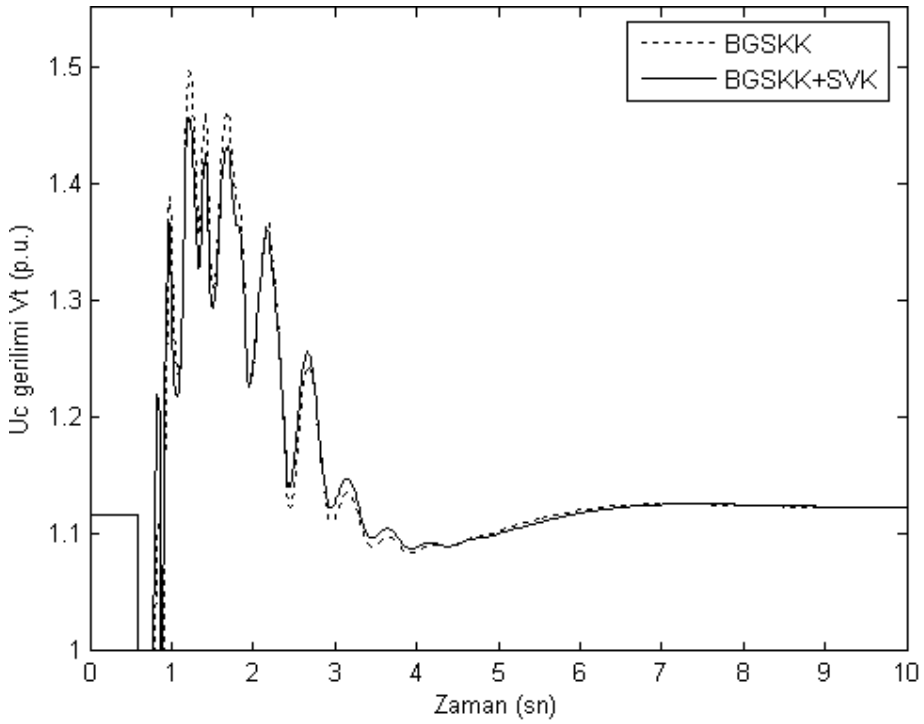
Bu bölümde üretim barasına eklenen SVK'nün, bulanık güç sistemi kararlı kılıcısı ile beraber çalışması halinde senkron generatör rotor açısı ve uç geriliminin değişimleri incelenecektir. Şekil 6.9'da bu duruma ilişkin rotor açısının zamana bağlı değişimi verilmiştir.



Şekil 6.9: SVK ve BGSKK'nın birlikte generatör rotor açısına etkisi

Tek başına kullanıldığı durumda olduğu gibi SVK rotor açısı davranışına çok fazla etkide bulunmamıştır. Bulanık güç sistemi kararlı kılıcısı ile beraber kullanıldığı

durumda salınım genliklerinde azalmalar gözlenmiştir. SVK sisteme eklendiğinde rotor açısının ilk salınımının en yüksek pozitif değeri 125,87 dereceden 122,65 dereceye düşerken, salınımın en düşük negatif değeri -75,89 dereceden -72,68 dereceye yükselmiştir. Takip eden salınımlarda da SVK rotor açısı salınımlarının genliklerini ufak oranlarda azaltmaya devam etmiştir ve bunun sonucunda açısal hıza ait IATE değeri 0,054 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.10: SVK ve BGSKK'nın birlikte generatör uç gerilimine etkisi

Üretim barasına SVK'nün eklenmesinin, senkron generatör uç geriliminin zamana göre değişimine etkisi Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Bulanık güç sistemi kararlı kılıcısının yüksek çıkış sinyalinden kaynaklanan generatör uç geriliminin tepe değerindeki artış, SVK ile bir nevi kompanze edilmiştir. Sadece bulanık kararlı kılıcının çalıştığı durumda uç gerilimin tepe değeri 1,50 p.u. iken, sisteme SVK eklenmesiyle tepe değeri 1,45 p.u. değerine çekilmiştir. SVK, senkron generatör uç geriliminin oturma zamanına bir etkide bulunmamıştır. Uç gerilimine ait IATE değeri 0,633'e çekilmiştir.

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu yüksek lisans tezinde, bulanık mantık teorisi temel alınarak bir güç sistemi kararlı kılıcısı tasarlanmış ve modellenen tek makina-sonsuz bara güç sisteminde meydana gelen salınımları söndürme yeteneği göz önüne alınarak OGR, SVK, klasik ve bulanık yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcıları karşılaştırılmıştır.

Ele alınan güç sistemi, paralel iki eşdeğer iletim hattı ve bu hatlar üzerinden sonsuz güçlü şebekeye bağlı bir senkron generatörden oluşmaktadır. Sistemde bozucu etki olarak, hatlardan birinin üretim barasına çok yakın bir noktasında meydana gelen 3faz-toprak kısa devresi kullanılmıştır. Bu bozucu etki sebebiyle senkron generatöre ilişkin uç gerilimi ve rotor açısında salınımlar meydana gelmiştir. Bu çalışmada izlenen yolda, güç sistemine sırasıyla kontrol elemanları eklenerek senkron generatör uç gerilimi ve rotor açısının benzetim süresi boyunca davranışları incelenmiştir. Elde edilen veriler sayesinde benzetimde kullanılan kontrolörler karşılaştırılmıştır.

Otomatik gerilim regülatörüne giriş olarak eklenen klasik yapıdaki güç sistemi kararlı kılıcısının, kısa devre sebebiyle meydana gelen rotor açısı salınımlarını söndürmede başarılı olduğu gözlenmiştir. Ancak klasik yapıdaki kararlı kılıcı, senkron generatör uç gerilimin davranışının düzeltilmesine çok büyük bir katkı sağlamamıştır. Klasik yapıdaki kararlı kılıcı, bulanık yapıdaki kararlı kılıcı ile değiştirildiğinde rotor açısı davranışı bakımından çok daha tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir. Bulanık kararlı kılıcı, rotor açısının oturma süresini, salınım genliklerini ve sayısını klasik yapıdaki kararlı kılıcıya oranla oldukça azaltmıştır. Rotor açısı salınımlarının söndürülmesinde daha etkili olan bulanık kararlı kılıcı, generatör uç geriliminin tepe değerinde artışlara sebep olmuş ancak gerilimin oturma süresini kısaltmıştır.

Klasik ve bulanık yapıdaki kararlı kılıcılar arasında doğru bir karşılaştırma yapmak için her iki kararlı kılıcı da genetik algoritma kullanarak optimize edilmiştir. Her iki kontrolör için en uygun değerler, açısal hız ve uç gerilim hatasının mutlak

değerlerinin 0 ile benzetim süresi arası integrallerine dayalı uygunluk fonksiyonları kullanılarak elde edilmiştir. Genetik algoritma ile optimize edilen her iki kontrolör de, katsayı sınırları içerisinde el ile yapılan ayarlamaya nazaran daha verimli çalışmaktadır.

Çalışmaya ek olarak, bulanık güç sistemi kararlı kılıcısının gerilim üzerindeki bozucu etkisini yok etmek için, üretim barasına bir statik var kompanzatörü eklenmiştir. Bulanık kararlı kılıcı ile beraber çalışmadan önce statik var kompanzatörü tek başına güç sistemine eklenmiş ve generatör uç gerilimine olumlu etki ettiği görülmüştür. Ardından statik var kompanzatörü ve bulanık güç sistemi kararlı kılıcısı birlikte sisteme eklenmişlerdir. Bulanık kararlı kılıcının artırdığı senkron generatör uç gerilimi tepe değeri eklenen statik var kompanzatörü ile tekrar azaltılmıştır. Ayrıca statik var kompanzatörü sisteme eklenmeden, bulanık güç sistemi kararlı kılıcısının azalttığı rotor açısı salınımlarına ait genlik değerleri, statik var kompanzatörünün kullanılmasıyla bir miktar daha azalmıştır. Sonuç olarak kullanılan statik var kompanzatörü hem senkron generatör uç gerilimi hem de rotor açısı davranışına olumlu etki etmiştir. Bilgisayar benzetimi farklı yük durumları için tekrarlanmıştır. Farklı yük durumlarında elde edilen rotor açıcı ve uç gerilimi davranışlarına göre kontrolörlerin karşılaştırıldığında aynı sonuçlara ulaşılmıştır.

Gelecekte, çok makinalı bir sistem üzerinde benzer bir çalışma yapılabilir. Kullanılan kontrol elemanlarının katsayılarının optimizasyonu yanında, bu kontrol elemanlarının çok makinalı sistemin hangi baralarına yerleştirilmesinin kararlılık ve ekonomiklik açısından en uygunu olacağına dair yapılabilecek bir optimizasyon da farklı bir çalışma konusu olacaktır. Optimizasyon için genetik algoritma dışında farklı optimizasyon yöntemleri de kullanılabilir. Bu çalışmada kullanılan SVK modelinin yerine bulanık bir statik var kompanzatörünün tasarlanması da yine yapılabilecek farklı bir çalışmadır.

KAYNAKLAR

[1] **Rashidi, M., Rashidi, F., Monavar H.,** 2003. Tuning of power system stabilizers via genetic algorithm for stabilization of power systems", *IEEE International conference on Systems, Man and Cybernetics*, October 2003, 4649- 4654.

[2] **Abido, M.A., Abdel-Magid, Y.L.**, 2003. Coordinated design of a PSS and a SVC-based controller to enhance power system stability, *Electrical Power and Energy Systems* **25**, 695-704.

[3] **Chetty, M.,** 2002. A fuzzy logic based discrete mode power system stabilizer", *Asian Journal of Control*, **4,** 327-332.

[4] **Erol, O., K.,**1995. Bulanık kontrolör kural tablosunun genetik algoritmalarla oluşturulması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[5] **Kundur, P.**, 1994. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, New York.

[6] **Tacer, E.,** 1990. Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.

[7] **Demirören, A., Zeynelgil, H.L.**, 2004. Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı, Kontrolü ve Çalışması, Birsen yayınevi, İstanbul.

[8] **Padiyar, K. R.**, 1995. Power System Dynamics: Stability & Control. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapure.

[9] **Demirören, A., Zeynelgil, H.L.**, 2002. Modelling and simulation of synchronous macgine transient analysis using simulink, *International Journal of Electrical Engineering*, **39**, 339-346.

[11] **Sauer, P. W., Pai M.A.**, 1998. Power System Dynamics and Stability. Prentice-Hall, New Jersey.

[10] **Hiskens, I.A.,** 2002 Systematic tuning of nonlinear power system controllers, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Control Applications.* Glaskow, Scotland, U.K., September 12-20.

[12] **Kundur, P., Klein, M., Rogers, G.J., Zywno M. S**, 1989. Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, **4**, 614-626.

[13] **Machowski, J., Bialek, J., Bumby, J.R.,** 1998. Power System Dynamics and Stability. John Wiley & Sons Ltd, England.

[14] **Laufenberg, M.J., Pai, M.A., Padiyar, K.R.**,1997. Hopf Bifurcation control in power systems with static var compensators, *Electrical Power and Energy Systems,* **19**, 339-347.

[15] **Tomsoviç, K., Chow, M.Y.**, 2000. IEEE Power Engineering Society Tutorial: Fuzzy Set Applications to Power Systems, *IEEE PESTP*-140-0.

[16] **Munakata, T., Jani, Y.**, 1994. Fuzzy Systems, An overview, *Comminications of the ACN***, 37,** 70-76.

[17] **Akbıyık, B.,** 2004. Bulanık PID Kontrolör Yapılarının Temel Sistemler Üzerindeki Başarımının Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[18] **Ergüven, Ç.,** 1999. Bulanık Mantık Kontrolör ile Klasik PID Kontrolör Algoritmalarının Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] **Şen, Z.,** 2001. Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri, İTÜ İnşaat Fakültesi Bilge Sanat Yapım Yayınları, İstanbul.

[20] **Hussu, A.**, 1995. Fuzzy control and defuzzification, *Mechatronics*, **5,** 513-526.

[21] **Holland, J.H.**, 1975. "Adaptation in Natural and Artificial System", Ann Arbor, The University of Michigan Press, USA.

[22] **Güçlü, A.,** 2004. Yüksek Gerilim Tekniğinde Genetik Algoritma Uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[23] **Bakirtsiz, A., Petridis, V., Kazarlis, S.,** 1994. Genetic Algorithm solution to the economic dispatch problem, *IEE Proc. Gener.*, Transm., Distrb., **141**, 377-382.

[24] **Artaç, T.**, 2003. Genetik Algoritmalar ile Dağıtım Şebekelerinin Optimum Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[25] **Goldberg, D.E.**, 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesely, Reading MA.

[26] http://www.geatbx.com/docu/index.html (Ocak 2007)

[27] **Cicirello, V.A., Smith, S. F.,** 2000. "Modelling GA Performance for Control Parameter Optimization", *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2000)*, Las Vegas, Nevada, USA, July 8-12.

[28] **Engin, O.,** 2001. Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Genetik Algoritma ile Çözüm Performansının Artırılmasında Parametre Optimizasyonu, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[29] **Anderson, P.M., Fouad A.A.,** 1994. Power System Control and Stability. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York.

[30] **El-Hawary, M.E.,** 1998. Electric Power Applications of Fuzzy Systems. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York

[31] **Takagi, T., Sugeno, M**., 1985. Fuzzy identification of systems and its applicatons to modelling and control, *IEEE Trans. Systems, Man., Cybern.*, **15**, 116-132.

[32] **Karasakal, O.,** 2004. Bulanık PID Tipi Kontrol Algoritmaları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[33] **Hoang. P., Tomsoviç, K.**, 1996. Design and analysis of an adaptive fuzzy power system stabilizer, *IEEE Transactions on Energy Conversation*, **11**, 455-461.

EK-A : GÜÇ SİSTEMİ ELEMANLARINA AİT PARAMETRELER

Tablo A.1. Senkron generatör ve iletim hattına ait parametreler

r_a : 0,001096	T'_{d0} : 5,9 sn	w_0 : 1
x_d : 1,7	T'_{q0} : 0,075 sn	r_e : 0,01
x_q : 1,64	D : 0	x_e : 0,2
x'_d : 0,245	M : 4,74	

Tablo A.2. DSR ve IEEE Tip1 Uyarma sistemine ait parametreler

K_{RH} : 1	K_A : 400	K_R : 1
T_{RH} : 8 sn	T_A : 0,02 sn	T_R : 0 sn
K_G : 3,5	K_E : 1	
T_{CH} : 8 sn	T_E : 0,8 sn	
T_{SR} : 0,1 sn	K_F : 0,03	
T_{SM} : 0,2 sn	T_F : 1 sn	
w_r : 1	S_E : 0-0,86	

EK-B: SENKRON GENERATÖR SÜREKLİ HAL DEĞERLERİNİN HESABINDA KULLANILAN M-FILE DOSYASI

```
format long

% GENERATOR VE HAT PARAMETRELERİ
p0=0.8;
q0=0.6;
v0=1;
xd=1.7;
xdi=0.245;
xq=1.64;
xe=0.2;
ra=0.001096;
re=0.01;
wr=1;
w0=1;
tq0i=0.075;
td0i=5.9;
D=0;
M=4.74;

% MEKANIK BLOK PARAMETRELERİ
krh=0.3;
trh=8;
tch=0.05;
tsr=0.1;
kg=3.5;
tsm=0.2;

%UYARMA PARAMETRELERİ
TR=0;
KA=400;
TA=0.02;
KE=1;
KF=0.03;
TFE=1;
SE=0.2;
TE=0.8;
KR=1;

% SUREKLI HAL DEGERLERININ HESABI
teta0=atan(q0/p0);
i0=sqrt(p0^2+q0^2)/v0;

a=-xe*i0*sin(teta0)-re*i0*cos(teta0);
b=xe*i0*cos(teta0)-re*i0*sin(teta0);

vt0=sqrt(v0^2-b^2)-a;
beta=atan((i0*(xe)*cos(teta0)-i0*(re)*sin(teta0))/(vt0-
i0*(re)*cos(teta0)-i0*(xe)*sin(teta0)));
deltai0=atan((i0*(xq)*cos(teta0)-
i0*(ra)*sin(teta0))/(vt0+i0*(ra)*cos(teta0)+i0*(xq)*sin(teta0)));
delta0=atan(((xe+xq)*i0*cos(teta0-beta)-(re+ra)*i0*sin(teta0-
beta))/(v0+(re+ra)*i0*cos(teta0-beta)+(xe+xq)*i0*sin(teta0-beta)));
% VEYA delta0=delti0+beta ile de birebir aynı sonuc bulunur.

id0=-i0*sin(deltai0+teta0);
iq0=i0*cos(deltai0+teta0);
```

```
efd0=v0*cos(delta0)+iq0*(ra+re)-id0*(xd+xe);
% VEYA vq0=vt0*cos(deltai0); VE Efd0=vq0+ra*iq0-xd*id0; ile de
birebir aynı sonuc bulunur.

ed0i=-(xq-xdi)*iq0;
% VEYA vd0=-vt0*sin(deltai0); Ed0i=vd0+ra*id0+xdi*iq0; ile de
birebir aynı sonuc bulunur.
eq0i=efd0+(xd-xdi)*id0;
% VEYA eq0i=vq0+ra*iq0+xdi*id0 ile de birebir aynı sonuc bulunur.

pe0=ed0i*id0+eq0i*iq0;
pm0=pe0;
vtr0=efd0/kA+vt0;

%PSS PARAMETRELERİ
tw=3;
KPSS=21.6849;
T1=0.2155;
T2=0.02275;
satcpss=0.1;

%FPSS PARAMETRELERİ
st=0.5;
kf1=1.58457560804154;
kf2=0.15400881805689;
kf3=2.20473904335447;

%SVC PARAMETRELERİ
KP=0.689213745892341;
KI=0.429875622349867;
TM=0.040746503945645;
TC=0.022353045765672;
K=0.03;
satsvc=0.5;
```

EK-C: KONTROLÖRLERİN OPTİMİZASYONUNDA KULLANILAN GENETİK ALGORİTMAYA AİT KODLAR

```
format long
my_m;
gen=500;
sonucgrafy=zeros(1,gen);
popsize=100; %populasyon buyuklugu
range1=40; %gen aralıgı
range2=1; %gen aralıgı
range3=3; %gen aralıgı
%Ilk populasyonun rastlantısal olarak atanması
pop=[range1*rand(1,popsize)+0.2; range2*rand(1,popsize)+0.01 ;
range3*rand(1,popsize)+0.1];
popiate=zeros(1,popsize);

% Bireylerin IATE değerlerinin hesabı
for i=1:1:popsize
    a=[pop(3*i-2) pop(3*i-1) pop(3*i)];
    popiate(i)=my_fun(a);
end

% Jenerasyon döngüsü başlangıcı
for dongu=1:1:gen

if dongu<gen*0.66
    % Secim operatoru = 2li turnuva
    aday1=round(popsize*rand+0.49999);
    aday2=round(popsize*rand+0.49999);
    aday3=round(popsize*rand+0.49999);
    aday4=round(popsize*rand+0.49999);

    if popiate(aday1)<popiate(aday2)
        par1=pop(:,aday1);
    else
        par1=pop(:,aday2);
    end
    if popiate(aday3)<popiate(aday4)
        par2=pop(:,aday3);
    else
        par2=pop(:,aday4);
    end
    else
    % Secim operatoru = rasgele 2 birey secimi
    par1=pop(:,round(popsize*rand+0.49999));
    par2=pop(:,round(popsize*rand+0.49999));
    end

child1=zeros(3,1);
child2=zeros(3,1);

% Ayrık çaprazlama
for j=1:1:3
    if 0.5<rand
        child1(j)=par1(j);
    else
        child1(j)=par2(j);
    end
end
for j=1:1:3
```

```
    if 0.5<rand
        child2(j)=par1(j);
    else
        child2(j)=par2(j);
    end
end

% Mutasyon
mutr=0.5*(1-(dongu/gen).^(0.25));

child1=child1+[mutr*range1/100*randn;mutr*range2/100*randn;mutr*rang
e3/100*randn];
child2=child2+[mutr*range1/100*randn;mutr*range2/100*randn;mutr*rang
e3/100*randn];


% Olusan cocuklardan iyi olanın secimi
child1fit=my_fun(child1);
child2fit=my_fun(child2);

if child1fit<=child2fit
    child=child1;
    childfit=child1fit;
else
    child=child2;
    childfit=child2fit;
end

% Eski populasyonun en kotu bireyinin iyi cocukla degistirilmesi
enkotu=find(popiate == max(popiate));
enkotu=max(enkotu);

pop(:,enkotu)=child;
popiate(:,enkotu)=childfit;

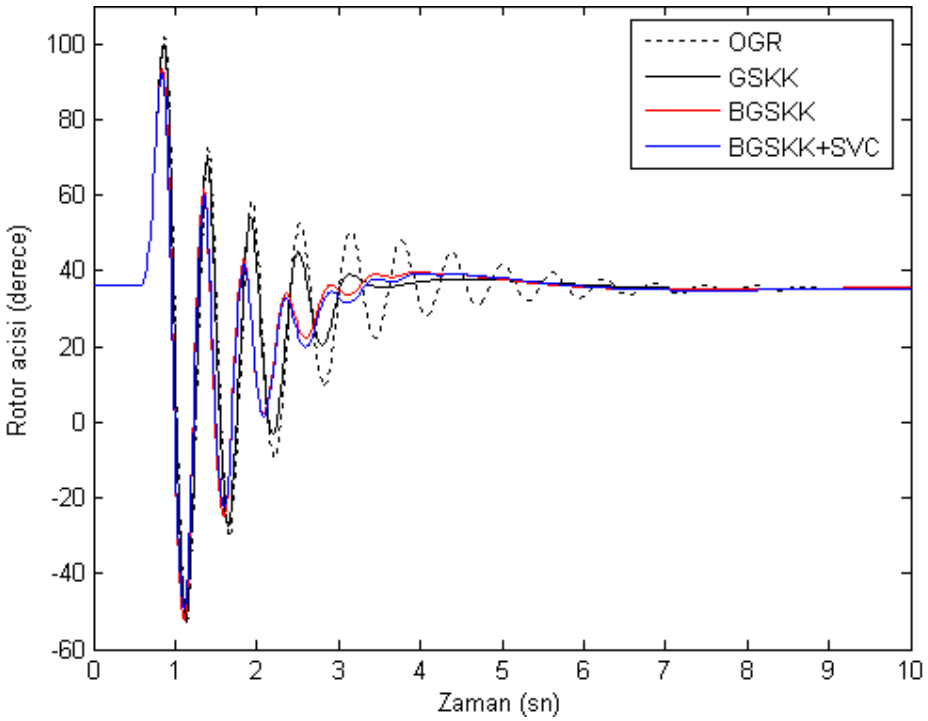
% Yeni populasyon icin uygunluk degerleri hesabı.
eniyi=find(popiate == min(popiate));
eniyi=min(eniyi);

dongu
enguzelsonuc=[pop(:,eniyi);popiate(eniyi)]

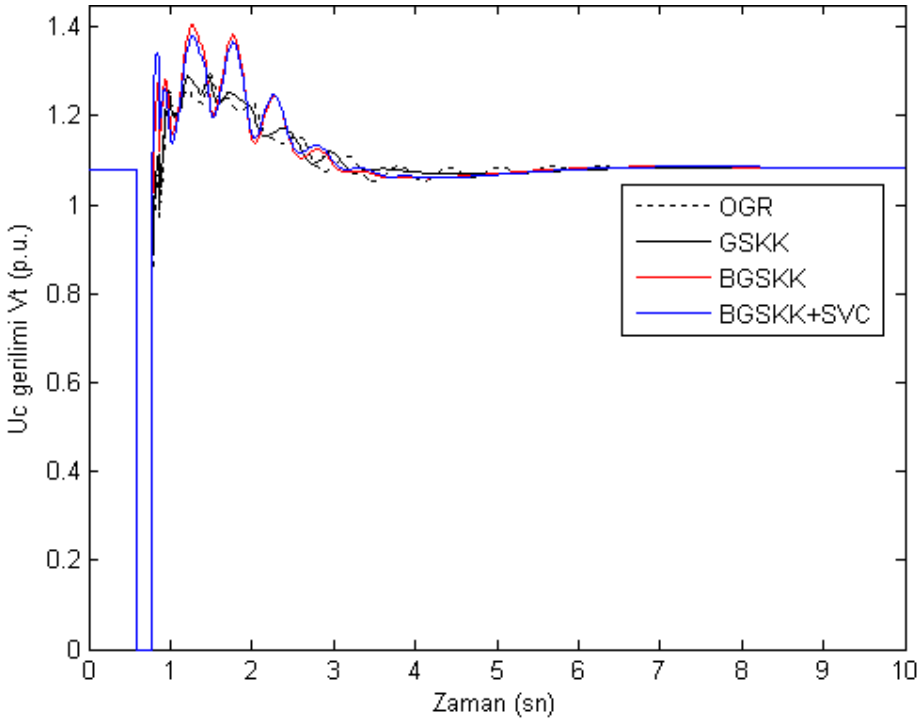
sonucgrafy(dongu)=1/popiate(eniyi);

end  % Jenerasyon dongusu sonu
enguzelsonuc=[pop(:,eniyi);popiate(eniyi)];
```

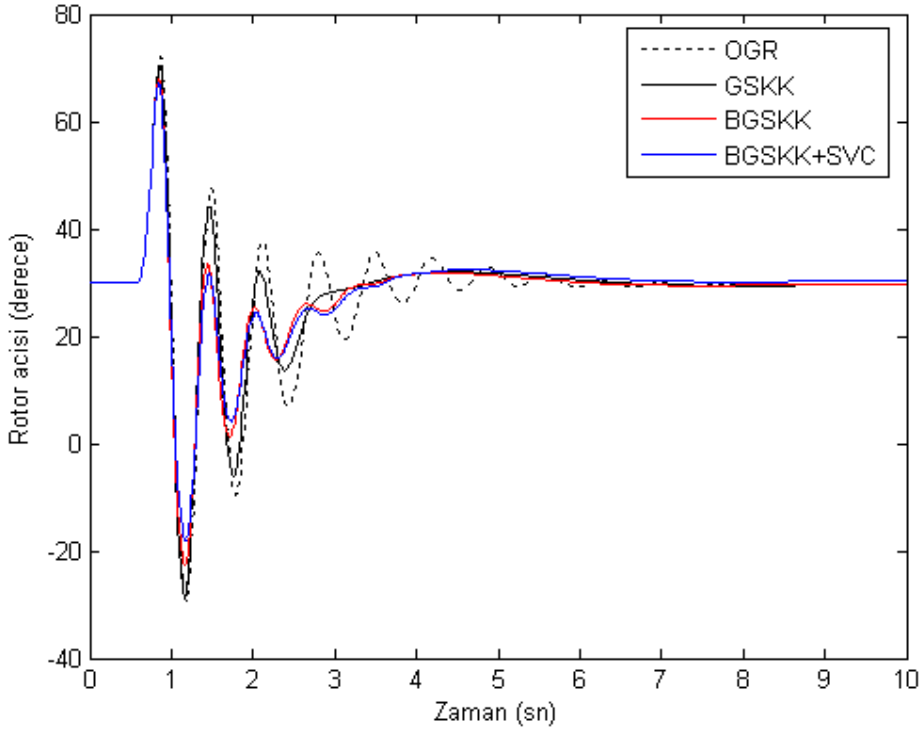
EK-D : FARKLI YÜK DURUMLARINDA KONTROLÖR DAVRANIŞLARI



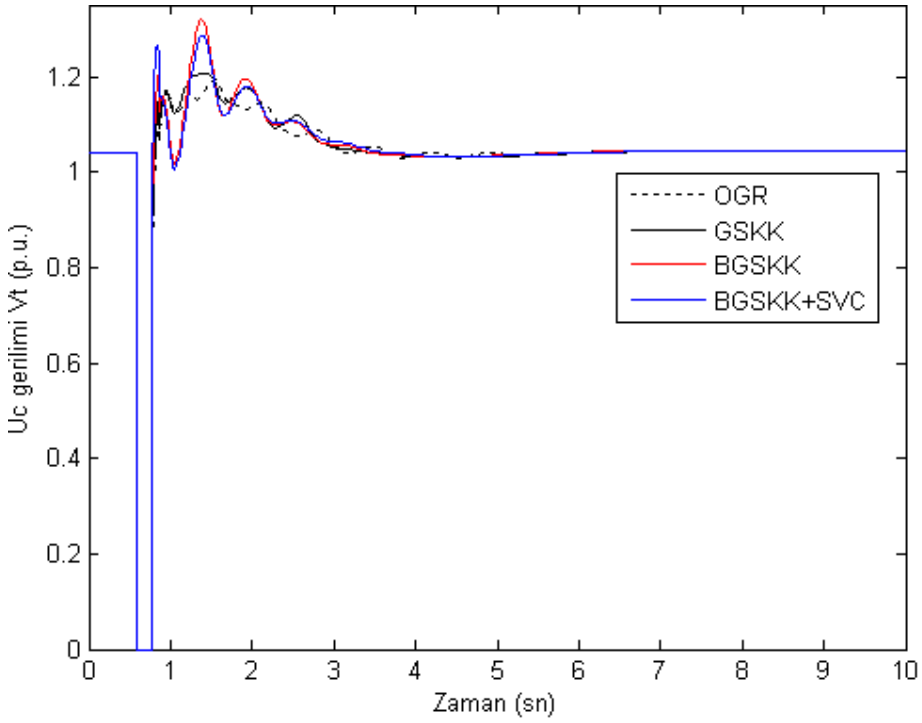
Şekil D.1: P=0,6 p.u., Q=0,4 p.u. orta endüktif yük durumunda rotor açısı değişimi



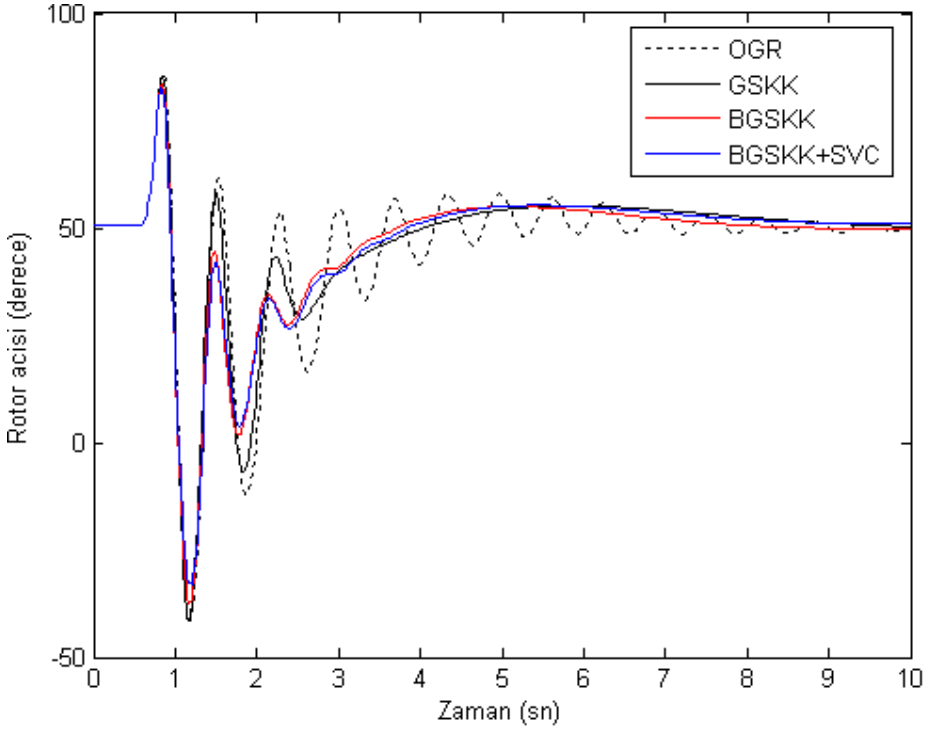
Şekil D.2: P=0,6 p.u., Q=0,4 p.u. orta endüktif yük durumunda uç gerilimi değişimi



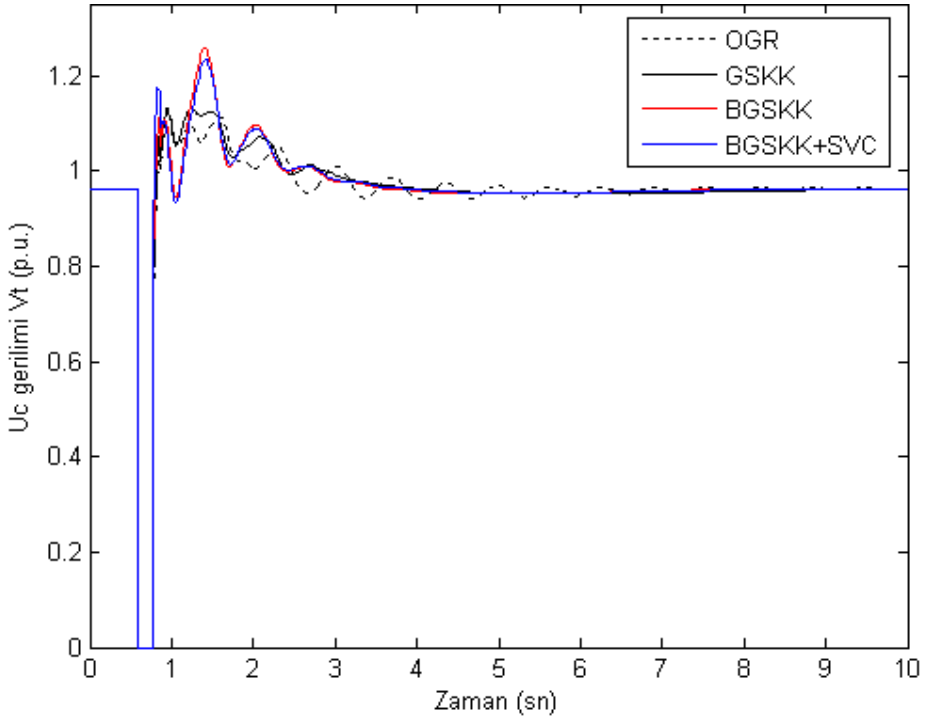
Şekil D.3: P=0,4 p.u., Q=0,2 p.u. hafif endüktif yük durumunda rotor açısı değişimi



Şekil D.4: P=0,4 p.u., Q=0,2 p.u. hafif endüktif yük durumunda uç gerilimi değişimi



Şekil D.5: P=0,4 p.u., Q=-0,2 p.u. hafif kapasitif yük durumunda rotor açısı değişimi



Şekil D.6: P=0,4 p.u., Q=-0,2 p.u. hafif kapasitif yük durumunda uç gerilimi değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Fatih Küçüktezcan 17 Haziran 1983'te Almanya'da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Şişli Terakki Lisesi'nde tamamladı. 2001 yılında girdiği İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Lisans Programı'nı 2005 yılında tamamladı. Aynı yıl içerisinde İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na girdi ve Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı.