

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİYERARŞİK FUZZY YÖNTEMİYLE
SENKRON GENERATÖRLERDE UYARTIM KONTROLÜ**

Elektrik Yük. Müh. Murat CANER

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 18 Eylül 2006
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nurettin UMURKAN (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Celal KOCATEPE (YTÜ)
: Prof. Dr. Burhanettin CAN (MÜ)
: Prof. Dr. Fahrettin ARSLAN (İÜ)
: Doç. Dr. İbrahim ŞENOL (YTÜ)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Güç Sistemi Üretim Birimi Kontrolleri	1
1.1.1 Uyarım Kontrol Sistemi	2
1.2 Literatür Özetleri	3
1.2.1 Klasik PSS 'in Tarihi ve Uyarım Kontrol Çalışmalarında Kullanılması	3
1.2.2 PID PSS Kullanılarak Yapılan Uyarım Kontrol Çalışmaları	9
1.2.3 Fuzzy PSS (FPSS) Kullanılarak Yapılan Uyarım Kontrol Çalışmaları	10
1.2.4 Hibrit Algoritmalar ve PSS Kullanılarak Yapılan Uyarım Kontrol Çalışmaları ..	13
1.3 Literatür Taramasının Değerlendirilmesi	18
1.4 Çalışmanın Amacı	19
1.5 Kullanılan Yöntem	20
1.6 Bölümlerin Özetleri	21
2. GÜÇ SİSTEMLERİNİN YAPISI	23
2.1 Ülkemizdeki Güç Sistemi Yapısı	25
2.2 Senkron Generatörler	26
2.3 Güç Sistemi Dizaynı	30
2.4 Generatör Kontrolleri	31
2.4.1 Generatör Kontrol Çevrimleri	32
3. UYARTIM SİSTEMLERİ	34
3.1 Uyarım Sistemlerinin Çeşitleri	35
3.2 Uyarıcı	38
3.3 Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR)	38
3.4 Gerilim Transdüseri ve Yük Kompanzatorü	38
3.5 Güç Sistem Stabilizatörü (PSS)	39
3.6 Sınırlayıcı ve Koruma Devreleri	41
3.6.1 Uyarım Sistemlerindeki Son Gelişmeler ve Gelecekteki Beklentiler	42
4. MODELLEME	43
4.1 Senkron Makinelerin Dinamik Davranışları	43
4.2 Senkron Generatör Modelleri	44
4.3 Geçici Hal Kararlılığı Açısından SMIB Sistemi	47
4.3.1 Eşdeğer Alan Kriteri	52
4.3.2 Geçici Hal Kararlılığı İçin Uyarım Kontrolü	54
4.4 Küçük Sinyal Kararlılığı Açısından SMIB Sistemi	54

4.4.1	Klasik Model (Hareket denklemi modeli)	57
4.4.2	Geçici Hal Reaktansı (X'_d) Arkasındaki Değişken Gerilim (E'_q) Modeli-AVR siz60	
4.4.3	Geçici Hal Reaktansı (X'_d) Arkasındaki Değişken Gerilim (E'_q) Modeli-AVR ile63	
4.5	Yapılan Çalışmalarda Kullanılan Güç Sistem Modelleri	64
5.	ÖRNEK SİSTEM ÜZERİNE UYGULAMALAR.....	68
5.1	Üzerinde Çalışılan ve İlave Kontrolör İçermeyen Güç Sistem Modelinin Dinamik Davranışının İncelenmesi ve Simulasyonu.....	68
5.1.1	Model ve Simulasyon Parametreleri.....	72
5.1.2	Bozucu Etki Yeri, Zamanı ve Şiddeti	74
5.1.3	Performans Değerlendirmesi İçin Gözlenen Parametreler	74
5.1.4	İşletim Koşulları	75
5.1.5	Sistem Performansının Sayısal Olarak Değerlendirilmesi	76
5.2	Kontrol Metodları	77
5.3	SMIB Modeli Üzerinde PSS Kontrolörünün İlave Kontrolör Olarak Kullanılması78	
5.4	Kullanılan PID Kontrol Yöntemi	81
5.5	SMIB Modeli Üzerinde PID Kontrolörünün İlave Kontrolör Olarak Kullanılması81	
5.6	Fuzzy Sistemlerinin Çeşitleri.....	85
5.7	Mamdani Tipi Fuzzy Sistemi	85
5.8	Uygulamada Kullanılan Mamdani Tipi FLC (FPSS)' nin Tasarımı	86
5.9	SMIB Modeli Üzerinde Fuzzy Kontrolörün İlave Kontrolör Olarak Kullanılması90	
6.	ÖNERİLEN KONTROL SİSTEMİNİN UYGULAMASI.....	93
6.1	Sugeno (TSK) Tipi Fuzzy Sistemi.....	93
6.2	Uyarlanabilir Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) Mimarisi .	94
6.2.1	ANFIS Ağında Kullanılan Hibrid Öğrenme Algoritması.....	97
6.2.1.1	İleri Yön Geçiş Aşamasında Sonuç Parametrelerin Güncellenmesi	98
6.2.1.2	Geri Yön Geçiş Aşamasında Öncül Parametrelerin Güncellenmesi	99
6.3	Önerilen Yöntem (Hiyerarşik Fuzzy Kontrol Yöntemi).....	99
6.4	Uygulamada Kullanılan HFK (HFPSS) 'ün Tasarımı	103
6.5	SMIB Modeli Üzerinde Önerilen Hiyerarşik Fuzzy Kontrolörün İlave Kontrolör Olarak Kullanılması.....	107
7.	SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	110
7.1	Sonuçların Karşılaştırılması	110
7.1.1	Simulasyon Sonuçları	110
7.1.2	Bozucu Etkinin Adım Fonksiyonu Şeklinde Uygulanması	110
7.1.3	Sayısal Performans Sonuçları	115
7.1.3.1	Çalışma Durumlarına Göre.....	115
7.1.3.2	Gözlenen Çıkış Parametrelerine Göre	117
7.2	Değerlendirme	119
7.3	Öneriler	121
	KAYNAKLAR.....	122
	EKLER	131
	Ek 1 Matlab m_file ana programı ve kontrol yöntemlerinin uygulanarak sayısal ve grafiksel sonuçların elde edildiği alt programlar	131
	ÖZGEÇMİŞ.....	142

SİMGE LİSTESİ

D	Sönüm katsayısı
ddelta	Güç/yük açısının türevi
ddu	İlk fuzzy altsistemin çıkışının türevi
ddw	Senkron generatör açısal hızının türevi
delta	Güç/yük açısı
dTe	Elektriksel çıkış momentinin türevi
du	İlk fuzzy altsistemin çıkışı
dvt, $\Delta\dot{V}t$	Çıkış geriliminin türevi
dw	Senkron generatörün açısal hızı
e	Hata işareti
E	Dönen kısımda depolanan kinetik enerji
E'	Transient reaktans gerisindeki transient iç emk
E _f	Uyartım emk'sı (uyartım gerilimi V _f ile orantılı)
E _{FD}	Generatör alan gerilimi
E' _d	Yuvarlak rotorlu generatörde geçici hal iç emk d eksenini bileşeni (çelik rotor gövdesi q eksenini akısıyla orantılı)
E' _q	Geçici hal iç emk q eksenini bileşeni (alan sargısı akısıyla orantılı)
E'' _d	Geçici hal öncesi iç emk q bileşeni (d eksenini damper sargısı ve alan sargısındaki toplam akı ile orantılı)
E'' _q	Geçici hal öncesi iç emk q bileşeni (q eksenini damper sargısı ve q eksenini çelik rotor gövdesindeki toplam akı ile orantılı)
G _u	Ziegler Nichols yöntemine göre elde edilen kazanç değeri
H	Atalet (eylemsizlik) sabiti
I _d , I _q	Armatür akımı d ve q eksenini bileşenleri
J	Eylemsizlik momenti
K ₁	Senkronlama moment katsayısı
k1	Birinci fuzzy altsistemde her iki giriş değişkeninin üyelik fonksiyonlarındaki küme sayıları
K ₂	Alan akımı değişimi ile elektriksel moment değişiminin ilişkisini belirten katsayı
k2	İkinci fuzzy altsistemde her iki giriş değişkeninin üyelik fonksiyonlarındaki küme sayıları
K ₃	Empedans faktörü parametresi
K ₄	Yük açısı değişimi ve K ₃ yoluyla alan akı değişimi arasındaki bağlantıyı yapan katsayı
K ₅ , K ₆	SMIB sistemine alan devresi dinamiklerinin ilavesiyle oluşan linearizasyon sabitleri
K _A , K _a , K _{ae}	Gerilim regülatörü içerisindeki yükseltici bloğu kazanç sabiti
K _{c1}	FPSS kontrolöründe kontrolör çıkış değişkeni için ölçekleme katsayısı
K _{c2}	HFPSS kontrolöründe kontrolör çıkış değişkeni için ölçekleme katsayısı
K _D	Sönümleme momenti katsayısı
K _{de}	FPSS kontrolöründe açısal hızın türevi giriş değişkeni için ölçekleme katsayısı
K _e	FPSS kontrolöründe açısal hız giriş değişkeni için ölçekleme katsayısı
K _E , T _E	DC uyarıcının kazancı ve zaman sabiti
K _f	HFPSS kontrolöründe ilk fuzzy altsistem çıkışı için ölçekleme katsayısı
K _F , T _F	Uyartım sistem stabilizatörünün kazancı ve zaman sabiti
K _g	HFPSS kontrolöründe ilave kontrolör değişkeni için ölçekleme katsayısı
K _p , K _i , K _d	PID kontrolörün oransal, integral ve türevsel kazanç sabitleri

K_S	Senkronlama momenti katsayısı
K_{stab}	PSS'in kazanç sabiti
m	Her fuzzy giriş değişkeni için tanımlanan üyelik fonksiyonundaki fuzzy küme sayısı
M	Atalet (eylemsizlik) sabiti
M	Açısal momentum
m	Her fuzzy giriş değişkeni için tanımlanan üyelik fonksiyonundaki küme sayısı,
n	Kontrolör giriş değişkeni sayısı
$O_{l,i}$	Anfis mimarisinde i_{nci} kurala ait l katmanı çıkışı
P_e	Elektromanyetik hava-aralığı gücü
P_m	Generatör birincil hareketlendirici (türbin) tarafından sağlanan mekanik güç
P_u	Ziegler Nichols yöntemine göre elde edilen peryot değeri
R	Generatör armatür (stator) sargı direnci
S	Generatör görünür gücü
S_1	Öncül parametreler
S_2	Sonuç parametreleri
t	Zaman
T_1, T_2, T_3, T_4	PSS içerisindeki dinamik kompanzatorün zaman sabitleri
T_3	Yüklü durumdaki alan zaman sabiti
T_A, T_a, T_{ae}	Gerilim regülatörü içerisindeki yükseltici bloğu zaman sabiti
T_B, T_C	Gerilim regülatörü içerisindeki TGR'ye ait zaman sabitleri
T_e	Generatörden alınan elektriksel çıkış momenti
T_m	Generatöre verilen mekanik giriş momenti
T_R	Gerilim transdüseri zaman sabiti
T_w	PSS içerisindeki sinyal temizleyici bloğunun zaman sabiti
T'_{d0}, T''_{d0}	Açık devre d eksenine geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri
T'_{q0}, T''_{q0}	Açık devre q eksenine geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri
V_b	Sonsuz bara gerilimi
V_C	Gerilim transdüserinin çıkışı
V_d, V_q	Generatör çıkış geriliminin d ve q bileşenleri
V_{ERR}	Gerilim hata sinyali
V_F	Uyartım sistem stabilizatörünün çıkış işareti
$+V_{pss}, -V_{pss}$	PSS içerisindeki sınırlayıcı bloğu katsayıları
V_R	Gerilim regülatörü çıkış işareti
V_{REF}, V_{ref}	Referans gerilim değeri
V_{RMAX}, V_{RMIN}	Yükseltici çıkışında kullanılan doyma limitleri
V_S	PSS'in çıkış işareti, stabilize edici sinyal
V_T, V_t	Senkron generatör çıkış gerilimi
V_X	Uyartım gerilimindeki nonlinear fonksiyon
w_i	i kuralının etkinlik derecesi
\bar{w}_i	i kuralının normalize edilmiş etkinlik derecesi
X_e, x_e	Generatörün sonsuz baraya bağlandığı reaktans
X_d, X'_d, X''_d	d eksenine senkron, geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları
X_q, X'_q, X''_q	q eksenine senkron geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları
ω	Generatörün açısal hızı
ω_0	Generatör milinin açısal dönüş hızı, senkron hız
ω_e	Elektriksel açısal dönüş hızı
ω_m	Mekanik açısal dönüş hızı

ω_n	Doğal frekans
ω_s	Senkron açısal hız
δ	Güç (rotor) açısı (sonsuz baraya göre)
δ_0	Salınım yapan güç/yük açısının ilk değeri
δ_l	Salınım yapan güç/yük açısının yeni kararlı hal değeri
δ_m	Salınım yapan güç/yük açısının maksimumu
f_i	Sugeno tipi fuzzy sisteminin çıkış fonksiyonu
$\Delta\omega$	Açısal hız değişimi , Rotor hız sapması
$\Delta\delta$	Güç/Yük açısı değişimi
ΔT_e	Elektriksel çıkış momenti değişimi
ΔT_m	Mekanik giriş momenti değişimi
ΔU_{pss}	PSS çıkış işareti
ζ	Sönüm katsayısı
η	Öğrenme oranı
θ	Sonuç parametrelerinin güncellenmesinde bilinmeyen vektör
θ	Generatör milinin dönme açısı, açısal konum değiştirme miktarı
θ_e	Elektriksel olarak taranan açı
θ_m	Kutup başının taradığı açı
$\mu_{A_i}(x)$	x girişine ait üyelik derecesi
$\mu_{B_i}(y)$	y girişine ait üyelik derecesi

KISALTIMA LİSTESİ

AC	Alternating Current (Alternatif Akım)
ANFIS	Adaptive Neurofuzzy Inference System (Uyarlanabilir Neurofuzzy Kontrol Sistemi)
AVR	Automatic Voltage Regulator (Otomatik Gerilim Regülatörü)
CPSS	Conventional Power System Stabilizer (Geleneksel Güç Sistem Stabilizatörü)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
d-ekseni	direct axis, (boyuna eksen)
DFLR	Desensitized Four Loops Regulator (Hassasiyeti azaltılmış dört çevrimli regülatör)
EMK	Elektromotor Kuvvet
ESS	Excitation System Stabilizer (Uyartım Sistem Stabilizatörü)
FACTS	Flexible AC Transmission System (Esnek AC İletim Sistemleri)
FBN	Fuzzy Basis Function Network (Fuzzy Tabanlı Fonksiyon Ağı)
FL	Fuzzy Logic (Fuzzy Lojik)
FLC	Fuzzy Logic Controller (Fuzzy Lojik Kontrolör)
FPSS	Fuzzy Power System Stabilizer (Fuzzy Güç Sistem Stabilizatörü)
HFK	Hiyerarşik Fuzzy Kontrolör
IECE	Integral of Error-Multiplied Change-in-Error (Performans Değerlendirme Ölçütü)
ITSE	Integral of Time-Multiplied Square-Error (Performans Değerlendirme Ölçütü)
LSE	Least Squares Error (En Küçük Kareler Tahmini)
MMPS	Multi Machine Power System, (Çok makineli güç sistemi)
NETS	New England Test System
NYPS	New York Power System
OLS	Orthogonal Least Squares (Ortogonal En Küçük Kareler)
PC	Personal Computer, (Kişisel bilgisayar)
PID	Proportional-Integral-Derivative (Oransal-Integral-Türevsel)
PSO	Particle Swarm Optimization
PSS	Power System Stabilizer (Güç Sistem Stabilizatörü)
q-ekseni	quadrature axis, (enine eksen)
RBFN	Radial Basis Function Network, (Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları)
SISO	Single Input Single Output (tek giriş-tek çıkışlı)
SMIB	Single Machine Infinite Bus System (Tek Malinalı Sonsuz Baraya Bağlı Sistem)
SVC	Statik VAR Kompansatör
TGR	Transient Gain Reduction (Geçici Kazanç Azaltım Bloğu)
TS	Tabu Search
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Tipik bir güç sistemi şeması (Kundur, 1994).....	24
Şekil 2.2 İki kutuplu senkron generatör yapısı (a) Çıkık kutuplu (b) Yuvarlak rotorlu (Ryff, 1988).....	27
Şekil 2.3 Senkron generatör rotor döner manyetik alanı ve endüklediği gerilim (Ryff, 1988)	28
Şekil 2.4 Fırçasız uyarıcılı AC uyartım sistemi (Ryff, 1988).....	30
Şekil 2.5 Frekans kontrol ve uyartım kontrol çevrimleri (Elgerd, 1982).....	33
Şekil 3.1 Uyartım kontrol sisteminin fonksiyonel blok diyagramı (Kundur, 1994).....	36
Şekil 3.2 Uyartım kontrol sisteminin tipik bir modeli.....	37
Şekil 3.3 Gerilim transdüseri ve yük kompanzatorü blok diyagramı (IEEE Std., 1992).....	39
Şekil 4.1 Rezistans ihmal edildiği durumda senkron generatör eşdeğer devreleri (a) d-ekseni (b) q-ekseni (Machowski vd., 1997).....	45
Şekil 4.2 Hareket denklemi modeli (Enel4ssh2, 2005).....	49
Şekil 4.3 Güç-açı eğrisi üzerinde eşdeğer alan kriteri gösterimi (Enel4ssh2, 2005).....	51
Şekil 4.4 Generatörün elektriksek çıkış momenti-açı ilişkisi (Enel4ssh2, 2005).....	55
Şekil 4.5 Sonsuz baraya X_c reaktansı üzerinden bağlı senkron generatör (Enel4ssh2, 2005)	57
Şekil 4.6 Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi blok diyagramı (Enel4ssh2, 2005)	59
Şekil 4.7 Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi basitleştirilmiş blok diyagramı (Enel4ssh2, 2005).....	60
Şekil 4.8 Geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli (AVR'siz) (Enel4ssh2, 2005).....	61
Şekil 4.9 Geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli (AVR'li) (Enel4ssh2, 2005).....	63
Şekil 5.1 İlave kontrolör içermeyen sistem modeli.....	68
Şekil 5.2 İlave kontrolör içermeyen sistem modeli simulink gösterimi (Bozucu etki T_m girişinde).....	69
Şekil 5.3 İlave kontrolör içermeyen sistem modeli simulink gösterimi (Bozucu etki V_{ref} girişinde).....	69
Şekil 5.4. D sönüm oranının arttırılması $D1=2$ $D2=10$	70
Şekil 5.5. D sönüm oranının azaltılması $D1=2$ $D2=0$	70
Şekil 5.6. Frekansın arttırılması $f1=60$ Hz $f2=180$ Hz.....	70
Şekil 5.7. Frekansın azaltılması $f1=60$ Hz $f2=20$ Hz.....	70
Şekil 5.8. KA Uyarım sistemi kazancının arttırılması $KA1=200$ $KA2=400$	70
Şekil 5.9. KA Uyarım sistemi kazancının azaltılması $KA1=200$ $KA2=50$	70
Şekil 5.10. "H" eylemsizlik momentinin arttırılması $H1=5$ $H2=10$	71
Şekil 5.11. "H" eylemsizlik momentinin azaltılması $H1=5$ $H2=2$	71
Şekil 5.12. D sönüm oranının arttırılması $D1=2$ $D2=10$	71
Şekil 5.13. D sönüm oranının azaltılması $D1=2$ $D2=0$	71
Şekil 5.14. Frekansın arttırılması $f1=60$ Hz $f2=180$ Hz.....	71
Şekil 5.15. Frekansın azaltılması $f1=60$ Hz $f2=20$ Hz.....	71
Şekil 5.16. KA Uyarım sistemi kazancının arttırılması $KA1=200$ $KA2=400$	72
Şekil 5.17. KA Uyartım sistemi kazancının azaltılması $KA1=200$ $KA2=50$	72
Şekil 5.18. "H" eylemsizlik momentinin arttırılması $H1=5$ $H2=10$	72
Şekil 5.19. "H" eylemsizlik momentinin azaltılması $H1=5$ $H2=2$	72
Şekil 5.20 Ana pogramın içeriği.....	73
Şekil 5.21 Ana program içinden çalıştırılan alt pogramın içeriği.....	74
Şekil 5.22 "4" nolu çalışma durumu için kontrolör içermeyen modele ait simulasyon sonuçları	76
Şekil 5.23 PSS ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli.....	78
Şekil 5.24 PSS ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli simulink gösterimi.....	79
Şekil 5.25 CPSS Modeli (Gupta vd., 2003).....	79

Şekil 5.26 “4” nolu çalışma durumu için pss ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları .	80
Şekil 5.27 Sistemin ‘Vt’ çıkışındaki sabit genlikli osilasyon ve hesaplanan Gu ve Pu değerleri	81
Şekil 5.28 PID ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli.....	82
Şekil 5.29 PID ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli simulink gösterimi.....	82
Şekil 5.30 “4” nolu çalışma durumu için PID ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları	83
Şekil 5.31 “3” nolu çalışma durumu için PID ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları	84
Şekil 5.32 Fuzzy kontrolör (FPSS) ün giriş ve çıkış değişkenlerine ait ölçekleme katsayıları	86
Şekil 5.33 ‘w’ giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonu	87
Şekil 5.34 ‘dw’ giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonu	87
Şekil 5.35 ‘U _{PSS} ’ çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonu	88
Şekil 5.36 FPSS yapısı ve tasarımda kullanılan kurallar.....	89
Şekil 5.37 FPSS ’e ait kontrol yüzeyi.....	90
Şekil 5.38 Fuzzy kontrolör ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli	90
Şekil 5.39 Fuzzy kontrolör ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli simulink gösterimi	91
Şekil 5.40 “4” nolu çalışma durumu için fuzzy kontrolör ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları.....	92
Şekil 6.1 (a) Birinci dereceden iki girişli ve iki kurallı “Sugeno Bulanık Modeli” (Tip-3) ; (b) Eşdeğer ANFIS yapısı (Tip-3) (Jang, 1996).....	95
Şekil 6.2 HFK ‘nın yapısı (Wang, 1998).....	102
Şekil 6.3 ‘n-1’ adet fuzzy alt sistemden oluşan “n” girişli hiyerarşik fuzzy sistemi (Emara ve Elshafei, 2004).....	103
Şekil 6.4 HFPSS ‘in giriş ve çıkış değişkenlerine ait ölçekleme katsayılarının gösterimi.....	104
Şekil 6.5 Hiyerarşik Fuzzy kontrolörün ikinci fuzzy altsistem tasarımda kullanılan kurallar	106
Şekil 6.6 İkinci fuzzy altsisteme ait kontrol yüzeyi.....	107
Şekil 6.7 Hiyerarşik Fuzzy kontrolör ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli.....	108
Şekil 6.8 Hiyerarşik Fuzzy kontrolör ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli simulink gösterimi	108
Şekil 6.9 “4” nolu çalışma durumu için HFK ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları	109
Şekil 7.1 ‘Vt’ çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması.....	111
Şekil 7.2 ‘Delta’ çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması.....	111
Şekil 7.3 ‘Te’ çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması	112
Şekil 7.4 ‘Δω’ çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması	112
Şekil 7.5 Bozucu etki tipinin adım fonksiyonu olması durumunda 4 nolu çalışma durumu için a)Çıkış gerilimi b)Güç açısı c)Elektriksel çıkış Momenti d)Açısal hız parametrelerinin simulasyon sonuçları	114
Şekil 7.6 ‘1’ nolu çalışma durumunda üç farklı kontrolörün ‘ΔVt’ parametresi üzerindeki performansı	115

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Literatürdeki Hiyerarşik Fuzzy Yöntemiyle İlgili Çalışmalar	21
Çizelge 3.1. Standart hale getirilmiş uyarıcı modelleri (IEEE Std., 421.5-1992)	35
Çizelge 5.1 Sistem parametreleri için kullanılan değerler	72
Çizelge 5.2 Simulasyon parametreleri	74
Çizelge 5.3 Simulasyonlarda kullanılan dört farklı çalışma durumuna ait parametreler	75
Çizelge 5.4 İlave kontrol içermeyen sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri	77
Çizelge 5.5 CPSS Parametreleri (Gupta vd., 2003)	79
Çizelge 5.6 İlave Kontrol olarak PSS İçeren Sistem Modelinde (15-24s arası) IAE değerleri	80
Çizelge 5.7 Ziegler Nichols yöntemine göre hesaplanan PID katsayı değerleri	81
Çizelge 5.8 PID kontrolör içeren sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri	84
Çizelge 5.9 CPSS simulasyonundan Fuzzy üyelik fonksiyonları sınır değerlerinin tahmini	86
Çizelge 5.10 Fuzzy PSS için kullanılan ölçekleme katsayıları	87
Çizelge 5.11 FPSS 'e ait kural tablosu	89
Çizelge 5.12 Fuzzy kontrolör içeren sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri	92
Çizelge 6.1 Giriş değişkeni olarak kullanılabilir 9 sinyal	104
Çizelge 6.2 HFK tasarımından kullanılabilir giriş değişken kombinasyonları	105
Çizelge 6.3 İkinci fuzzy altsisteme ait kural tablosu	107
Çizelge 6.4 Hiyerarşik fuzzy yapısında kullanılan ölçekleme katsayıları	107
Çizelge 6.5 HFK içeren sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri	109
Çizelge 7.1 '1' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri	115
Çizelge 7.2 '2' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri	116
Çizelge 7.3 '3' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri	116
Çizelge 7.4 '4' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri	117
Çizelge 7.5 ΔV_t parametresi için IAE performans değerleri	117
Çizelge 7.6 $\Delta \delta$ parametresi için IAE performans değerleri	118
Çizelge 7.7 ΔT_e parametresi için IAE performans değerleri	118
Çizelge 7.8 $\Delta \omega$ parametresi için IAE performans değerleri	118

ÖNSÖZ

Yapmış olduğum bu çalışmada desteklerini esirgemeyen danışman hocam Doç.Dr. Nurettin UMURKAN 'a ve çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen değerli hocam Doç.Dr. Hasan ÇİMEN 'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam boyunca manevi desteğini esirgemeyen rahmetli babam, annem, eşim, kızım ve sevimli oğluma da en içten teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Çok sayıda generatör ve enerji üretim santrallerinin birlikte çalıştığı enterkonnekte sistemlerde, güç arzı ve talebinde oluşan sürekli değişimler generatörlerin senkronizasyonunu ve kararlılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Çeşitli nedenlerle oluşan bozucu etkilerden dolayı açısız hızda ve rotor açısında düşük frekanslı salınımlar meydana gelmektedir. Enerji üretim sistemlerindeki koruma ve kontrol sistemlerinin performansının artırılması enerjinin kaliteli ve minimum maliyetle üretilmesi için gereklidir.

Enerji üretim kontrollerinin performansının artırılması için son elli yıldır birçok yöntem ve kontrol teorisi ortaya atılmıştır. Bu çalışmaların birçoğunda, klasik kontrol metotları veya daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırma yapılarak önerilen kontrol metotlarının performanslarının test edilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada enerji üretim kontrollerinden biri olan uyartım kontrol sisteminin dinamik performansının artırılması amaçlanmıştır. Bunun için literatürde kullanılan kontrol yöntemleri araştırılarak daha önce bu alana uygulanmamış ve performansı test edilmemiş yeni bir kontrol metodu olarak “hiyerarşik fuzzy kontrol metodu” bulunmuştur. Ve bu metodun uyartım kontrol sistemi bileşenlerinden güç sistem stabilizatörüne uygulanması düşünülmüştür.

Önerilen metodun kontrol performansı tek makineli sonsuz baraya bağlı sistem modeli üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarıyla geleneksel güç sistem stabilizatörü, PID ve iki girişli klasik fuzzy kontrolör ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Simülasyon çalışmaları için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır.

Önerilen yöntemde ilave edilen üçüncü giriş değişkeninin kontrolör performansına olumlu etki sağladığı simülasyon sonuçlarıyla gösterilmiştir. Bu metodun öne çıkan avantajı ikiden fazla girişe sahip klasik fuzzy kontrol uygulamalarındaki kural patlama probleminin önüne geçilmesidir. Toplam kural sayısı kullanılan üçüncü giriş değişkenine rağmen üstel olarak değil lineer olarak artış göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Uyartım kontrolü, Hiyerarşik fuzzy kontrol, Güç sistem stabilizatörü, Senkron Generatör, Tek makineli sonsuz baraya bağlı sistem

ABSTRACT

In interconnected power systems, non-stable trend of power consumption significantly affects the stabilization and synchronization of the generators. Various disturbances in power systems result in rotor angle and speed oscillations. Since the frequency of these oscillations is lower than power network frequency they are termed as low frequency oscillations. The protection and control performance improvement in power generation systems is of vital importance in order to produce high electric power quality with low cost.

To increase the performance of the energy production controllers, various methods and control theories have been developed for the last 50 years. In most of these studies, the performance of the proposed methods has been tested via comparing with classical control methods and/or previously studied systems.

In this study, dynamic performance of excitation control system that is an important component for power generation is improved. For this reason, hierarchical fuzzy control method which has not been previously applied in excitation control systems is preferred as a novel control method. This control method is thought to applied power system stabilizer that is component of excitation control system.

The performance of the proposed method is tested for single machine infinite bus system and compared to conventional power system stabilizer, PID controller and standard fuzzy controller. For simulation purposes Matlab/SIMULINK software has been used.

In proposed method positive impact of additional third input variable to controller performance is shown in simulation. Noticeable advantage of this method is to avoid rule explosion phenomena in fuzzy control applications which has more than two input. As a result, the total number of rule increases linearly (not exponentially) in spite of using the third input variable.

Keywords: Excitation control, Hierarchical fuzzy control, Power system stabilizer, Synchronous generator, Single machine infinite bus system

1. GİRİŞ

Modern güç sistemleri oldukça kompleks sistemlerdir ve yüksek nonlineerlik özelliğine sahiptirler. Çalışma durumları da oldukça geniş bir aralıkta değişim gösterir. Üretim ünitelerinin büyüklüklerinin artması dolayısıyla iletim hatlarındaki yüklenmenin de artması ve yüksek hızlı uyartım sistemlerinin kullanılması enerji üretim birimlerindeki kararlılığı etkileyen ana nedenlerdir. Dinamik yük değişimleri ve kontrolör etkileriyle sistemin enerji üretim kapasitesini etkileyen küçük salınımlar oluşmaktadır. Enerji üretim birimi kontrollerinden uyartım kontrol sistemlerinin önemli bir parçası olan geleneksel güç sistem stabilizatörleri bu küçük salınımların sönümlemesinde kullanılırlar. Bu şekilde aynı zamanda güç üretim sistemlerinin en önemli elemanı olan senkron generatörlerin de kararlılığı arttırılmaktadır. Bu stabilizatörlerin dizaynı için belirli bir çalışma noktası civarında lineerize edilmiş sistem modeli kullanılır. Basit bir yapıya sahip geleneksel güç sistem stabilizatörlerinde sabit parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler belirli bir çalışma noktası civarında ayarlandığından bu nokta civarında iyi bir performansa sahiptirler. Bu çalışma durumu dışında optimal performansı garanti etmezler. Bununla beraber hatanın ve türevinin lineer kombinasyonlarını kullanarak çalışan bu stabilizatörler nonlineerliği yüksek olan güç sistemlerinde çok iyi sonuç vermeyebilirler. Bu nedenle güç sistemlerinde küçük ve büyük bozucu etkilere karşı sistem performansını iyileştirerek, küçük sinyal ve geçici hal kararlılığını arttıracak yeni kontrol yöntemleri üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda ise geleneksel güç sistem stabilizatörlerine göre daha üstün performans sağlayan alternatif kontrolörler önerilmiştir. Bu önerilen alternatif kontrolörlerin dizaynında ise genellikle son yıllarda ortaya atılan akıllı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır.

1.1 Güç Sistemi Üretim Birimi Kontrolleri

Senkron generatörü doğrudan etkileyen kazan, hız regülatörü ve uyartım kontrolü olmak üzere üç temel sistem vardır. Toplam türbin ve generatör kayıplarının toplamı, toplam çıkışla karşılaştırıldığında oldukça az küçüktür. Bu da kabul edilebilir bir toleranstır. Yani enerji üretim ünitesinin kayıpları ihmal edilirse buhar olarak gelen toplam güç, generatör çıkışlarından elektriksel güç olarak alınır. Otomatik hız regülatörü türbine iletilen buhar miktarını kontrol eder. Uyartım sistemi generatörün ürettiği elektromotor kuvvetini kontrol eder. Bu şekilde sadece çıkış gerilimi değil, aynı zamanda güç faktörü ve akımın genliği de kontrol edilmiş olur (Borges vd., 2001).

Güç üretim sistemlerinde üretimle ilgili kontroller temel olarak hız kontrolü ve gerilim kontrolü olarak sınıflandırılabilir. Hız kontrolü literatürde yük frekans kontrolü veya otomatik

üretim kontrolü olarak, gerilim kontrolü ise uyarım kontrolü veya reaktif güç kontrolü olarak isimlendirilmektedir. Bunlardan ikincisi yani gerilim, uyarım ve reaktif güç kontrolünü gerçekleştiren sisteme Otomatik Gerilim Regülatörü denir.

Otomatik gerilim ve frekans kontrolleri generatör çıkış gerilim ve frekansını kontrol ederek bunları önceden belirlenmiş değerlerinde sabit tutar. Türbin ve buhar valfleri gibi mekanik sistemlerle bağlantılı olan çalışma şekli ve iş döngüsü nedeniyle frekans kontrolörü gerilim regülatöründen daha yavaştır.

Gerilim ve frekans kontrol kalitesinin artırılması yöntemiyle güç sistemlerinde kararlılığın artırılması için yapılan çalışmalar halen sürdürülmektedir. Güç sistem kontrol tasarımındaki en önemli iş, elektrik güç sisteminin büyük ve ani bir hata karşısında senkronizasyonunu kaybetmemesi ve hata sonrasında generatör çıkış geriliminde çok iyi bir regülasyonun sağlanmasıdır.

1.1.1 Uyarım Kontrol Sistemi

Günümüzdeki sistemlerin çoğunda uyarıcı olarak ya generatörle aynı mil üzerindeki buhar türbini tarafından ya da indüksiyon motoru tarafından sürülen bir DC generatör kullanılır. Doğrultucu veya tristör içeren ve AC bara veya bir alternatörden beslenen yarı iletken uyarım sistemlerinin sayısı da giderek artmaktadır (Borges vd., 2001).

Güç sistemleri açısından uyarım sistemi, etkin bir gerilim kontrolü sağlanmasına ve sistem kararlılığının artırılmasına katkıda bulunmalıdır. Ani bir bozucu etkiye olan hızlı cevap verme kapasitesi geçici hal ve küçük sinyal kararlılığının artırılmasının bir göstergesidir (Anderson ve Fouad, 1994).

Gerilim regülatörü gerilim seviyesini hem geçici hal süresi boyunca hem de kararlı hal işletiminde etkili bir şekilde kontrol eder ve tüm sistemin kararlılığını etkiler. Kararlılık çalışmalarında gerilim regülatörünün hızı büyük önem arz eder. Generatör alan sargısının yüksek endüktansı nedeniyle alan sargısının akımında hızlı bir değişim meydana getirmek zordur. Bu kontrol işlevinde önemli bir gecikme oluşturur. Gecikme problemi regülatör tasarımında üstesinden gelinmesi gereken en önemli sorunlardan biridir. Gerilim regülatörü sistemin bilgi merkezidir. Gerilim regülatörü modern sistemlerin çoğunda bir kontrolör olarak kullanılır ve generatör çıkış gerilimini ve/veya akımını algılayarak uyarım kontrolünde hatanın azaltılması yönünde değişim sağlar. Gerilim regülatörünün esas amacı generatörün uyarım gerilimini ayarlayarak çıkış geriliminin kontrol edilmesidir. Gerilim regülatörü tüm yük koşullarında generatör çıkış gerilimini izler ve önceden belirlenmiş limitler içinde kalmasını sağlar. Buna göre gerilim regülatörünün aynı zamanda generatör uyarım seviyesine

bağlı değişkenler olan üretilen reaktif güç kontrolü ve makine güç faktörü kontrolünü yaptığı da söylenebilir (Borges vd., 2001).

Senkron generatör uyarım kontrolü, güç sistem kararlılığı ve elektriksel güç kalitesinin sağlanmasında çok önemli rol oynar. Uyarım sistemleri normalde, yüksek kazanç ve küçük zaman sabitine sahip sistemlerdir. Yani farklı işletme koşullarında sistemde çok çabuk kompanzasyon ve sönümlenme yapabilecek kapasiteye sahiptirler. Yüksek kazançlı uyarım kontrolü genellikle geçici hal kararlılığı sağlar fakat kontrolörün ani cevabında kalıcı düşük frekans osilasyonları oluşur. Bu da diğer makinelerle arasında dinamik kararsızlık oluşmasına yol açar. Bu problemde geleneksel çözüm yaklaşımı, kontrol sinyalinin yumuşatılması için uyarım kontrol sistemine güç sistem stabilizatörü (PSS) nün ilave edilmesidir.

PSS tasarımı güç sisteminin nominal çalışma noktası civarında lineerize edilmiş matematiksel modeline bağlıdır. Böylece elde edilecek kompanzatorün çalışma noktası civarında osilasyonlarda iyi bir sönümlenme sağlayacağı düşünülür (Paulus ve Murgas, 2002).

PSS tasarımı için birçok yaklaşım mümkündür. Bunların çoğu ya klasik kontrol metodlarını veya akıllı kontrol stratejilerini içerirler. Belirli bir çalışma durumu için tasarlanan kontrolörler diğer çalışma durumlarında aynı performansı gösteremeyebilirler. Bununla beraber bir uyarlanabilir (adaptif) stabilizatör işletme koşullarının değişmesine karşın daha iyi bir performans sergileyebilir (Lu vd., 2001a).

Bir güç sistemi normal yük koşullarında işletilirken bir bozucu etkiye maruz kalırsa senkron generatör gerilim açısı yeniden ayarlanır. Bu bozucu etki, sistemde üretilen güç ile yük arasında bir dengesizlik oluşturursa, gerilim açılarının da ayarlanmasıyla dengenin kurulduğu yeni bir çalışma durumu oluşur. Sistemin bu yeni işletim koşullarına ayarlanması için geçen süre geçici hal süresi olarak adlandırılır. Bu süre sırasındaki sistem davranışı da sistemin dinamik performansı olarak isimlendirilir. Kararlılık için ana kriter geçici hal süresi sonunda senkron generatörün senkronizmada kalmasının devam etmesidir (Anderson ve Fouad, 1994).

Kabaca bir tanımla bir bozucu etki sonrası sistemin salınımlı zaman cevabı, geçici hal süresi içerisinde sönümleniyor ve belirli bir zaman sonra sistem yeni çalışma durumuna ulaşıyorsa bu sistem kararlıdır denir. Bu da sistemin salınımları sönümlenme eğilimi gösteren içsel enstrümanlara sahip olduğunu gösterir (Borges vd., 2001).

1.2 Literatür Özetleri

1.2.1 Klasik PSS 'in Tarihi ve Uyarım Kontrol Çalışmalarında Kullanılması

Güç sistemlerinde kararlılık problemi mühendislerin üzerinde yıllardır uğraştığı karmaşık bir

konudur. Bu problem ilk kez ciddi olarak Steinmetz (1920) tarafından ele alınmıştır. Evans ve Bergvall (1924) tarafından yapılan deneysel sonuçlar ilk olarak laboratuarda kurulan minyatür sistemler üzerinden alınmıştır. Pratik olarak güç sistemleri üzerinde kararlılık için ilk alan testleri ise Wilkins (1926) ile Evans ve Wagner (1926) tarafından yapılmıştır. İlk kararlılık problemleri uzun iletim hatları üzerinden şehirdeki yük merkezlerini besleyen hidroelektrik üretim istasyonları ile ilgilidir. Ekonomik nedenlerle bu tip sistemler kararlı-hal limitlerine çok yakın bir şekilde işletilmektedir. Bu yüzden kararlı hal işletiminde nadiren kararsızlık meydana gelmektedir. Buna karşın kısa devre ve diğer sistem bozucu etkileri nedeniyle sık sık kararsızlıklar oluşmaktadır. Kararlılık, iletim sistemi gücünden oldukça fazla etkilenmektedir. Genellikle yetersiz senkronlama momenti nedeniyle kararsızlık oluşmaktadır. Hata temizleme süresi de oldukça uzundur. (Kundur, 1994).

Senkron makinelerle ilişkin uyarım sistemlerinin, elektrik sistemleri içerisinde oluşan geçici olaylar üzerinde belirgin etkileri vardır. Bu nedenle literatürde güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesinde uyarım sistemlerine büyük önem verilmiştir. Başlangıçtaki uygulama ve incelemelerde güç sistemlerinin sürekli hal kararlılık sınırlarının arttırılmasında yüksek kazançlı ve sürekli çalışan gerilim regülatörlerinin uygun olduğu görülmüştür. Daha sonraları, gerilim regülatör kazanç gereksinimlerinin, yüklü ve yüksüz çalışma durumları için farklı olduğu ortaya çıkmıştır. 1950'li yıllarda konu ile ilgili mühendisler, modern gerilim regülatörlerinin oluşturduğu kararsızlıkların farkına varıp, kararlı kılıcı geribesleme devrelerini uygun bir şekilde kullanmaya başlamışlardır (Tacer, 1990).

Rotor hız osilasyonlarında sönümlenme sağlamak için votaj kontrol döngüsünün kullanılması fikri ilk olarak 1960 'ların sonunda Dandeno vd. (1968) ve Schleif vd. (1968) tarafından düşünülmüştür. Bu çalışmada elde edilen başarılı sonuçlar, çeşitli güç sistem stabilizatörlerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir

Heffron ve Phillips (1952) tarafından harici bir empedans üzerinden sonsuz baraya bağlı bir senkron generatörü temsil eden bir model geliştirilmiştir. Bu lineerize edilmiş basit bir modeldir. Bu modelin düşük frekans osilasyonlarının analizi için çok uygun olduğu Mello ve Concordia (1969) tarafından yapılan çalışma sonucunda anlaşılmıştır. (Deckmann ve Costa, 1994).

Mello ve Concordia (1969) tarafından uyarım kontrolü üzerine yapılan bu çalışmada senkron makinelerin küçük bozucu etkiler karşısındaki kararlılığı incelenmiştir. Burada sistem modeli olarak harici bir reaktans üzerinden sonsuz baraya bağlı tek makineli sistem göz önüne alınmıştır. Bu sistem üzerinde frekans cevap analizi yoluyla yapılan analizlerde, kararlılığı

arttırmak için hızdan türetilen ve otomatik gerilim regülatörü (AVR) girişine ilave edilen yardımcı sinyallerin etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmada uyarım sisteminden kaynaklanan negatif sönümlenme etkisinin nasıl meydana geldiği ve dinamik osilasyonların sönümlenmesinde stabilize edici sinyal tasarımı konusu açıklanmıştır. Yapılan analizler tristör tipli uyarım sistemlerinin etkilerinin ve bu tip sistemlerinin kararlılık ihtiyaçlarının anlaşılması bakımından faydalı olmuştur. Çok çeşitli şartlar altında ortaya çıkan ve birçok çeşidi olan osilasyonların yükleme koşullarına göre kısa süreli, güç sistemi konfigürasyonlarına göre de uzun süreli değişimler gösterdiği belirtilmiştir. Osilasyonların sönümlenmesi için her koşulda geçerli olacak genel bir kararlılık fonksiyonunun araştırılarak bulunmasının önemli olduğu ifade edilmiştir. Zaman sabiti 0.05 civarı veya daha küçük olan bir tristörlü uyarıcı olması durumunda sistem kararlılığı açısından bazı öneriler yapılmıştır. Bu çalışma daha sonra generatörlerde uyarım sistemi yoluyla daha iyi bir geçici hal performansı elde etmeyi amaçlayan güç sistem stabilizatör çalışmalarına öncülük etmiştir.

Mello vd. (1978) tarafından yapılan çalışmada, dinamik kararlılığın artırılması ve osilasyonların sönümlendirilmesi için uyarım kontrolünde yardımcı sinyal olarak hızlandırıcı güç kullanımının önemli bir avantaj sağladığı belirtilmiştir. Mekanik güç ile elektriksel gücün farkı alınarak elde edilen hızlandırıcı gücün ölçümünde bazı zorlukların olacağı söylenerek bu gücün daha pratik olarak yalnızca elektriksel parametreler (generatör gerilim ve akım değerleri, frekansı) kullanılarak elde edilebileceği gösterilmiştir.

Geleneksel güç sistem stabilizatörü (CPSS), yaygın olarak kullanılan, sabit parametrelili ve analog tipte bir cihazdır. İlk olarak 1950 'lerde önerilen CPSS klasik kontrol teorisine göre tasarlanmış ve bazı çalışma noktalarında lineerize edilmiş güç sistem modeli üzerine uygulanmıştır (Sanaye-Pasand ve Malik, 1999).

Pierre, (1987), PSEC, (1987), Gibbard vd., (1991) ve Bourles vd., (1998) tarafından yapılan çalışmalarda sonsuz baraya bağlı olarak düşünülen senkron turbogeneratörlerde PSS kullanılmasıyla uyarım sisteminin kontrol performansında oldukça yüksek bir iyileştirici etki sağlandığı belirtilmiştir.

PSS 'ler, giderek artan hızdaki tristörlü uyarım sistemleri ve artan güçlerdeki generatörlerde kararlı hale getirilemeyen salınımların sönümlendirilmesi amacıyla literatürde birçok kaynak tarafından gerekli görülmüştür (Kundur vd., 1989); (Kundur, 1994); (Grondin vd., 1993).

Mello ve Concordia (1969) tarafından yayınlanan referans niteliğindeki makalenin ardından Gupta vd. (1985) ve Kundur (1994) tarafından yapılan çalışmalar sonucu, güç sistem analizi çalışmalarında uyarım ve regülatör kontrolü açısından PSS kullanımının daha iyi anlaşılması

sağlanmıştır (Fadlalmoula vd., 1998).

Wang vd. (1993) tarafından yapılan çalışmada simetrik 3 faz kısa devre hata sonrası güç sistemlerinin durumu incelenmiştir. Doğrudan geribeslemeli lineerizasyon tekniği kullanılarak yeni bir uyarım kontrolörü sistemi tasarlanmıştır. Hata olduğu anda uyarım hızla artırılırken aynı anda mekanik giriş gücü düşürülmektedir. Bu şekilde sistemin geçici halde kararlı kalması sağlanmıştır.

Bojtor vd. (1993) tarafından Macaristan'da Ganz Ansaldo Elektrik Ltd şirketi için mikrobilgisayar kontrollü yeni bir uyarım sistemi geliştirilmiştir. Pratik olarak geliştirilen bu sistemin yapısı ve kontrol fonksiyonları tanıtılarak güç sisteminin geçici hal yapısına uygun olduğu gösterilmiştir.

Cao vd. (1994) tarafından yapılan çalışmada, güç sistem kararlılığını arttırmak amacıyla değişken yapılı bir stabilizatör tanıtılmıştır. Stabilizatör tasarımı, nonlinear transformasyon tekniği, değişken yapılı kontrol ve lineer sistem teorisini içermektedir. Nonlinear transformasyon tekniği kullanılarak nonlinear sistem önce lineer sisteme dönüştürülmüş, sonra değişken yapılı kontrol tekniği kullanılmıştır. Önerilen kontrolörün performans testi için sonsuz baraya bağlı tek makineli güç sistemi (SMIB) ve çok modlu osilasyonlara sahip çok makineli sistem kullanılmıştır. Farklı bozucu etkilerin kullanıldığı simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon sonuçları diğer stabilizatörlerin kullanıldığı simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre iyi bir dinamik performans ve dayanıklılık elde edilmiştir. Önerilen kontrolörün en büyük avantajı ise sistem parametrelerinin değişimine karşı sistem duyarlılığını azaltması olmuştur.

PSS parametrelerinin ayarlanma metodları üzerine günümüze değin birçok makale yayınlanmıştır. Örnek olarak (Kundur vd., 1981; Larsen ve Swann, 1981; Coowar vd., 1992; Wang vd., 1995) tarafından yapılan çalışmalar verilebilir.

Djukanovic vd. (1995) tarafından alçak düşülü hidroelektrik santralının matematiksel modeli üzerinde yapay sinir ağları (YSA) algoritması kullanılarak bir uyarlanabilir kontrol uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamada kontrol parametreleri, kullanılan YSA algoritmasına göre ayarlanmaktadır. Çalışmada generatörün geçici hal davranışının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen kontrolörün performansı klasik ve durum uzay kontrolü ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Sisteme büyük bozucu etkiler uygulanmış ve simülasyonlar yapılmıştır. Uyarlanabilir kontrolörün performans sonuçları geleneksel uyarım ve regülatör kontrolörü ile karşılaştırılarak test edilmiştir.

Fadlalmoula vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada güç sistemlerinin kararlılığını arttırmak

için kullanılan PSS 'lerin tarihçesinden bahsederek, turbo generatörlerin kontrol probleminin çözümünde PSS 'in avantajlarından söz edilmiştir. PSS sayesinde, uyartım sistemi dinamik karakteristiğindeki eksiliklerin giderildiği ve istenen tüm kontrol özelliklerinin çok az bir maliyetle sağlandığı belirtilmiştir

Cao vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada yeni bir nonlinear PSS tasarımı tanıtılmıştır. Bu PSS tasarımında nonlinear geribesleme dönüşüm tekniği ve lineer sistemler için optimal kontrol teorisinin bir kuralı olan zaman ve mutlak hatanın integrasyonu kullanılmıştır.

Bourles vd. (1998) 'nin çalışmalarında güç sistem osilasyonlarının sönümlenmesi için AVR'nin tek başına yeterli olmadığı, PSS kullanımının gerekli olduğu vurgulanmış ve iyi bir uyartım kontrolünün önemi belirtilmiştir. Dizayn edilirken bu iki eleman bağımsız olarak ele alınmamalı, birlikte tasarlanmalıdır. AVR+PSS tasarımında generatörün farklı çalışma durumları için sistemin kararlı olması ve dayanıklı olması için de değişen çalışma durumlarının göz önüne alınması gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada hassasiyeti azaltılmış kontrol teorisi kullanılarak dört çevrimli (DFLR) AVR ve PSS tasarımı yapılmıştır. DFLR yapısı regülasyon hatası üzerinde bir integratöre sahip olan durum geribeslemeli bir kontrolördür.

Abido ve Abdel-Magid (1999a) 'in çalışmasında güç sistem kararlılığının artırılması amacıyla radyal tabanlı fonksiyon ağları (RBFN) kullanılarak parametreleri gerçek zamanlı olarak ayarlanabilen bir PSS yapısı tanıtılmıştır. PSS parametreleri gerçek zamanlı olarak yapılabilen yük koşullarının ölçümüne göre ayarlandığından çok geniş bir çalışma aralığında iyi bir performans gösterebilmektedir. Yapılan simülasyon çalışmalarında geleneksel PSS ile karşılaştırılarak performansı test edilen RBFN PSS, SMIB sisteminde olduğu kadar çok makineli güç sistemlerinde (MMPS) de başarılı olmuştur. Önerilen RBFN PSS 'in yapılan test sonuçlarına göre sistem parametrelerinin büyük değişimleri karşısında da oldukça dayanıklı olduğu gözlenmiştir. Demerkeziyetçi RBFN PSS yapısı nedeniyle, PSS parametrelerinin optimizasyonu sırasında sistem modelinin gerçek zamanlı olarak tanımlanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır.

Abdel-Magid vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada çok makineli güç sistemlerinde simultane bir şekilde stabilizasyon sağlayabilmek için parametreleri genetik algoritma ile optimize edilen kural tabanlı bir PSS tanıtılmıştır. Buradaki optimizasyon problemi için özdeğer tabanlı bir fonksiyon kullanılmıştır. Genetik algoritma PSS tasarımına zeki bir yön kazandırmış ve harcanan zamanı önemli ölçüde azaltmıştır. Kontrolörün performansı SMIB sistemi ve iki makineli güç sistemi üzerinde farklı bozucu etki ve yük koşulları altında test

edilmiştir. Önerilen tekniğin lokal ve alanlararası osilasyon modlarının sönümlemesindeki performansı, yapılan özdeğer analizi ve simülasyonlarla test edilmiştir. Simülasyon sonuçları geleneksel (faz kaydırmalı) ve kural tabanlı PSS ile karşılaştırılmıştır. Ve sonuç olarak önerilen yöntemle PSS parametre seçiminin geniş bir yükleme aralığı için kararlılığı sağladığı belirtilmiştir.

Doraraju ve Nondy (2000) tarafından yapılan çalışmada güç sistemlerinin dinamik kararlılığının artırılması amacıyla yeni bir uyarlanabilir kontrol yaklaşımı tanıtılmıştır. Buradaki uyarlanabilir kontrol yapısı, 'hiperstabilite' (yüksek seviyeli kararlılık) teorisi temeline dayanmaktadır.

Gan vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada, geribesleme lineerizasyon ve nonlinear dayanıklı kontrol teorilerini kullanarak çok makineli güç sistemi için uyarım kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrolörler generatör uyarım sisteminin bir parçası olarak tasarlanmıştır. Önerilen kontrolörün performansı, 10 makine ve 39 baradan oluşan New England test sistemi (NETS) üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarıyla test edilmiştir. Sonuç olarak diğer kontrol stratejilerine göre bağımlılık yönünden birkaç avantajı olduğu belirtilmiştir.

Hu vd. (2002) çalışmalarında, bilinmeyen parametrelerle nonlinear bir uyarlanabilir kontrol sistemi tasarlamışlar ve bunu da güç sistemleri uyarım kontrolüne uygulamışlardır. Bu kontrolör tüm geribesleme değişkenleri lokal ölçümler sonucu elde edildiğinden demerkezi bir yapıya sahiptir. Çok makineli sistem için nonlinear, uyarlanabilir ve demerkezi uyarım kontrol stratejisinin genel ifadesi çıkarılmıştır. 6 makineli 22 baralı sistem üzerinde yapılan simülasyonlar, nonlinear uyarlanabilir kontrolörlerin etkinliğini ortaya koymuştur.

Gupta vd. (2003) tarafından yılında yapılan çalışmada, SMIB sisteminde düşük frekanslı osilasyonların sönümlemesinin artırılması için kullanılan PSS 'in tasarımı için hızlı çıkış örnekleme geribesleme tekniği önerilmiştir. Makine nonlinear modeli farklı çalışma noktalarında lineerize edilerek 16 farklı lineer model elde edilmiş ve önerilen teknik bu modeller üzerinde denenmiştir. Bu tekniğin sistem durumuna ihtiyaç duymadan çalıştığı ve kolaylıkla gerçekleştirilebilir olduğu belirtilmiştir. Farklı çalışma durumları için yapılan simülasyon sonuçları bu tekniğin PSS tasarımı için kullanımında iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Seval vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada parametreleri kendinden ayarlanan YSA tabanlı bir PSS tanıtılmıştır. Sistemden aktif ve reaktif güç ve generatör çıkış gerilimi alınarak YSA algoritması tarafından geribesleme bilgisi olarak kullanılmıştır. YSA algoritması yardımıyla SMIB sistemi üzerindeki geleneksel lead-lag tipi PSS in Kstab, T1 ve T2 parametrelerinin

ayarlanması sağlanmıştır. Simulasyon yapılarak CPSS ile yapılan karşılaştırma sonucu oldukça geniş bir çalışma aralığı ve farklı yükleme koşulları için önerilen kontrolün iyi bir performans sağladığı ve dayanıklı olduğu belirtilmiştir.

Chaturvedi ve Malik (2005) tarafından yapılan çalışmada Generalized Neuron (GN) PSS ve GN tabanlı bir adaptif PSS tanıtılmıştır. SMIB sistemi üzerinde yapılan simülasyonlarda generatörün açılmal hız parametresi üzerindeki osilasyonların sönümlenmesi incelenmiştir. Önerilen bu iki kontrolörün simülasyon sonuçları CPSS sonuçları ile karşılaştırılarak performans testi yapılmıştır.

Kumar vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada güç sistem osilasyonlarının sönümlenmesi amacıyla nonlinear geribeslemeli linearizasyon tekniği kullanılmıştır. Bu kontrolörün avantajı CPSS gibi performansının sistemin işletme koşullarına bağılı olmamasıdır. Önerilen yöntemin performansının test edilmesi amacıyla 16 makineli 68 baralı sistemi temsil eden NETS-New York Power System (NYPS) sistemleri kullanılmıştır. Bu sistem modelinde G1-G9 generatörleri NETS, G10-G13 generatörleri NYPS, G14-G-16 generatörleri ise New York çevresindeki eşdeğer generatörleri temsil etmektedir. Rotor hızı, açısı ve generatör çıkış voltajı üzerindeki osilasyonların sönümlenmesi gözlenmiştir. Simulasyon sonuçları CPSS ve nonlinear voltaj kontrolörü sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

El-Zonkoly (2006) tarafından yapılan çalışmada güç sistem stabilizatörü parametrelerinin ve AVR kazancının aynı anda koordineli olarak ayarlanması problemi araştırılmıştır. Bu problem bir optimizasyon problemi olarak formüle edilerek Particle Swarm Optimization (PSO) ile çözülmüştür. Önerilen kontrolör NETS üzerinde çoklu kontrolörlerin parametrelerinin ayarlanması için kullanılmış ve etkinliği gösterilmiştir. NETS sistemi 9 senkron makine ve 10 numaralı makinenin bağlandığı sonsuz bara olarak modellenen 39 numaralı baradan oluşmaktadır. Gözlenen parametre olarak güç açısının zaman domeni simülasyonu kullanılmış ve 6 farklı çalışma durumu için 9 generatöre ait özdeğerler verilmiştir.

1.2.2 PID PSS Kullanılarak Yapılan Uyarım Kontrol Çalışmaları

Godhwani ve Basler (1996) yaptıkları çalışmada 10KW - 50MW arasındaki küçük ve orta büyüklükteki fırçasız senkron generatörler için dijital kontrol teknolojisini kullanan bir uyarım kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Bu şekilde daha önceleri analog elektronik teknolojisi ile gerçekleştirilen uyarım kontrol sistemlerinde, dijital sistemde kullanılan mikroişlemcilerin düşük güç tüketimi, esneklik ve fiyat avantajlarından yararlanılacağı belirtilmiştir. Dijital uyarım sistemi PID kontrol algoritmasını kullanmaktadır. Yapılan testler sonucu PID parametreleri saptanmıştır.

Schaefer vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada iki adet PID kontrolör içeren bir gerilim regülatörü tanıtılmıştır. Biri yavaş ve küçük genlikli diğeri hızlı ve büyük genlikli olan iki kontrolörün parametreleri optimal olarak ayarlanmıştır. Bu iki kontrolör arasında geçiş işlemi ise bir darbeye meydan verilmeden PSS in durumu belirten bir sinyal değişikliği ile yapılmaktadır. Küçük genlikli kontrolör, PSS devre dışında kalınca devreye girmekte ve generatörün kararlı olarak çalışmasını sağlamaktadır. Büyük genlikli kontrolör ise PSS ile birlikte devreye girerek, bir bozucu etki sonrası generatörün dinamik ve geçici hal performansını arttırmaktadır. Elde edilen test sonuçları, PSS pasif durumda iken bile performanstan ödün verilmediğini göstermiştir.

1.2.3 Fuzzy PSS (FPSS) Kullanılarak Yapılan Uyarım Kontrol Çalışmaları

Hsu ve Cheng (1990, 1993) tarafından yapılan çalışmalar, senkron generatör uyarım sistemlerinde fuzzy kontrolünün ilk uygulamalarındandır. Bu çalışmalarda fuzzy küme teorisinin senkron generatörün uyarım kontrolü tasarımında kullanılması önerilmiş ve bu neredeyse bir ilk olmuştur. Önerilen fuzzy uzman sistemde generatör hız değişimi ' $\Delta\omega$ ' ve bu değişimin ivmesi ' $\Delta\dot{\omega}$ ' giriş değişkenleri olarak alınmıştır. Bu giriş değişkenleri öncelikle dilsel değişkenler olarak karakterize edilerek fuzzy küme teorisinde kullanılmışlardır. Kontrolör giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiyi veren bir fuzzy kural matrisi üretilmiştir. Fuzzy uyarım kontrolünün performansını test edebilmek için güç sistem modelleri (SMIB ve MMPS) üzerinde, farklı işletim koşullarında ve üç faz arızası durumunda dijital simülasyonlar yapılmıştır. CPSS ile yapılan karşılaştırma sonucunda fuzzy uyarım kontrolünün geniş bir çalışma aralığı içerisinde güç sisteminin dinamik performansını arttırdığı gözlenmiştir. Gerçek zamanlı sistem parametre tanımlamasına ihtiyaç duymayan fuzzy uyarım kontrolünün, parametrelerini sistem durumuna göre gerçek zamanlı ayarlayarak optimize eden PSS 'e göre zaman ve pratik uygulama açısından üstünlüğü savunulmuştur. Bir mikroişlemci vasıtasıyla kolaylıkla pratik olarak gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir.

Hasan vd. (1994) tarafından yapılan çalışmada bulanık mantık tabanlı kontrolörler tanıtılarak senkron generatör uyarım sistemine pratik olarak uygulanması gösterilmiştir. Fuzzy kontrolör generatör çıkışında sabit bir gerilim sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Kontrolör giriş değişkenleri olarak çıkış gerilimi ve türevi kullanılmıştır. Fuzzy kontrolörün performansını test etmek amacıyla test sistemi kurularak deneysel bir çalışma yapılmıştır. PC (kişisel bilgisayar) içerisinde çalıştırılan C programlama diliyle yazılan fuzzy kontrol yazılımı kullanılmıştır. Endüstriyel büyüklükteki 5KVA lık bir generatör çıkışından alınan analog gerilim sinyali bir A/D dönüştürücü ile dijital işarete dönüştürülmüş ve PC içerisindeki algoritma yardımıyla işlenerek çıkış kontrol sinyaline dönüştürülmüştür. Bu kontrol sinyali

D/A dönüştürücü ile analog işarete dönüştürülerek uyarım devresinde kontrol sinyali olarak kullanılmıştır. Fuzzy kontrolörün performansı, PC de assembly dilinde yazılmış klasik PID tipi bir kontrol sağlayan kontrolör yazılımı ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Sonuç olarak daha hızlı ve daha az bir taşma sağlayarak üstün bir performans sağladığı gösterilmiştir.

Hiyama (1994a) tarafından yapılan çalışmada tasarlanan bir Fuzzy PSS (FPSS) deneysel ve simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır. Önerilen PSS bir mikrobilgisayar bir A/D ve bir D/A dönüştürücü karttan oluşmaktadır. Ölçülen aktif güç ve/veya hız bilgisi fuzzy kuralları ile değerlendirilerek kararlılaştırıcı çıkış sinyalinin üretimi gerçekleştirilmektedir. Kontrol kuralları oldukça basit olduğundan mikrobilgisayar için ağır hesaplamalar içermemektedir. Bu şekilde adeta bir gerçek zamanlı kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Geniş bir aralıktaki yüklenme koşulları altında yapılan simülasyon çalışmalarında çok makineli sistem modeli olarak Japonya Kyusu elektrik güç sisteminin bir bölümü temsil eden 5 makineli sonsuz baraya bağlı güç sistemi modeli kullanılmıştır. Aynı simülasyon modeli üzerinde CPSS ve önerilen FPSS kullanılarak yapılan karşılaştırmalar sonucu FPSS in avantajlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca mikro makine sistemi üzerinde yapılan deneysel çalışmalar da önerilen FPSS 'in etkinliği ve uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Hiyama (1994b) tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise yine önerilen mikrobilgisayar tabanlı bir FPSS ile yapılan gerçek zamanlı kontrolün etkinliği incelenmiştir. Performans değerlendirmesi için aynı mikromakine modeli üzerine uygulanan tipik analog tip PSS 'e eşdeğer dijital tipteki CPSS ile karşılaştırma yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan mikromakine modeli, 7KW, 100Vdc luk bir DC motor, 5KVA, 220Vac ve 60Hz lik bir senkron generatör ve küçük boyutlu bir iletim hattından oluşmaktadır. Generatör tristörlü bir uyarım sistemine sahiptir. Farklı bozucu etkiler altında yapılan deneysel çalışmalar sonucu, FPSS 'in CPSS 'e göre sistem sönümlemesini oldukça arttırdığı belirtilmiştir.

Hiyama vd. (1996) tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinin genel kararlılığının artırılması amacıyla fuzzy lojik (FL) tabanlı bir uyarım sisteminin kullanılması önerilmiştir. Önerilen uyarım sistemi iki adet kontrol çevrimine sahiptir. Birisi AVR fonksiyonunu icra eden gerilim kontrol çevrimi diğeri de PSS fonksiyonunu icra eden sönüm kontrol çevrimidir. Her iki çevrime de basit FL kuralları uygulanmıştır. Gerilim kontrol çevriminin giriş sinyali olarak generatör çıkış gerilimi, sönüm kontrol çevriminin giriş sinyali olarak da aktif güç çıkışı kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları FL uyarım sisteminin avantajlarını göstermektedir. Sonuç olarak hem gerilim hem de sönüm kontrolü açısından iyi bir performans göstermiştir. Önerilen kontrolörün çok ağır hesaplamalara gerek duymadığı ve

kolayca gerçekleşmesinin mümkün olduğu belirtilmiştir.

Chang vd. (1999) yaptıkları çalışmada güç sistemlerinde düşük frekans osilasyonlarının sönümlenmesi amacıyla önerilen çok seviyeli bir FPSS tanıtılmıştır. Tüm çalışma durumlarında optimal performansı sağlamak amaçlanmıştır. Ayrıca önerilen PSS için off-line çalışan öğrenme algoritması da tanıtılmıştır. Bir çalışma durumunda optimize edilmiş parametrelere sahip olan CPSS 'in dinamik cevabı kullanılarak eğitim seti elde edilmiştir. Matlab/Simulink programında SMIB sistem modeli üzerinde simulasyonlar yapılarak önerilen kontrolörün performansı test edilmiştir. Simulasyon sonuçları CPSS sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve bu sonuçlar ITSE ve IECE performans değerlendirme ölçütlerine göre değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre önerilen PSS 'in çok daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

Sanaye-Pasand ve Malik (1999) tarafından yapılan çalışmada, yeni geliştirilen bir fuzzy algoritması ile bir PSS uygulaması yapılmıştır. Fuzzy kontrolörün performansını arttırmak amacıyla çok zaman alan deneme yanılma metodu ile optimize edilen kural tablosunun yerine kullanılacak olan bir standart kural tablosu geliştirilmiştir. Standart kural tablosu kullanılarak yapılan bu çalışmayla, harcanan zamanın minimize edilmesi amaçlanmıştır. Hız ve hızın türevi giriş değişkenleri olarak kullanılmıştır. Bu değişkenlerin bulanık değerlere çevrilmesi için yedi adet fuzzy kümeye sahip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Bulanık karar verme işlemi için bu kümeler kullanılarak 49 kurallı tablo oluşturulmuştur. Yaptıkları çalışmaların sonucunda önerilen kural tablosunun en az klasik olarak bulunan kural tablosu kadar iyi bir performans sergilediği belirtilmiştir.

Lu vd. (2001a) yılında yaptıkları çalışmada çok makineli güç sistemleri için tasarlanan bir FPSS tanıtılmıştır. Takagi-Sugeno tipi fuzzy modeli kullanılarak dizayn edilen iki lineer stabilizatör için, ağır ve hafif yükleme koşulu olmak üzere iki uç çalışma durumu göz önüne alınmıştır. FL mekanizması lineer stabilizatörlerden gelen sinyalleri birleştirerek tek bir kontrol sinyali üretmektedir. Fuzzy kontrolörün optimize edilmesinde küçük kareler metodu ile hata minimize edilmesi yöntemi kullanılmıştır. Yapılan simulasyon çalışmalarında SMIB sistemi ve iki MMPS sistem modeli ('2 bölgeli 4 makineli 13 baralı', '16 makineli 68 baralı') kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, farklı yük koşulları altında düşük frekans osilasyonları üzerinde tatmin edici bir sönümleme sağlanmıştır.

Paulus ve Murgas (2002) 'ın yaptıkları çalışmada kontrol uygulaması açısından avantaj ve dezavantajlara sahip olan FL teorisinin senkron generatörlerde uyarım kontrolü ile birleştirilerek uygulanabilirliği araştırılmıştır. Fuzzy lojik kontrolör (FLC) sistemde uyarım

kontrolüne yardımcı sinyal üretmek amacıyla yani PSS işlevinde kullanılmıştır. SMIB sistemi üzerinde yapılan simülasyon sonuçlarına göre, FLC 'nin çıkış gerilimi ve frekans kontrolü üzerinde dikkate değer tarzda bir performans artışı sağladığını göstermiştir.

Elshafei vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada adaptif fuzzy tabanlı yeni bir PSS önerilmiştir. Fuzzy kural tabanındaki değişiklik ise değişken yapıya adaptif kontrol algoritmasının kullanılmasıdır. Bu algoritma, kural tabanı büyüklüğünü azaltmakta ve kontrolör performansını iyileştirmektedir. Kontrolörün performans testi farklı çalışma durumlarında SMIB test sistemi üzerinde küçük ve büyük bozucu etkiler kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon sonuçları 9 ve 49 kurallı iki farklı FPSS sonucu ile karşılaştırılmıştır. Mekanik giriş momentine 0.1 pu genlikli kare dalga tipi bozucu etki uygulanmış ve güç açısı değişimindeki osilasyonların sönümlenmesi gözlenmiştir. İlave olarak çok makineli sistem üzerinde üç faz-toprak kısa devre arızası sonrasında oluşan osilasyonların sönümlenmesi de incelenmiştir. Burada da her makinenin yedinci derece modelle temsil edildiği 3 makineli 5 baralı sistem modeli kullanılmıştır.

Al-Osaimi vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada FPSS uygulaması tanıtılmıştır. Önerilen yöntemin hem simülasyon uygulaması yapılmış hem de laboratuarda mikromakine modeli üzerinde donanım olarak da uygulanmıştır. Performans testi açısından önerilen kontrolörün sonuçları PID PSS ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon çalışmalarında MATLAB/Real-Time Windows Target Toolbox yazılımı, pratik uygulamada ise sonsuz bara yoluyla iletim hattın bağlanan 1KVA lık makine içeren basit bir güç sistemi kullanılmıştır. Mekanik giriş momenti ve generatör alan gerilimine farklı bozucu etkiler uygulanarak yapılan simülasyon çalışmalarında güç açısı, pratik çalışmada ise açısal hız gözlenen parametre olarak kullanılmıştır.

1.2.4 Hibrit Algoritmalar ve PSS Kullanılarak Yapılan Uyarım Kontrol Çalışmaları

Chen vd. (1993) 'nin yaptıkları çalışmada bir uyarlanabilir PSS uygulaması tanıtılmıştır. Bu PSS kutup kaydırma tekniğini kullanarak kendi kendine parametre optimizasyonu yapmaktadır. Önerilen kontrol stratejisi ile kutup atama yöntemi ve minimum varyans kontrol yönteminin avantajları birleştirilmiştir. Bir algoritma ile tanımlanan sistem modelindeki kapalı çevrim kutuplarının kaydırılmasıyla, z-düzleminde birim çember üzerindeki kutup yerleşimleri hesaplanarak elde edilen performans kriterinin minimum düzeye indirilmesi sağlanmaktadır. Kendi kendine optimizasyon tekniği ile kontrolöre dışarıdan gelecek etkiler minimize edilmiş ve parametrelerin işletim anında ayarlanması basitleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlarda düşük dereceli sistem modeli kullanılmıştır. Önerilen PSS 'in performansı,

PSS'siz ve klasik PSS içeren sistemle karşılaştırılarak test edilmiştir. Önerilen PSS, geniş bir işletim aralığı için güç sisteminde iyi bir sönümlenme sağlamış ve sistemin dinamik performansını da önemli ölçüde arttırmıştır.

Hiyama vd. (1994) tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinin kararlılığının artırılması amacıyla mikrobilgisayar temelli bir FPSS tasarımı önerilmiştir. Önerilen kontrol sistemi için generatör hızının PID bilgisi kullanılmıştır. Generatör milini açılma hızının integral bilgisi, kararlılık alanının genişletilmesi amacıyla dikkate alınmıştır. Yapılan simulasyon çalışmaları ile önerilen kontrolörün etkinliği gösterilmiştir. Simulasyon için kullanılan üçüncü derece makine modeli (Yu, 1983), temel geçici hal kararlılık analizi açısından yeterli görülmüştür. SMIB sistemi üzerinde farklı büyüklükteki bozucu etkiler uygulanarak geleneksel fuzzy kontrolör ile önerilen FPSS 'in performansları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sistemin kararlılık bölgesi sınırlarının artırıldığı belirtilmiştir.

Djukanovic vd. (1997) tarafından Kaplan türbini içeren alçak düşümlü hidroelektrik santralini temsil eden nonlinear matematiksel modelindeki ST1 tipi statik uyartım ve çok değişkenli hız regülatörü üzerinde neuro-fuzzy kontrol uygulaması yapılmıştır. Bu uyarlanabilir kontrol uygulamasında kontrol parametreleri, kullanılan neuro-fuzzy algoritmasına göre ayarlanmaktadır. Önerilen kontrol sisteminin dinamik performansı nonlinear sistem modeli üzerinde geleneksel ve durum geribeslemeli kontrol yöntemleriyle yapılan simulasyon sonuçlarının karşılaştırılmasıyla test edilmiştir.

Dash vd. (1998) tarafından güç sistemlerinde geçici hal kararlılığın artırılması için fuzzy tekniği kullanan PID tabanlı bir uyartım kontrol çalışması yapılmıştır. Hız ve hızın türevini giriş değişkenleri olarak kullanan fuzzy çıkarım tekniği kullanılarak PID kontrol parametreleri gerçek zamanlı olarak optimize edilmiştir. Fuzzy tekniği ile PID birleştirilerek nonlinear bir PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tek makineli ve çok makineli sistem üzerinde farklı geçici bozucu etkiler uygulanmıştır. Önerilen kontrolör yaklaşımının etkinliği sabit katsayılı klasik PID kontrolör ile karşılaştırılarak test edilmiştir.

Abido ve Abdel-Magid (1998, 1999b) tarafından yapılan çalışmalarda, güç sistem kararlılığının artırılması amacıyla kullanılan fuzzy tabanlı fonksiyon ağı (FBFN) ile PSS tasarımı tanıtılmıştır. Bu önerilen FBFN algoritması ile fuzzy sistemlerine YSA 'nın öğrenme kapasitesi kazandırılarak, sayısal ve dilsel bilgiyi birleştirerek kullanabilen bir PSS yapısı geliştirilmiştir. Önceki çalışmalarda önerilen PI ve PID tabanlı PSS 'lerin yalnızca nominal bir çalışma durumu için optimal performans sağladığı belirtilmiştir. Güç sistemlerinin yüksek derecede nonlinear olmasından dolayı FBFN algoritmasının da nonlinearlik koşulunu yerine

getirdiği belirtilmiştir. PSS parametreleri senkron makinenin gerçek zamanlı yük değişimlerine göre ayarlanmaktadır. Fuzzy tabanlı ağların eğitimi için, ortogonal en küçük kareler (OLS) algoritması kullanılmıştır. Sisteme bozucu etki verilerek tek makineli ve çok makineli sistemler üzerinde simulasyon çalışmaları yapılmıştır. FBFN PSS 'in performansı CPSS ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Sonuç olarak önerilen PSS 'in geniş bir çalışma aralığı içerisinde bölgesel osilasyonların sönümlemesinde çok başarılı olduğu gösterilmiştir.

Hosseinzadeh ve Kalam (1999) tarafından yapılan çalışmada, fuzzy teorisinin temel fonksiyonlarını kullanan bir FPSS geliştirilmiştir. Öncelikle kontrol edilen sistem çıkışı ve dilsel kurallara bağlı olarak bir FPSS tasarlanmıştır. Daha sonra çalışma şartlarındaki değişimlere karşı FPSS 'in uyarlanabilir olabilmesi için Lyapunov' un dolaysız metodunu temel alan bir uyarlanabilir kural geliştirilmiştir. SMIB sistemi üzerinde yapılan simulasyon çalışmalarına göre, önerilen uyarlanabilir FPSS 'in, CPSS ve FPSS 'e göre geniş bir işletim aralığında daha iyi bir performans sağladığı gösterilmiştir.

Atanasova ve Zaprianov (1999) yaptıkları çalışmada, güç sistemlerinde geçici hal kararlılığını arttırmak için radyal tabanlı fonksiyon ile YSA algoritmasını birleştiren (RBF-NN) bir kontrol yöntemini önermişlerdir. Bu kontrol yönteminin fuzzy kontrolöre çok benzediği ifade edilmiştir. SMIB sistemi üzerinde Matlab Simulink programından yararlanarak simulasyon yapılmış ve önerilen yöntemin performansı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak önerilen RBF-NN kontrol yönteminin uyarlanabilir ve nonlinear kontrol için çok uygun, hızlı ve dayanıklı bir yöntem olduğu ve YSA 'nın eğitime gücünden yararlandığı belirtilmiştir. Bu konuda hiyerarşik nörokontrol yapısı da ileride yapılabilecek bir çalışma olarak önerilmiştir.

Chung vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada güç sistem stabilizasyonu için Fuzzy PID kontrolör uygulaması tanıtılmıştır. Fuzzy çıkarsama tekniği kullanılarak verilen aktif ve reaktif güç şartlarında önerilen kontrolörün PID parametrelerinin kendi kendine ayarlanması sağlanmıştır. PID katsayılarının bulanıklaştırılması amacıyla 5 adet bulanık küme tanımlanmıştır. Simulasyonlar için lineerize edilmiş Heffron-Phillips güç sistem modeli kullanılmıştır. Simulasyon sonuçları, CPSS kullanılarak yapılan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. CPSS 'e göre çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca ani yük değişimlerinde ve üç faz kısa devre arızası durumunda kontrolör performansı test edilerek üstünlüğü gösterilmiştir.

Karnavas ve Papadopoulos (2000) 'un yaptıkları çalışmada, enerji üretim sistemlerinde fuzzy ve YSA tabanlı bir uyarım kontrolü kullanılması önerilmiştir. Bu çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. Önce bir çalışma noktasında lineerize edilmiş basit bir nonlinear model üzerinde, beş geribesleme alınarak geleneksel uyarım kontrolü uygulanmış ve bilgisayar

simulasyonu yapılarak sistemin zaman cevapları elde edilmiştir. İkinci aşamada, bir Fuzzy PD kontrolör tasarlanarak uygun girişler kullanılmış, çıkış kontrol işareti olarak da alan gerilimi kullanılmıştır. Giriş ve çıkış değişkenleri arasında ilişkiyi sağlayacak dilsel değişkenlerle karakterize edilmiş bir fuzzy kural matrisi oluşturulmuştur. Bu kontrolörün performansı önceki simulasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Üçüncü aşamada ise, YSA ile önceden off-line olarak eğitilerek tasarlanan fuzzy PD kontrolörün performansı önceki aşamalara göre karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak dinamik performansın oldukça yükseltildiği gözlenmiş ve akıllı kontrol yöntemleri kullanılarak daha ekonomik bir şekilde performansın artırılabilceği belirtilmiştir. Geriye yayılma yöntemini kullanan YSA algoritmasının sistemin dinamik modelini tanımaya yardımcı olduğu ve kontrolörün daha dayanıklı (robust) çalışmasını sağladığı belirtilmiştir.

Arnalte (2000) tarafından yapılan çalışmada, senkron generatör çıkış geriliminin kontrolü için fuzzy kontrol tekniği pratik olarak uygulanmıştır. Fuzzy algoritması bir PC içerisinde çalıştırılmış ve PC ile generatör arasına uygun bir arabirim tasarlanmıştır. Fuzzy kontrolör, PI kontrolü gibi davranacak şekilde tasarlanmıştır. Generatörün rezistif, endüktif ve kapasitif yüklü olduğu durumlarda önerilen kontrolörün performans testleri yapılmıştır. Sonuç olarak rezistif ve endüktif durumda, fuzzy kontrolörün senkron generatör çıkış gerilimindeki hatayı, iyi bir geçici hal cevabıyla minimize ettiği gösterilmiştir. Fakat kapasitif çalışmada çok iyi bir sonuç alınamamıştır. Bu çalışmada aynı zamanda fuzzy kontrol tekniğinin güç sistemlerinde pratik olarak uygulanabilirliğinin de gösterildiği belirtilmiştir.

Afzalian ve Linkens (2000) tarafından yapılan çalışmada genetik algoritma kullanılarak parametreleri optimize edilen bir nörofuzzy kontrolör tanıtılmıştır. Nörofuzzy kontrolörü gerçekleştirmek için çok katmanlı bir ağ kullanılmıştır. Bu ağ içerisinde ağırlık katsayıları olarak fuzzy üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Kontrol edilen çıkışa bağlı olarak genetik algoritmanın uygulanma yöntemi olan bir fonksiyon kullanılmıştır. Eğitilen sistemde üyelik fonksiyonlarına ilişkin optimal parametreler elde edilmiştir. Önerilen kontrolörün performansı güç sistemleri uyartım kontrolünde kullanılan PSS uygulamasında test edilmiştir. Uygulamada farklı işletim durumları için simulasyon çalışmaları yapılarak olumlu sonuçlar alınmıştır.

Fregene ve Kennedy (2000) tarafından yapılan çalışmada, yüksek dereceli bir SMIB modeli üzerinde, geribesleme üzerinden yapılan lineerize edilmiş uyarlanabilir bir nörokontrolörün sistematik tasarımı tanıtılmıştır. PSS görevini gerçekleştirmek için özelleştirilmiş kontrol kuralına göre, nöro kontrolör ile sistem parametre tahmini yapılarak her örnekleme zamanı

için uyarlanabilir kontrolörün çıkış işareti değeri hesaplanmaktadır. Kontrol sistemi, gerçek zamanlı olarak kendi adaptasyonunu sağlamaktadır. SMIB örneği üzerinde yapılan simülasyonlarda referans gerilim üzerine verilen birim basamak bozulmaya karşı sistemin izleme performansı ölçülmüştür. Kontrolörün performansı farklı işletme şartları altında analitik kontrolör ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre nörokontrolörün daha az efor harcayarak aynı performansı sağladığı görülmüştür.

Dechanupaprittha ve Ngamroo (2002) tarafından yapılan çalışmada H_{∞} metodu ile dayanıklı (robust) PSS tasarımında optimal ağırlıkların bulunmasında kullanılan TS (Tabu Search) isimli algoritma tanıtılmıştır. H_{∞} kontrol yönteminde ağırlıkların belirlenmesi performans açısından oldukça önemlidir. Geliştirilen TS algoritması ile optimal ağırlıklar otomatik olarak belirlenmektedir. Önerilen PSS 'te geribesleme giriş sinyali olarak sadece rotor hız değişimi " $\Delta\omega$ " kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen PSS 'in performansı farklı yük koşullarında sonsuz baraya bağlı tek makineli sistem üzerinde değerlendirilmiş ve parametreleri ayarlanmış dayanıklı PSS ile karşılaştırılarak test edilmiştir. Sonuç olarak önerilen PSS 'in gereksinimleri karşıladığı ve kolaylıkla pratik olarak gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir.

Cheng ve Elangovan (2003), Tabu Search ve Fuzzy algoritmalarını birleştirerek PSS 'in performansının artırılmasında kullanmışlardır. SMIB sistemi üzerinde CPSS ile karşılaştırılarak önerilen kontrolörün performans testi yapılmıştır.

You vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada, fuzzy tabanlı bir uyarlanabilir PSS tanıtılmıştır. PSS 'in parametreleri gerçek zamanlı YSA algoritması kullanılarak ayarlanmıştır. Kontrol sistemi iki alt siteme ayrılmıştır. Bunlardan birincisi generatörün değişken parametrelerini tanımlayan yinelemeli en küçük kareler algoritması, ikincisi de osilasyonları sönümleyen FL tabanlı uyarlanabilir kontrolördür. Yapılan simülasyonlarla SMIB sistemi, iki bölgeli 4 makine ve 13 baradan oluşan sistem ve bir de 16 makine ve 68 baralı sistem modeli kullanılmıştır. Önerilen PSS 'in etkinliği PSS 'siz ve CPSS içeren sistemle karşılaştırılarak test edilmiştir. Sonuç olarak, bölgesel ve alanlar arası osilasyonların sönümlemesinde artış sağlandığı gözlenmiştir.

Malik (2004) tarafından yapılan çalışmada sistemin işletim koşullarının değişimine göre parametreleri değişen adaptif kontrolörlerin üç farklı uygulaması tanıtılmıştır. Bunlar faz kaydırma tekniğini kullanan analitik kontrol yöntemi, YSA ve fuzzy algoritmalarını birleştiren yapay zeka yöntemi (ANFIS) ve bunların hem analitik ve yapay zeka yönteminin birlikte kullanıldığı yöntemlerdir. Bu üç adaptif kontrolör SMIB sistemi üzerinde simülasyonlar yapılarak uygulanmıştır. SMIB sistem modelinde yedinci derece nonlinear

senkron generatör modeli ve ST1A tipi uyarıcı modeli kullanılmıştır. Kontrolör performanslarının karşılaştırılması amacıyla da PSS1A tipi CPSS modeli kullanılmıştır. Sistemin mekanik giriş momentine 5 saniyelik ve 3 saniyelik süre boyunca uygulanan 0.05 pu genliğindeki kare dalga şeklindeki bozucu etki uygulanmıştır. Önerilen hibrid kontrolörün CPSS ve FPSS ile yapılan performans karşılaştırmasında güç açısı değişimi incelenmiştir. Sonuç olarak bu üç adaptif yöntemin uyarım kontrol sistemleri üzerindeki uygulanabilirliği gösterilmiştir.

1.3 Literatür Taramasının Değerlendirilmesi

Güç sistemlerinde ilk kararlılık çalışmaları 1920 'li yıllarda yapılmaya başlamıştır. Günümüze değin yapılan bu çalışmalar küçük sinyal kararlılığı ve geçici hal kararlılık çalışmaları başlıkları altında incelenmiştir. Zamanla modern güç sistemlerini oluşturan büyük güç kapasiteli makineler ve yüksek hızlı uyarım sistemleri kullanılmaya başlamıştır. Bu nedenle güç sistemlerinin de ilave kontrolörlere ihtiyacı olmuştur. 50 'li yıllardan sonra senkron generatörün hız bilgisinin kararlılık ve güç sistem osilasyonlarına olan olumlu etkisi keşfedilmiştir. Bu şekilde yardımcı kontrolör olarak AVR 'ye ilave edilen PSS 'le ilgili çalışmalar başlamıştır. Zamanla PSS kullanımının önemi artarak AVR+PSS yapısı artık uyarım kontrol sisteminin bir parçası haline gelmiştir. Yardımcı kontrol sinyalleri kullanmadan sadece uyarım kontrolüyle optimal sonuç elde etmenin oldukça zor olduğu görülmüştür.

Öncelikle generatörün hız bilgisini kullanan geri besleme üzerinde tasarlanmış faz ileri-faz geri tipi bir kontrolör olan CPSS üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra ise CPSS yerine birçok farklı kontrol yöntemi uygulanmış ve güç sistemlerinde dinamik kararlılığın artırılması ve osilasyonların sönümlenmesi açısından performansları test edilmiştir. Bu yöntemler arasında PID, Fuzzy ve YSA sayılabilir. Son yıllarda ise CPSS yerine uygulanan kontrol yöntemlerinin olumlu etkilerini birleştiren hibrid kontrol yöntemleri uygulanmaya başlamıştır. YSA ve genetik algoritmalar genellikle diğer kontrol yöntemlerinin parametre optimizasyonunda kullanılmıştır.

Uyarım kontrolü veya gerilim kontrolü çalışmalarında kullanılan bazı yöntemlerin güç sisteminde negatif anlamda elektromekanik salınımlara yol açan yan etkileri de olmaktadır.

Yapılan çalışmalar arasında sadece deneysel çalışmalar olduğu gibi ve sadece teorik yani simülasyona dayalı çalışmalar da bulunmaktadır. Bunun yanında hem simülasyon hem de pratik uygulama içeren çalışmalar da bulunmaktadır.

Bilgisayar ve yazılım teknolojisindeki gelişmeler çok etkili ve karmaşık kontrol teorilerinin

hızlı bir şekilde simülasyonlarının yapılmasını mümkün hale getirmiştir.

Simülasyon çalışmalarında güç sistem modeli olarak tek makineli ve çok makineli modeller kullanılmıştır. Tek makineli model olarak en çok Heffron-Phillips tarafından blok diyagram şeklinde geliştirilen SMIB sistem modeli kullanılmıştır. Kullanılan çok makineli modeller de 3 makineli 5 baralı, 3 makineli 9 baralı, 2 bölge 4 makineli 13 baralı, 10 makineli 39 baralı “New England” ve 16 makineli 68 baralı sistemlerdir.

Yazılım ve elektronik sektöründeki gelişmelerle, algoritmaların yazılım haline dönüştürülerek bir mikroişlemci içerisine kaydedilmesi mümkün hale gelmiş ve bu da yeni geliştirilen kontrol yöntemlerinin pratik olarak gerçekleştirilmesine imkân sağlamıştır.

1.4 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada enerji üretim sistemlerinde kullanılan senkron generatörlerin kararlılığını ve dinamik performansını artırarak etkili bir gerilim kontrolü sağlamak suretiyle üretilen gücün kalitesini arttırmak amaçlanmıştır. Bunun için de senkron generatörlerin uyarım kontrolü için literatürde kullanılan yöntemlerden farklı bir kontrol yönteminin kullanılabilirliği üzerinde çalışılmıştır.

Yapılan bu çalışma ile aynı zamanda aşağıda belirtilen hedeflerin de gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

- Senkron generatörlerde güç sistem stabilizatörü yoluyla uyarım kontrolünün iyileştirilmesi
- Güç açısı ve açısal hız gibi güç parametrelerindeki düşük frekanslı osilasyonların sönümlenmesi
- Güç sisteminin dinamik performansının ve güvenliğinin artırılması
- Güç sistem kararlılığının artırılması
- Üretilen elektriksel güç kalitesinin artırılması
- Çıkış gerilim kontrolü, Reaktif güç kontrolü, Güç faktörü kontrolü

1.5 Kullanılan Yöntem

Zadeh (1965) tarafından fuzzy kümeler fikrinin ortaya atılmasından sonra fuzzy lojik kontrol fikri ilk olarak Zadeh (1973) tarafından ortaya atılmış ve yine ilk olarak Mamdani (1974) tarafından modellenmesinde yapısal güçlük bulunan kontrol sistemlerinde denenmiştir. Bundan sonra FLC, birçok endüstriyel uygulamalar için oldukça aktif ve verimli bir araştırma

alanı olmuştur. Fuzzy sistemlerin yapısı uygulama alanlarına göre sınıflandırılmıştır. En popüler uygulamalardan birisi fuzzy sistemin kontrol işlemine doğrudan uygulanmasıdır. Bu uygulama PID gibi klasik kontrol ile rekabet etmektedir.(Li ve Tso, 2000).

Yapılan literatür taraması sonucunda güç üretim sistemlerinde dinamik performansın artırılması (Cao vd., 1994; Karnavas ve Papadapulos, 2000; Doraraju ve Nondy, 2000), düşük frekans osilasyonlarının sönümlenmesi (Chang vd., 1999; Gupta vd., 2003; Lu vd., 2001a) ve aynı zamanda generatörün çıkış gerilim kontrolü (Hiyama vd., 1996; Arnalte, 2000; Fregene ve Kennedy, 2000) için bir çok çalışma yapılmıştır. Simulasyon çalışmaları deneysel çalışmalardan daha fazla yapılmıştır. Güç sistemlerinde yapılan uyarım kontrol çalışmaları genellikle uyarım kontrolüne ilave kontrol olarak kullanılan PSS tasarım çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır. PSS tasarımı için de klasik kontrolden günümüze değin geliştirilen uyarlanabilir ve (fuzzy, yapay sinir ağları, neurofuzzy, genetik algoritma, ANFIS vb.) gibi akıllı kontrol teorilerine kadar birçok yöntem kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntemlerin pratik olarak uygulanabilirliğinin yanı sıra farklı çalışma durumları için kontrolör performansının değişmemesi ve güç sistemlerinin bozucu etkilere karşı daha kararlı hale getirilmesi amaçlanmıştır. Son 10 yıldır yaygın olarak kullanılan akıllı kontrol teorilerinin birleştirilmesiyle hibrit kontrol algoritmaları kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan bu hibrit algoritmalarından bazıları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Fuzzy tekniği ile PID birleştirilerek nonlinear bir PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir
- Neuro-fuzzy kontrol uygulaması; fuzzy sistemlerine YSA ‘nın öğrenme kapasitesi kazandırılarak, sayısal ve dilsel bilgiyi birleştirerek kullanabilen bir PSS yapısı geliştirilmiştir
- FPSS ‘in çalışma şartlarındaki değişimlere karşı uyarlanabilir olabilmesi için Lyapunov’ un dolaysız metodunu temel alan bir uyarlanabilir kural geliştirilmiştir
- Radyal tabanlı fonksiyon ile YSA algoritmasını birleştiren (RBF-NN) bir kontrol yöntemi önerilmiştir.
- Genetik algoritma kullanılarak parametreleri optimize edilen bir nörofuzzy kontrolör tanıtılmıştır
- Tabu Search (TS) ve Fuzzy algoritmalarını birleştirerek PSS ‘in performansının artırılmasında kullanılmıştır

Bu çalışmada yeni bir akıllı kontrol yönteminin güç sistemi uyarım kontrolü üzerine

uygulanması araştırılmıştır. Literatürde uyarım kontrolüne uygulanmamış ve performansı test edilmemiş olan Hiyerarşik Fuzzy kontrol yöntemi senkron generatörün uyarım kontrolü amacıyla kullanılarak kontrol performansı incelenmiştir. Bu çalışma için gerekli olan işlem sırası aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Elektrik makinaları, güç sistemleri ve kontrol anabilim dalları alanına giren disiplinler arası bir çalışma yapılacağından bu disiplinler hakkında bilgi toplanması
- Güç sistem modellerinin Matlab ve Simulink programları için oluşturulması
- Oluşturulan simulasyon modelleriyle klasik kontrol yöntemlerinin gerçekleştirilmesi
- Önerilen Hiyerarşik Fuzzy kontrolörün sistem modeline uygulanması ve performansının test edilmesi amacıyla diğer kontrol yöntemleriyle karşılaştırılması

Hiyerarşik Fuzzy yöntemi ikiden çok girişe sahip sistemlerde klasik Fuzzy kontrolörlerdeki büyük kural tablosu yerine küçük kural tablolarıyla çalıştığı için hesaplamalardaki işlem fazlalığını azaltmaktadır. Hiyerarşik Fuzzy 'nin bu özelliğinden dolayı bu çalışmada uyarım kontrol sistemine ilave kontrolör olarak uygulanması gerçekleştirilmiştir. Önerilen bu kontrol yöntemi Çizelge 1.1 'de belirtildiği gibi daha önce farklı alanlara uygulanmıştır. Ancak literatürde senkron generatör uyarım kontrol sistemlerine daha önce uygulanmamıştır.

Çizelge 1.1 Literatürdeki Hiyerarşik Fuzzy Yöntemiyle İlgili Çalışmalar

Raju ve Zhou (1993)	Yönteme adaptiflik özelliği kazandırılmıştır
Gegov ve Frank (1995)	Şehir trafik ağı davranışının simulasyonu yapılarak, kural sayısının azaltılması vurgulanmıştır
Wang (1998, 1999)	Teorik olarak evrenselliği ispatlanmış ve diğer birçok kontrol uygulaması için de kullanılabilceği ifade edilmiştir
Joo ve Lee (2002)	Top ve terazi sistemi problemine uygulanmış ve çok daha az olan kural sayısına karşın iyi bir sonuç elde edilmiş, ikinci katmandaki fiziksel anlamı olmayan sinyallerle kural oluşturma problemini gidermek için yeni bir yapı önerilmiştir.
Lee vd. (2003)	Klasik fuzzy kontrolördeki 625 olan kural sayısı 75 'e indirilmiş ve ölçekleme katsayılarının seçimi konusu araştırılmıştır
Nürnbergger (2003)	Yinelemeli neuro- fuzzy ağına uygulanmıştır
Emara ve Elshafei(2004)	Robot kontrol uygulaması yapılmıştır

1.6 Bölümlerin Özetleri

İlk bölüm olan giriş bölümünde güç sistemi üretim birimi kontrolleri ve uyarım kontrol sistemi hakkında ön bilgi verilmiştir. Sonra literatürde uyarım kontrol sistemine ilave kontrolör olarak kullanılan PSS çalışmaları ve farklı kontrol yöntemleriyle yapılan PSS tasarım çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra ise çalışmanın amacı, kullanılan yöntem tanıtılmış ve bölüm özetleri takdim edilmiştir.

İkinci bölümde güç sistemlerinin genel yapısı ve senkron generatörler hakkında bilgi verilerek uyarım kontrolü açısından güç sistemlerinde üretim kontrol çevrimlerine değinilmiştir.

Üçüncü bölümde ise güç sistemi üretim kontrollerinden uyarım kontrol çevrimi ve uyarım kontrolüne yardımcı geribesleme kontrolörü olan PSS hakkında bilgi verilmiştir.

Dördüncü bölümde, güç sistemlerinde modelleme kavramı, senkron generatör modellerinin eşdeğer devre ve denklemleri verilmiştir. Geçici hal kararlılığında kullanılan nonlineer salınım denklem modeli ve küçük sinyal kararlılığında kullanılan lineerize edilmiş modelden bahsedilerek tek makinalı sonsuz baraya bağlı (SMIB) sistemin blok diyagram oluşumu anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, öncelikle, ilave bir kontrolör içermeyen sistem modelinin dinamik davranışı incelenerek simülasyonu yapılmıştır. Aynı zamanda yapılacak tüm simülasyon çalışmalarında kullanılacak model ve simülasyon parametreleri, uygulanan bozucu etkinin yeri, zamanı ve şiddeti, gözlenen sistem parametreleri, işletim koşulları ve sayısal performans değerlendirmesi hakkında bilgi verilmiştir. Sonra, geleneksel güç sistem stabilizatörü (CPSS) uyarım kontrol sistemine ilave edilerek sistem performansı gözlenmiştir. CPSS için kullanılan parametreler literatürde yapılan bir uygulamadan aynen alındığı için CPSS tasarımından bahsedilmeye gerek görülmemiştir. Daha sonra ise CPSS kaldırılarak uyarım kontrol sistemine PID kontrolör konulmuş ve sistem performansı incelenmiştir. Bilinen bir yöntem olan PID yönteminin teorisinin anlatılmasına gerek görülmemiş sadece uygulamada kullanılan PID kontrolörün parametrelerinin ayarlanması anlatılmıştır. Son olarak da CPSS yerine kullanılan Mamdani tipi Fuzzy kontrol metodu kısaca tanıtılarak uygulamada kullanılan Fuzzy kontrolörün parametreleri hakkında bilgi verilmiş ve sistem performansı incelenmiştir.

Altıncı bölümde ise önce Sugeno tipi Fuzzy kontrol metodu ve uygulamada kullanılan ANFIS kontrol yöntemi kısaca tanıtılmıştır. Sonra da Mamdani ve ANFIS kontrol metodlarının kullanıldığı önerilen kontrol yönteminin ortaya çıkışı, kullanıldığı çalışmalar ve teorisi hakkında bilgi verilerek, önerilen HFPSS kontrolör tasarımı ve parametrelerinin elde edilmesi anlatılmıştır. Son olarak da önerilen kontrolörün SMIB sisteminde PSS yerine uygulanarak performansı incelenmiştir.

Yedinci ve son bölüm olan sonuçlar ve değerlendirme kısmında ise aynı model üzerinde ve aynı veriler kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları ve sayısal değerlendirme kriterleri ile CPSS, PID ve Fuzzy kontrolörler ile önerilen Hiyerarşik Fuzzy yönteminin performansları karşılaştırılmış ve değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmaya ilave veya bu çalışmadan sonra yapılabilecek çalışmalar hakkında önerilerde bulunulmuştur.

2. GÜÇ SİSTEMLERİNİN YAPISI

Bir elektrik güç sistemi göz önüne alındığında, böyle bir sistemin birbirine göre hareketli elemanların birleşiminden oluştuğu görülür. Bu elemanları özelliklerine göre güç ve denetleme elemanları olarak iki grupta toplayabiliriz.

Güç Elemanları: Mekanik enerji sağlayan tahrik sistemleri ‘prime movers’ (ör; türbinler), üreteçler (senkron generatörler), transformatörler, enerji iletim ve dağıtım hatları ve elektriksel yükler.

Denetleme Elemanları: Tahrik sistemlerine ilişkin mekanik regülatörler (hız regülatörleri), senkron generatörlere ilişkin uyarma sistemleri, röleler ve açma kapama elemanları gibi.

Bu ayırmadan da anlaşılacağı gibi bir enerji sistemi elektromekanik bir sistemdir.

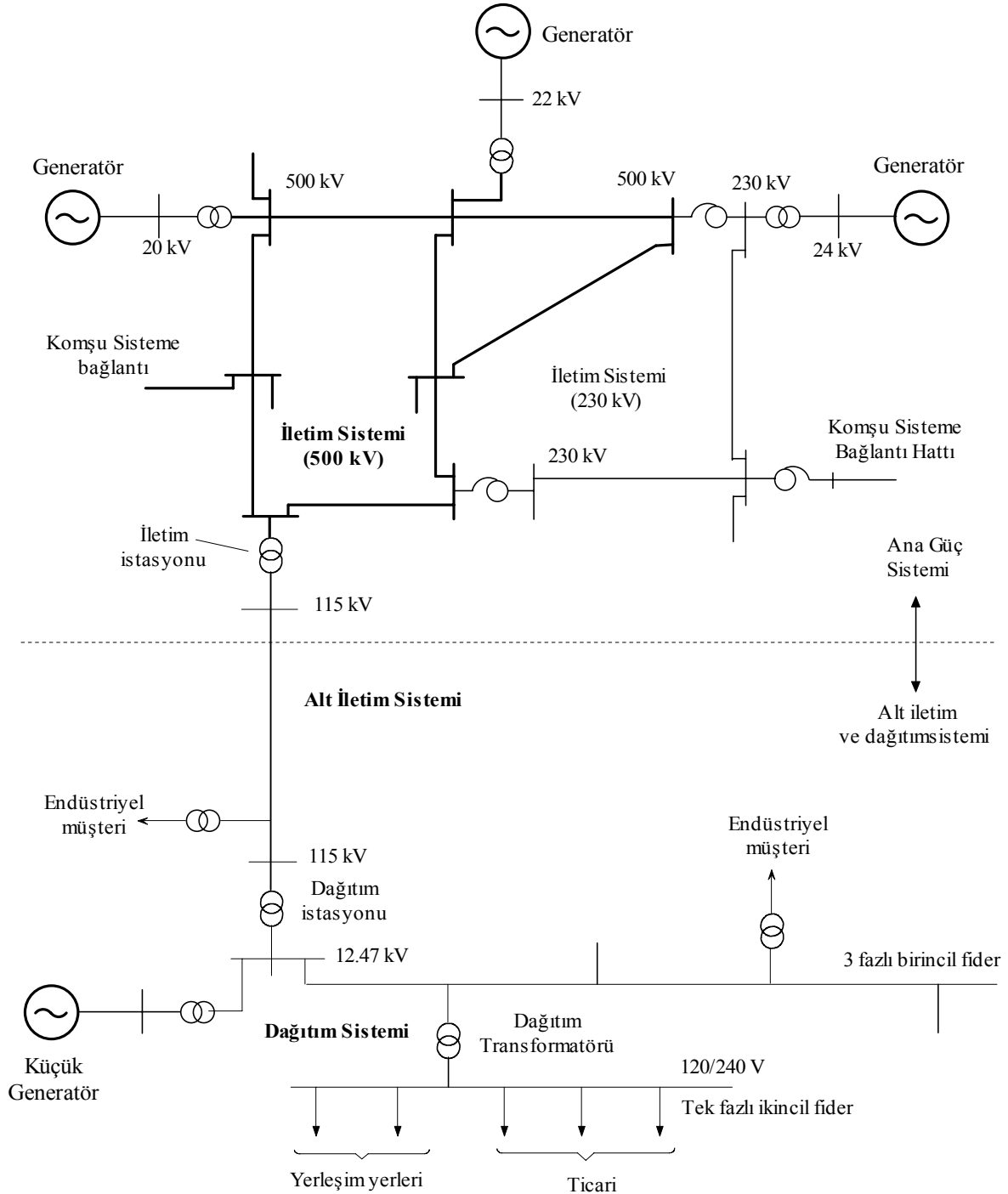
Güvenilirlik ve kalite, bir güç sisteminden istenilen en önemli özellik olduğundan senkron generatörler güç sistemlerinin en önemli elemanıdır. Sistemin güvenilir bir şekilde işleyişi, sistemde bulunan senkron generatörlerin birbirleriyle paralel çalışmalarına bağlıdır. Bir senkron generatörün senkronizmadan ayrılmasıyla sistemin gerilim ve akımında salınımlar oluşur ve enerji iletim hattı istenmeyen bir bölgede otomatik olarak röleler vasıtasıyla devre dışı kalır. Böyle bir durumda bu generatör devreden çıkartılarak tekrar senkron çalışma haline dönüştürüldükten sonra devreye alınarak yeniden yüklenir. Yüklenme gereği bir senkron makine hızlanmaya yada yavaşlamaya başlarsa, Makinede oluşan senkronlayıcı kuvvetler makineyi senkronizmada tutarlar.

Diğer taraftan elektriksel yükler ideal olarak sabit bir gerilim ve sabit bir frekansla beslenmelidir. Başka bir deyişle hem gerilim hem de frekans elektriksel yükün gerektirdiği değerde olmalıdır. Öyle ki bunlardaki değişim belli bir toleransın içinde kalmalıdır (Tacer, 1990).

Elektrik güç sistemleri yapısal ve büyüklük olarak birbirlerinden farklı olmalarına karşın tümü aşağıda belirtilen temel karakteristiklere sahiptirler (Kundur, 1994). Sabit gerilimde çalışan üç fazlı AC sistemlerden oluşurlar. Üretim ve iletimde üç fazlı cihazlar kullanılır. Endüstriyel yükler her zaman üç fazlıdır. Tek fazlı yükler (yerleşim yerleri ve konutlarla ilgili) ise üç fazlı sistemde dengenin sağlanması açısından her zaman dengeli olarak dağıtılır.

Elektrik güç sistemleri geleneksel olarak üretim, iletim ve dağıtım olmak üzere üç bölüme ayrılabilir (Machowski vd., 1997). Elektriğin üretimi için senkron makineler kullanılır. Tahrik sistemleri birincil enerjileri (fossil, nükleer veya hidrolik gibi) mekanik enerjiye çevirirler. Bu mekanik enerji de senkron generatörler tarafından elektrik enerjisine çevrilir.

Geniş bir alana dağılmış önemli bir mesafede bulunan tüketicilere üretilen enerji iletilir. Buda farklı gerilim seviyelerinde işletilen alt sistemlerin birleşimiyle oluşan bir iletim sistemini gerektirir. Şekil 2.1 'de modern bir güç sisteminin temel elemanları gösterilmiştir. Elektrik enerjisi santrallerde üretilir ve ferdi bileşenlerden (iletim hatları, transformatörler ve anahtarlama cihazları) oluşan kompleks ağ üzerinden tüketiciye iletilir (Kundur, 1994).



Şekil 2.1 Tipik bir güç sistemi şeması (Kundur, 1994)

İletim hatları; iletim, alt iletim ve dağıtım sistemi olarak üç alt sisteme ayrılarak incelenebilir.

İletim sistemleri; sistemdeki tüm santralleri ve ana yük merkezlerini birbirine bağlar. Entegre güç sisteminin belkemiğidir ve en yüksek gerilim seviyelerinde (230 kV ve üzeri) işletilir. Üretim gerilim seviyeleri yani generatör çıkış gerilim değerleri genellikle 10-35 kV aralığındadır. Bunlar iletim gerilim seviyesine yükseltilir ve alt iletim sistemlerine iletilir. Burada ise alt iletim gerilim seviyesine düşürülür.

Alt iletim sistemleri ise; gücü daha küçük değerlerde (tipik olarak 65 – 138 kV arası) iletim alt sistemlerinden dağıtım alt sistemlerine iletir. Büyük endüstriyel tüketiciler genellikle doğrudan alt iletim sisteminden beslenir. Bazı sistemlerde, alt iletim ve iletim devreleri arasında belirgin bir sınır yoktur. Sistem genişleyip büyüdükçe ve iletim için daha yüksek gerilim seviyelerine gerek oldukça eski iletim hatları alt iletim işlevi görürler.

Dağıtım sistemi, gücün ferdi tüketicilere iletiildiği son kısımdır. İlk dağıtım gerilimi tipik olarak 4–34.5 kV arasındadır. Küçük endüstriyel tüketiciler bu gerilim seviyesindeki ilk fiderlerden beslenirler. Besleme gerilimi 120/240 V olan bir fazlı dağıtım fiderleri ise konutları ve ticari tüketicileri beslerler.

Küçük üretim istasyonları yükün yakınında kurulmuştur ve alt iletim ve dağıtım sistemleriyle doğrudan bağlantılıdır. Komşu üretim merkezleri ile bağlantılar genellikle iletim sistemi seviyesinde oluşur. Tüm sistem birçok üretim kaynakları ve birkaç iletim katmanından oluşur. Bu yüksek derecedeki yapı ile sistemin tüketicilere kesintisiz hizmet vermesi ve beklenmedik durumlara karşı dayanıklı olması sağlanır (Kundur, 1994).

2.1 Ülkemizdeki Güç Sistemi Yapısı

Enerji üretiminde 3 fazlı senkron generatörler kullanılır. Gerilim değeri pratikteyalıtım koşulları ile sınırlıdır. İletim hatlarındaki gerilim değeri yüzbin voltlar seviyesinden 760 kV ‘a kadar değişim gösterir. Ülkemizde ise uzun mesafelerde iletim için 380 kV, orta mesafelerde ise 66 kV ve 154 kV gerilim değerleri kullanılmaktadır. Bu gerilim seviyelerinin sağlamlasında güç transformatörleri kullanılmaktadır. Böylece üretilen enerjinin binlerce kilometre uzağa taşınması sağlanır. Son varış noktasında ise tekrar güç transformatörleri ile yüksek gerilim seviyesi daha düşük seviyelere indirilerek dağıtım yapılır. Ülkemizdeki dağıtım sistemi 34.5 kV seviyesinin altındaki trafo, hat ve şebeke tesislerini kapsamaktadır. Bunlar genellikle 30-35 kV, 15 kV, 10.5 kV, 6.3 kV ve 3.3 kV gerilimlerden alt gerilimlere enerji aktaran trafolardır. Alçak gerilim tesisleri 0.4 kV üzerinden enerji vermektedirler. 380 kV ‘luk Türkiye enterkonnekte sistemi 28 makine, 95 bara ve 123 hat içeren bir model ile temsil edilebilir (Şerifoğlu, 2001).

2.2 Senkron Generatörler

Senkron generatörlerin yapıları ve kapasiteleri çok büyüktür. Büyük güçlerde enerji üretirler. İmalatı diğer endüksiyon makinelerine göre pahalı olmasına rağmen büyük güçlerde yüksek verimle çalışmaları avantajlarıdır (Ong, 1997).

Tarihi süreç içerisinde yeni kurulan güç sistemlerinde ve senkron generatörlerde, üretilen MW başına maliyeti azaltmak amacıyla güç artırımına gitmek genel bir eğilim olmuştur. Ancak yakıt gideri ucuz temin edilebilen küçük işyerlerinde küçük çaplı güç tesisleri de ekonomik olabilmektedir. Genellikle kullanılan senkron generatörler 100-1300 MW arası güç değerlerinde olmaktadır (Machowski vd., 1997).

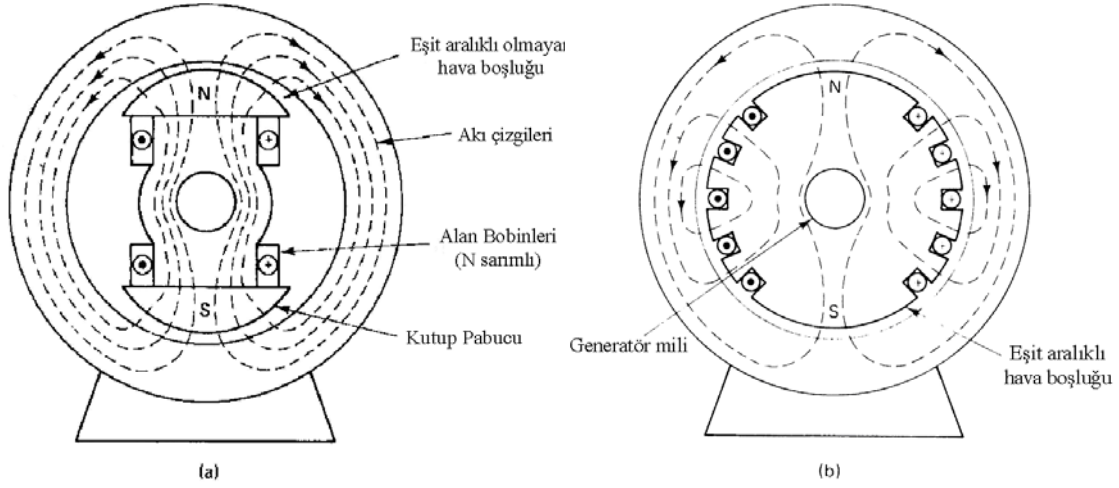
Genel olarak bir senkron generatör iletim hattına bir yükseltici transformatör üzerinden bağlanır. Generatör ve transformatör arasındaki bağlantı, küçük bir ünite olması durumunda kablolarla, büyük güçlerde ise, birkaç adet tek fazlı ekranlanmış bara üzerinden yapılır. Genellikle generatör trafosu olarak tank tipi trafo kullanılır ve dışarıda bir yere yerleştirilir. Transformatör ise yüksek gerilim kabloları veya kısa havai hatlar üzerinden ikincil baraları besler.

Senkron generatörler temel olarak yüksek hızlarda çalışan buhar ve gaz türbinleri “turbogeneratörler” veya düşük hızlarda sürülen su türbinleri olarak basitçe sınıflandırılabilir. Merkezkaç kuvvetini düşürmek amacıyla yüksek hızda çalışan turbogeneratörler çapları küçük, aksel uzunlukları ise büyük olarak imal edilirler. Tipik olarak iki veya dört elektriksel kutba sahiptirler ve 50 Hz ‘lik şebeke için sırasıyla 3000 veya 1500 devir/dk ile sürülmeleri gerekir. Buna karşılık düşük hızlı su türbinlerinde kullanılan generatörler tipik olarak 500 devir/dk veya daha düşük devirlerle sürülürler. Çok fazla sayıda elektriksel kutba sahiptirler, çapları büyük aksel uzunlukları küçüktür. Manyetik kutup sayısı güç sisteminin gerektirdiği hıza ve nominal frekansına bağlıdır.

Tüm generatörler stator ve rotor adı verilen iki ana manyetik parçadan oluşurlar. Her ikisi de manyetik çelikten imal edilir. Stator gövdesi ve iç oluklar ince tabakalar halindeki ferromanyetik metallerin birleştirilmesinden meydana gelmiştir. Sisteme güç veren ve yük akımını taşıyan armatür sargısı, stator iç yüzeyinde eşit aralıklarla açılmış oluklara yerleştirilmiş üç özdeş faz sargısından oluşur. Bu sargılar faz eksenleri arasında $2\pi/3$ radyan (120°) elektriksel açı olacak şekilde kutupların üzerine eşit olarak dağıtılmış ve rotor milinin hareketine karşı yalıtılmıştır (Ong, 1997).

Rotor tipleri, rotor kesitine göre çıkık ve yuvarlak olarak ikiye ayrılırlar (Şekil 2.2a ve b). Çıkık kutuplu yapı (yüksek kutup sayısı ve geniş çaplı) düşük hızlı uygulamalarda yaygın

olarak kullanılır. Bu tip senkron makineler hidrolik türbinlerin düşük hızlarını karşılamak için kullanılırlar. Silindirik veya yuvarlak rotorlu yapı ise, santrifüj gücünün kabul edilebilir limitler içinde tutulabilmesi için küçük çaplı yapı zorunluluğu olan yüksek hızlı uygulamalarda kullanılmaktadır. İki ve dört kutuplu silindirik rotorlu senkron generatörler buhar türbinlerindeki yüksek hız gereksinimlerini karşılarlar. Uzun silindirik rotorlarda alan sargısı için kutupların her iki yanında eksene paralel oluklar bulunmaktadır (Ryff, 1988).



Şekil 2.2 İki kutuplu senkron generatör yapısı (a) Çıkık kutuplu (b) Yuvarlak rotorlu (Ryff, 1988)

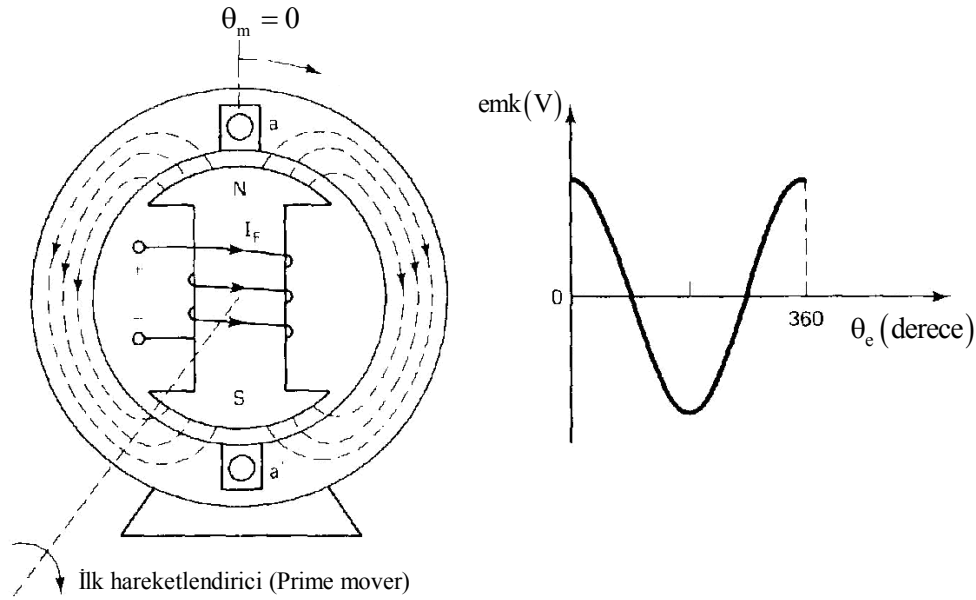
Rotor buna ilaveten kısa devre edilmiş damper veya amortisör adı verilen sargıları da içerir. Bu sargılar rotor mekanik osilasyonlarının sönümlenmesi için kullanılmaktadır. Yüksek hızlı yuvarlak rotorlu generatörlerde damper sargıları genellikle iletken kama formunda uyarım sargısı ile aynı şekilde oluklara yerleştirilir. Düşük hızlı generatörlerde ise kutup yüzeyindeki aksel oluklara yerleştirilir (Machowski vd., 1997).

Güç sistem simülasyonlarında elde edilen deneyimler sonucunda çoğu senkron generatörün doğru bir şekilde modellenebilmesi, eşdeğer ideal makine devresine alan sargısı yanında bir veya iki takım damper sargısı ilave edilmesiyle mümkün olmaktadır. Eşdeğer makine modelindeki damper sargıları, fiziksel olarak amortisör sargılarını veya rotor kutup gövdelerinde sönümleyici eddy akımlarını temsil ederler (Ong, 1997).

DC akımla beslenen rotor uyarım sargısı, uyarım akımı büyüklüğü ile orantılı olarak bir dönen manyetik akı üretir. Bu dönen manyetik akı üç fazlı stator armatür sargısının her bir fazı üzerinde bir elektromotor kuvvet (emk) endükler. Bu endüklenen emk ise güç sistemine AC akım akışı sağlar.

Şekil 2.3 'de ise senkron generatörden gerilim üretilmesi gösterilmiştir. Basitleştirmek

amacıyla burada tek bir stator sargısı gösterilmiştir. Gerçekte generatörlerde üç faza ait çok sayıda bobin stator üzerindeki oluklara dağılmış durumdadır. Her bobinde ise birçok sarım bulunmaktadır.



Şekil 2.3 Senkron generatör rotor döner manyetik alanı ve endüklediği gerilim (Ryff, 1988)

Bu AC armatür akımları kendi armatür reaksiyonlarını üreterek birleşik etkisi sabit olan fakat rotorla aynı hızda dönen bir manyetik akı oluştururlar. Uyarım akısı ve armatür reaksiyonu akısı birlikte yeni bir akı meydana getirirler. Bu birleşik akı da rotora göre durağan, statora göre ise senkron hızla dönmektedir. Edi akımları nedeniyle stator gövdesinde oluşacak demir kayıplarının önlenmesi için stator gövdesinin şaft yönünde aksel olarak parçalı biçimde lamine olarak yapılması gerekmektedir. Bununla beraber manyetik akı rotora göre durağan olduğu için rotor gövdesi komple çelikten yapılır. Bazı nedenlerle rotor hızı senkron hıza göre farklılık gösterince, akı rotora göre durağan olmadığından damper sargılarında akımlar endüklenir. Lenz yasasına göre bu akımlar kendilerini meydana getiren akı değişimine karşıdır. Bu nedenle senkron hıza yeniden ulaşılmasına ve rotor osilasyonlarının sönümlemesine katkıda bulunurlar (Machowski vd., 1997).

Üç fazlı senkron makineler enerji üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Birkaç makine birlikte çalışırken senkron hızda yani sabit hızda çalışırlar. Yani rotor bir mekanik güç kaynağına bağlıdır ve analizleri basitleştirme açısından sabit hızla döndürüldüğü düşünülür (Rizzoni, 1993). Rotor hızı ile üretilen gerilimin frekansı direkt olarak bağlantılıdır. Bu ilişki (2.1)'de gösterilmiştir. Buna göre generatör dönüş hızı ile üretilen elektiriğin frekansı doğru orantılıdır. Yani dönme hızı artarsa frekans da artar ya da tersi olur. Generatörün mekanik hızı

ile elektrik frekansı senkronize olduğundan senkron generatör olarak isimlendirilmiştir (Weedy ve Cory, 1998).

$$f = \frac{p \cdot n}{60} \quad (2.1)$$

f : üretilen frekans (Hz) p : rotordaki çift kutup sayısı n : rotor hızı (dev/dk)

Benzer ilişki (2.2) mekanik açı ile (rotor dönüş açısı) üretilen gerilimin açısı arasında da vardır. Örneğin dört kutuplu bir makinede rotor bir kez döndüğünde elektriksel açı iki tam dönüş yapmış olacaktır.

Mekanik dönüş hızı rad/s cinsinden yazılırsa (2.2) ifadesi (2.3) deki gibi yazılabilir. AC gerilim üretmek için kullanılan senkron generatörün kutup sayısı üretilecek gerilimin frekansı ve rotor mil hızına göre belirlenir. Buna göre hidroelektrik santrallerde rotor hızı düşük olduğundan kutup sayısı da fazla olmaktadır.

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m \quad (2.2)$$

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.3)$$

θ_m : kutup başının taradığı açı (radyan)

ω_m : mekanik açısal dönüş hızı (rad/s)

θ_e : elektriki olarak taranan açı (radyan)

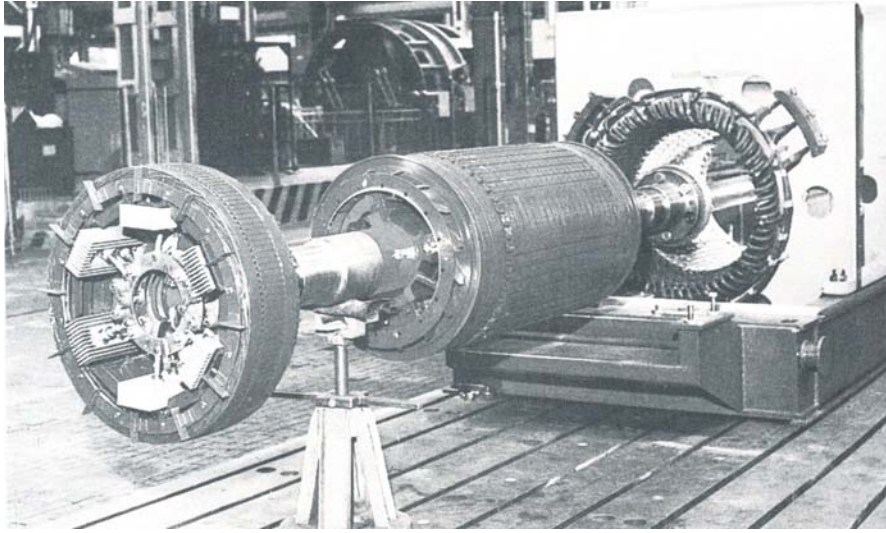
ω_e : elektriki açısal dönüş hızı (rad/s)

Gerilimin endüklendiği armatür sargıları statorunda, gerilimi endükleyen alan sargısı ise rotor üzerindedir. Alan sargısı dönen kısımda olduğu için alan sargısının DC akımla beslenme problemi değişik şekillerde çözümlenmelidir. Bunun için değişik yöntemler vardır. Klasik yöntem fırça-bilezik sistemi ile olmakla beraber, dönen mekanizma içerisinde yerleşik, statik besleme sistemleri ile de sağlanmaktadır. Armatür sargısı alan sargısına göre daha karmaşıktır ve daha büyük akım ve gerilim değerlerini taşır. Bundan dolayı elektrik ve mekanik açıdan daha fazla korumaya alınmalıdır.

Rotor üzerindeki uyarım alan sargısından geçen DC akıma “ I_f ” uyarım alanı akımı denir. Uyarım akımı genellikle uyarıcı adı verilen küçük bir DC generatörden sağlanır. Uyarıcı generatör ile aynı mil üzerinde veya ayrı da olabilir. Uyarım alanı beslemesi için gereken DC uyarım akımı farklı yöntemlerle elde edilebilir. Rotor üzerindeki uyarım alan sargısının beslemesi için, bir uyarım tipinde rotor miline yerleştirilen bir çift bilezik ve fırça düzeneği kullanılırken, diğer bir uyarım sistemi yapısında ise çıkış geriliminden enerjilenen statik

yarıiletken ‘solid state’ doğrultucular kullanılır. Diğer bir uyarıcı tipi olan “fırçasız uyarıcı” tipinde ise, ana rotora bağlı farklı bir rotor üzerine yerleştirilen AC sargıdan elde edilir (Şekil 2.4). AC gerilim rotor üzerine yerleştirilmiş yarı iletken doğrultucular ile DC akıma çevrilir. Bu sistem kendi kendine uyarılan bir sistemdir ve dışarıdan güce gereksinim duymaz. Fırçasız uyarım sistemleri 700 kW ‘a kadar yapılırlar ve 1000 MVA gücündeki türbini kontrol edebilirler. Fırça ve doğrultucuların olmaması sistem güvenilirliğini artırır. Alan akımı için tipik gerilim seviyeleri 125V – 500 V arasındadır (Ryff, 1988).

Uyarım akımı ayarlanarak stator sargısı üzerinde endüklenen gerilim ayarlanabilir. Bunun için uyarım kontrol sistemlerinden yararlanır. Böylece generatör çıkışında gerilim kontrolü sağlanmış olur.



Şekil 2.4 Fırçasız uyarımlı AC uyarım sistemi (Ryff, 1988)

2.3 Güç Sistemi Dizaynı

Güç sistemi dizayn edilirken aşağıdaki temel gereksinimleri sağlamasına dikkat edilmelidir (Kundur, 1994).

- Sistem sürekli olarak aktif ve reaktif güç talebini karşılayabilmelidir. Elektrik enerjisi diğer enerji tipleri gibi kolayca depolanmadığı için aktif ve reaktif güç için emniyetli çalışma şartı sağlanmalı ve her zaman kontrol edilmelidir.
- Sistem enerjiyi minimum maliyet ve minimum ekolojik zararla sağlamalıdır.
- Enerji üretim sisteminin kalitesini belirleyen frekans, gerilim ve güvenilirlik seviyesi değerleri minimum standartlara uygun olmalıdır.

Bu gereksinimlerin karşılanabilmesi için güç sistemin elemanları üzerinde kontroller mevcuttur. Üretim ünitesi, tahrik sistemi ve uyarım sistemi kontrollerini içerir.

Tahrik sistemi kontrolleri, hız regülasyonu ve enerji sağlayan sistem değişkenleri (buhar basınçları, sıcaklıklar ve akış) ile ilgilidir. Uyarım kontrolü ise generatör çıkış gerilimi ve reaktif güç çıkışının regülasyonunu sağlar. (Kundur, 1994).

Tüm bu kontroller sistem değişkenlerinin belirli limitler içerisinde kalmasını sağlayarak sistem gerilim ve frekansına katkıda bulunur. Bu da güç sisteminin sağlıklı işletimini sağlar. Ayrıca güç sisteminin dinamik performansını artırır ve bozucu etkilere karşı dayanma kabiliyeti kazandırır. Kontrol şartları güç sisteminin işletim durumuna bağlıdır. Normal şartlar altında etkili bir şekilde çalışan kontroller gerilim ve frekans değerlerini nominal değerlerine çok yakın bir şekilde tutarlar. Anormal bir durumda normal işletim şartlarının yerini yeni işletim şartları alır. Ana sistemdeki arızalar nadiren sistem güvenliğini felç edecek sonuçlar doğurabilir. Bu tür arıza durumları genellikle sistem kapasitesini aşan bozucu etkilerin birleşimiyle oluşur. Bozucu etkiler (hortum, şiddetli fırtına veya dolu yağmuru, cihaz arızası, insan hatası ve uygun olmayan dizayn) güç sistemini zayıflatır ve sonuçta arızalar oluşur. Ana arıza önlenemezse sistemin kademeli yapısından dolayı arıza sistemin küçük bir bölgesinde kalabilir.

Son 40 yıldaki analog ve dijital elektronik alanındaki gelişmeler sayesinde güç sistemlerinde kullanılan senkron makinalarda ve bunlara bağlı kontrol ve kumanda elemanlarında da farklılaşmalar meydana gelmiştir. Örneğin önceleri yalnızca DC uyarım sistemleri bulunmakta iken, daha sonraları AC ve statik uyarım sistemleri de kullanılmaya başlanmıştır. Bu da gerilim ve güç açısı kararlılığının artırılması için uygulanan kontrol yöntemlerinde değişimler gerektirmiştir. Örneğin statik uyarım sistemlerinde zaman sabitinin düşük olmasıyla çok hızlı çalışan uyarım sistemleri, güç sistemi üzerinde ilave osilasyonlara neden olmuştur.

2.4 Generatör Kontrolleri

Genel olarak enerji üretim sistemindeki üretim ünitesi içerisinde bulunan senkron generatörün kontrolleri ikiye ayrılır.

- Hız Kontrol Ünitesi
- Gerilim Kontrol Ünitesi

Enerji üretim birimlerinin çalışma sisteminden bahsederek, bir generatör diğer generatörlerle senkron halde yani aynı hız ve gerilim değerlerinde paralel bağlı olarak çalışmaktadır. Ayrıca bu generatör gruplarından oluşan enerji üretim birimleri de diğer enerji üretim birimleriyle senkron halde paralel bağlanarak enterkonnekte sistemi oluştururlar. Tüm sistem eşzamanlı olarak birbiriyle enterkonnekte çalıştığından hız ve gerilim kontrolleri sistemin önemli bir

parçasıdır ve sistem üzerinde önemli rol oynarlar. Generatörler senkronize bağlandığı zaman hız regülatörü olsa da olmasa da tüm generatörlerin hızları birbirine eşit kalır. Bu durumda hız regülatörleri, generatörler arasındaki güç dağılımının kontrol edilmesini sağlarlar. Operatörler tarafından regülatörün referans girişi değiştirilerek generatör güç ayarı yapılır. Aynı olmasa da AVR 'ler için de durum böyledir. Enterkonnekte güç sisteminin gerilimi nominal değerlere çok yakındır. AVR 'ler esasında generatör tarafından üretilen reaktif gücü kontrol eder. Tabii bu da alt ve üst limitlerle sınırlıdır. Enterkonnekte sistemde bir değişim olduğunda hız ve uyarım regülatörleri birincil amaçlarını yerine getirirler. Sistemde yük azalırsa generatörler hızlanır ve hız regülatörleri tarafından belirlenen yeni kararlı hız değerine ulaşırlar. Sonuçta sistemden çekilecek güç, generatörlerin etiket değerlerine göre paylaşılacaktır. AVR 'ler ise çıkış gerilimini nominal değer ve reaktif güç ihtiyacına uygun bir değerde tutmaya çalışırlar. Her iki kontrol de, enterkonnekte sistem içerisinde sürekli oluşan küçük yük değişimlerinde frekans ve gerilim değişimlerini minimize etmeye çalışır. Aslında generatör kontrollerinin ana amacı da budur. Yüklü bir generatörün sistemden ayrılması ender bir olaydır. Bu durumda hız regülatörü tahrip edici aşırı hızları önlemeye, AVR ise tahrip edici aşırı gerilimleri önlemeye çalışır (Rogers, 1999).

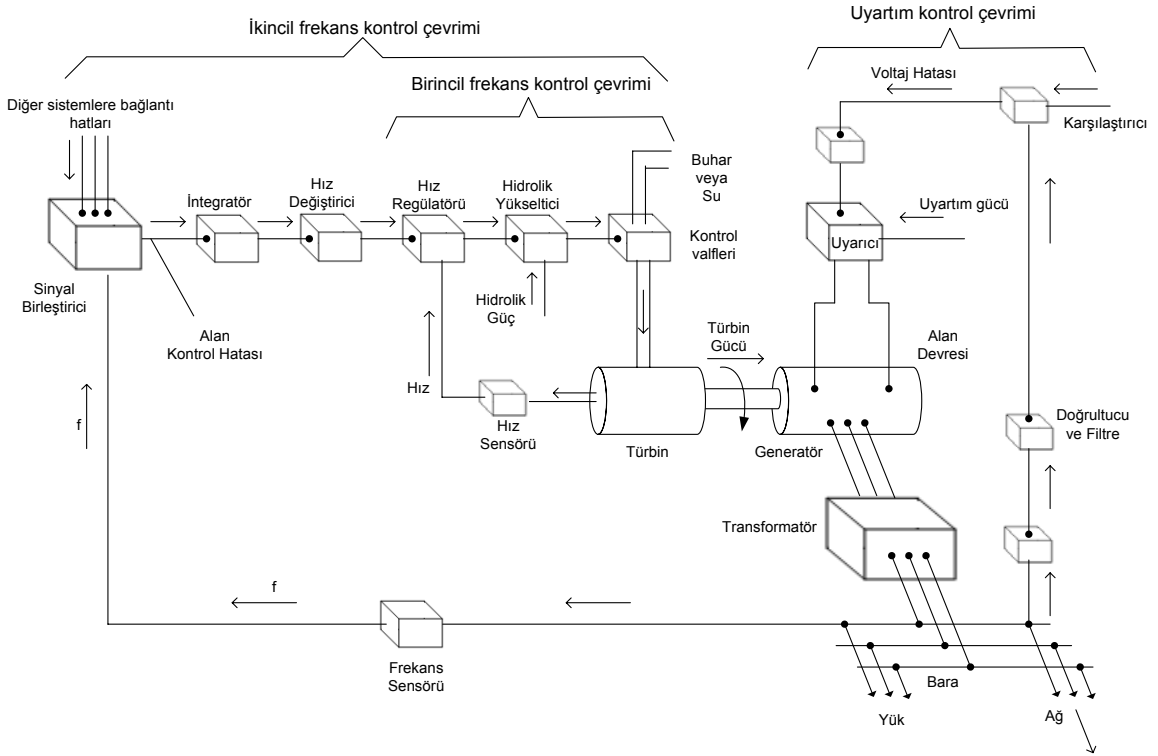
2.4.1 Generatör Kontrol Çevrimleri

Senkron generatörlerin yapısından kaynaklanan hız-frekans ve uyarım akımı-gerilim ilişkilerinden yola çıkılarak iki adet kontrol çevrimi geliştirilmiştir.

- Frekans kontrol çevrimi (birincil ve ikincil olarak)
- Uyarım kontrol çevrimi

Bu iki geribeslemeli kontrol çevrimi ile senkron generatör çıkışlarındaki frekans ve gerilimin regülasyonu sağlanır (Şekil 2.5). Ve sırasıyla generatörün aktif ve reaktif güç çıkışını kontrol ederler. Uyarım kontrolü daha hızlıdır ve sistem kararlılığında frekans kontrolüne göre daha önemlidir (Elgerd, 1982).

Frekans kontrol çevrimi, Birincil ve ikincil olmak üzere iki döngüye sahiptir. Birincil döngüde hız regülatörü ve kontrol valfleri vardır. Aktif güç çıkışını ve frekansı yani generatör mil hızını düzenler. Hızlı yük değişimlerine karşı aktif güç dengesi sağlanır. Kontrol valfleri ile buhar veya sıvı akış kontrolü sağlanır. Hız regülatörü ile de frekans kontrolü sağlanır. Yani birincil döngü ile aktif güç dengesi sağlanmasının dolaylı etkisiyle hız ve frekansın kabaca kontrolü sağlanır.



Şekil 2.5 Frekans kontrol ve uyartım kontrol çevrimleri (Elgerd, 1982)

İkincil döngü ile de diğer güç havuzlarıyla aktif güç alışverişi yapılarak frekansta hassas ve iyi bir ayar sağlanır. Fakat bu döngü hızlı yük ve frekans değişimlerine karşı duyarsızdır. Buna karşın uzun süreli değişim trendlerinde etkilidir (Elgerd, 1982).

Uyartım kontrol çevriminde ise çıkış geriliminin genliği kontrol edilir. Çıkış gerilimi sürekli olarak algılanır, doğrultulur ve filtrelenir. Çıkış gerilim değerinin DC eşdeğerini ifade eden bu DC sinyal " V_i ", DC referans gerilim değeri " V_{REF} " ile karşılaştırılır. Oluşan hata gerilimi sinyali, yükseltme ve kırılma işlemlerinden sonra uyartım sisteminin girişine verilir. Uyartım sistemi çıkış gerilimi V_f ise generatör alan sargısını besler. Senkron generatörlerin uyartım sistemi kontrol edilerek gerilim ve reaktif güç kontrolü sağlanır (Elgerd, 1982).

Uyartım ve frekans kontrol çevrimleri birbirlerinden bağımsız değildirler. Yani birbirleriyle etkileşim içindedirler. Uyartım kontrol çevrimi generatörün ürettiği emk'nın genliğini etkiler. Generatörün iç emk'sındaki değişim de aktif gücün genliğini değiştirir. Ve bu güç değişikliği de frekans kontrol çevrimini etkiler. Uyartım kontrol çevrimi çok daha hızlı olduğundan aktif güçte oluşan değişimler, frekans kontrol çevrimini çok daha yavaş etkiler (Elgerd, 1982).

3. UYARTIM SİSTEMLERİ

Genel olarak bir uyarıcı ve bir gerilim regülatörünü içeren uyartım sisteminin ana görevi senkron generatöre DC alan akımı sağlamaktır.

Güç sistemleri açısından bakılırsa, uyartım sistemleri etkili bir gerilim kontrolü sağlamalı ve güç sisteminin kararlılığını arttırmalıdır. Geçici hal kararlılığını arttırmak için bozucu etkilere karşı hızlı cevap verebilme kabiliyeti olmalı ve küçük sinyal kararlılığını arttırmak için generatör alanını modüle etme yeteneğine sahip olmalıdır (Kundur, 1994).

Tarihsel olarak uyartım sistemleri güç sistemlerinin performansının artırılmasına sürekli olarak artan bir şekilde katkıda bulunmuşlardır. İlk uyartım sistemleri, generatör çıkışındaki istenen gerilim ve reaktif güç dengesini sağlamak için manuel olarak kontrol edilmiştir. İlk zamanlar çok yavaş olan otomatik gerilim kontrolü temelde ikaz operatörünün rolünü üstlenmiştir. Küçük sinyal kararlılığını ve geçici hal kararlılığı arttırmak için 1920'li yıllarda sürekli ve hızlı çalışan regülatörler keşfedilmiştir. Uyartım sistemlerinin değiştirilmesine olan ilgi sayesinde, kısa sürede hızlı cevaba sahip uyarıcı ve regülatörler endüstriye kazandırılmıştır. 1960'lı yıllarda uyartım sistemlerinin rolü artmıştır. 1960 'ların başlarında alan gerilimi kontrolü ve sistemdeki salınımların sönümlenmesi için çıkış gerilimi hata sinyaline ilaveten yardımcı stabilize edici sinyallerin kullanılmasına başlanmıştır. Uyartım kontrolünün bu bölümü PSS olarak isimlendirilir. Modern uyartım sistemleri yüksek tavan gerilimleri sayesinde ani cevap verme kapasitesine sahiptir. Bu yüksek alan gücüne sahip uyarıcıların ve ilave stabilize edici sinyallerin kullanımı, tüm sistemin dinamik performansının artırılmasına tam bir katkı sağlamıştır (Kundur, 1994).

Uyartım sisteminin görevini tam olarak yerine getirilebilmesi için aşağıdaki performans gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir; (Kundur, 1994)

- Güç sisteminin kararlılığı için yeterli performansa karşılık gelen sistem tepkisine sahip olmalı
- Sınırlama ve koruma fonksiyonları generatörün ve diğer cihazların zarar görmelerini engelleyecek özellikte olmalı
- İşletmede esneklik sağlanması için gerekli özelliklere sahip olmalı
- İstenen güvenilirlik özelliklerine sahip olmalı ve gerekli dayanıklılık, dahili hata bulma ve yalıtım kapasitesine sahip olmalıdır.

IEEE bünyesinde kurulan komiteler tarafından uyartım sistem modelleri üzerindeki standartlaşma çalışmaları 1960'ta başlamış ve ilk model setleri komite raporunda

yayınlanmıştır (IEEE Comm. Report, 1968). Bu çalışma daha sonra genişletilerek pratik modeller geliştirilmiştir (IEEE Comm. Report, 1981). Bu raporlar da tekrar güncelleştirilerek yenilenmiştir (IEEE Std., 1992).

Fiziksel parametrelerle model parametrelerinin doğrudan ilişkili olarak gösterildiği detaylı modeller bazı avantajlara sahip olmakla birlikte genel sistem çalışmaları için çok fazla ayrıntıya sahiptir. Çalışma tipine uygun olacak şekilde model basitleştirme teknikleri kullanılarak ve sistem kararlılığı üzerinde etkili olan tüm nonlineerlikler de hesaba katılarak küçültülüp pratik hale getirilmelidir. Küçültülen modelde model parametreleri ve gerçek sistem parametreleri arasındaki doğrudan ilişki genellikle kaybolur. Küçültülen modelin yapısı uyarım sistemi tipine bağlı olarak değişir. IEEE tarafından şu anda kullanımda olan uyarım sistemi çeşitlerini tanımlayan 12 adet uyarıcı ve regülatörden oluşan uyarım sistem modeli blok diyagram şeklinde standartlaştırmıştır (Çizelge 3.1). Bu modeller geçici hal ve küçük sinyal kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir (IEEE Std., 421.5-1992).

Çizelge 3.1. Standart hale getirilmiş uyarıcı modelleri (IEEE Std., 421.5-1992)

DC Tip Komitatörlü Modeller	:	DC1A, DC2A, DC3A
AC Tip Alternatör Beslemeli Doğrultuculu Modeller	:	AC1A, AC2A, AC3A, AC4A, AC5A, AC6A
ST Tip Statik Uyarıcı Modelleri	:	ST1A, ST2A, ST3A

3.1 Uyarım Sistemlerinin Çeşitleri

Uyarım sistemleri yıllar boyu çeşitli şekiller almış ve son olarak uyarım gücünün primer kaynağına göre üç grupta sınıflandırılmıştır (IEEE Comm. Report, 1981; IEEE Standart 421.5-1992).

- DC uyarım sistemleri; uyarım gücü kaynağı olarak komitatörlü bir doğru akım generatörü kullanırlar.
- AC uyarım sistemleri; senkron generatör alan sargısı için gerekli olan DC akımın üretilmesinde duran veya dönen doğrultuculu alternatör kullanırlar.
- Statik uyarım sistemleri; uyarım gücü kaynağı olarak transformatörleri veya yardımcı generatör sargıları ve doğrultucuları kullanırlar.

Birinci ve ikinci sıradaki AC ve DC tip uyarıcılar dönen uyarıcılar olarak isimlendirilebilir. Generatörle aynı şaft üzerindedirler ve ana kuvvet mili (şaft, prime mover) tarafından sürülürler. DC tip uyarım sistemlerinin çoğunda primer uyarım gücü, alan sargısı senkron makine rotoruyla aynı mil üzerine yerleştirilmiş bir DC generatörden sağlanır. DC generatör

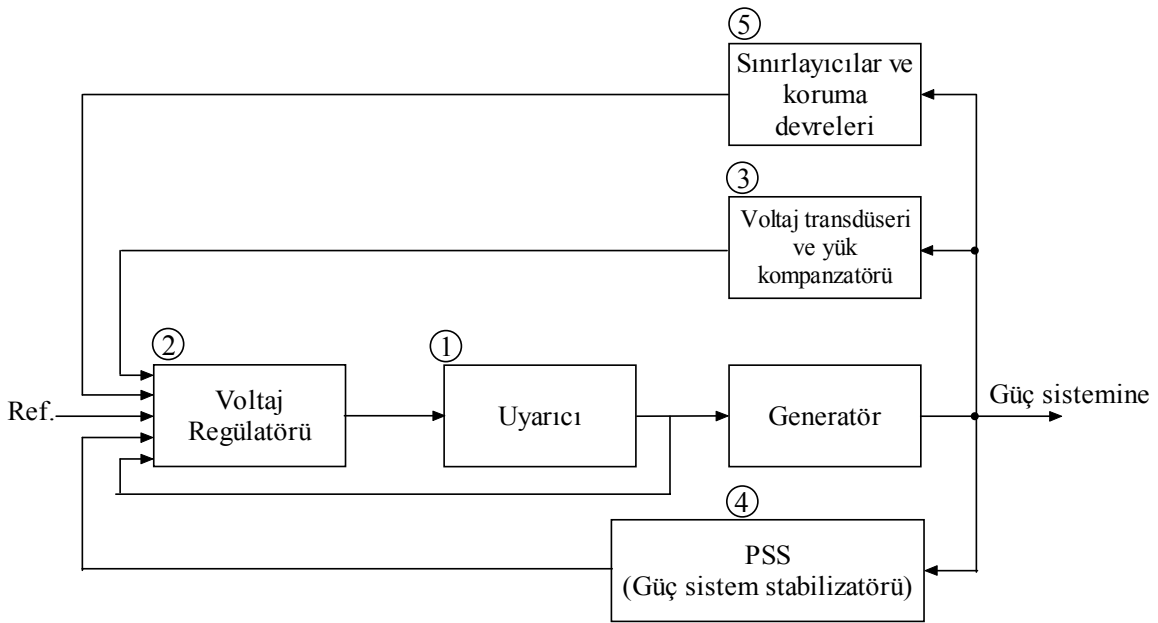
ana uyarıcı işlevi görür ve bir pilot uyarıcı ile de ayrıca uyarılır. AC ve statik tip uyarım sistemleri, faz kontrolü ile kontrol edilirler. Tristör içeren kontrollü doğrultuculardan oluşan, hızlı cevaba sahip elektronik regülatörler kullanılır. Modern uyarım sistemlerinin çoğu AC dönen veya AC duran tiptedir (Padiyar, 1999).

Literatürde uyarım sistemi, uyarıcı, gerilim regülatörü ve yükseltici gibi kavramlar arasında bir kargaşa olabilmektedir. Gerilim regülatörü, uyarım sisteminin en büyük parçasıdır. Karşılaştırma ve yükseltici bloklarını, aynı zamanda geçici kazanç azaltım bloğu (TGR) ve/veya uyarım sistem stabilizatörü (ESS) 'nü de içerir. ESS ve/veya TGR, regülasyon ve kararlılık sağlayan alt sistemlerdir.

Uyarım sisteminin gerilim regülatörü dışında kalan kısmı, regülatörün çıkış işareti ' V_R ' ni işleyen ve uyarıcı tipine göre değişen bloklardan oluşur. DC, AC ve ST tipi olarak isimlendirilen uyarım sistemleri aynı isme sahip olan uyarıcıları da içermektedirler.

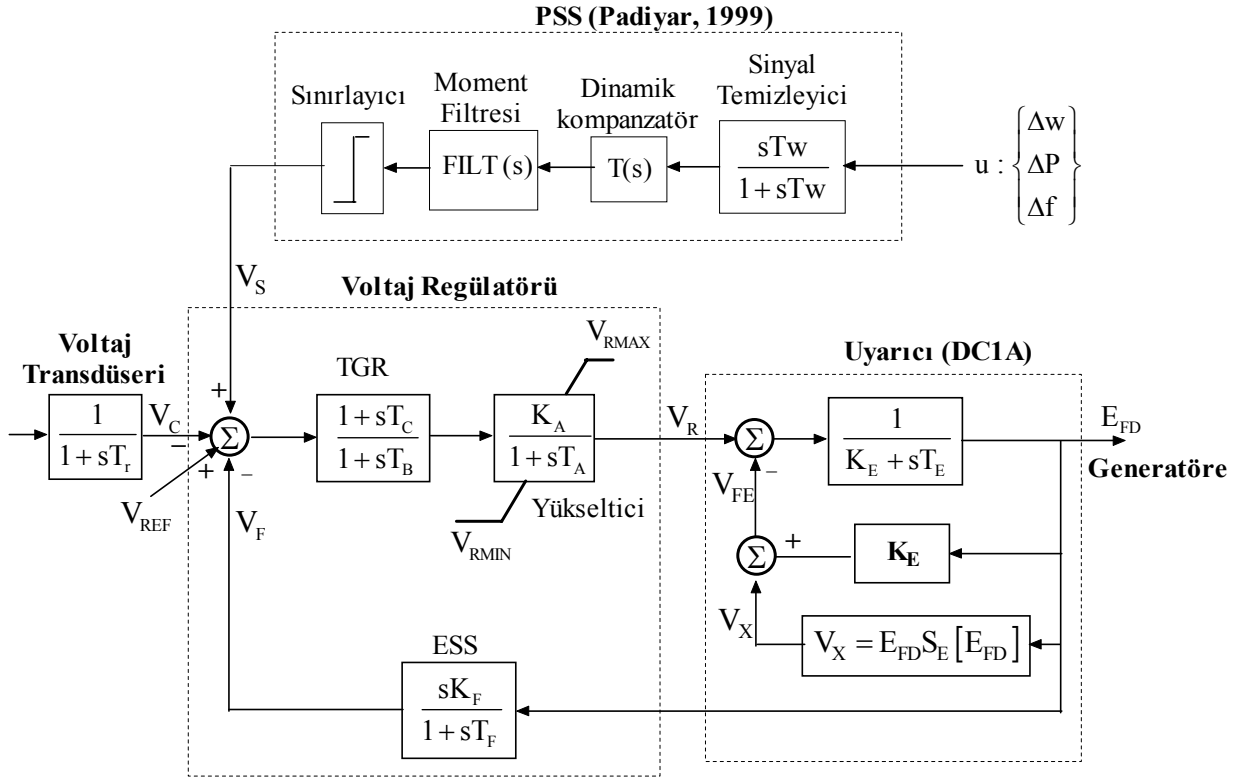
Uyarım sistemleri hakkında toplanan komitenin standart olarak belirlediği uyarım sistem modelleri her biri kendine özgü farklılıklar içermektedir. Yapılan bu tez çalışmasında uyarım sistem modeli olarak basitleştirilmiş model kullanıldığından burada bu ayrıntılara değinilmeyecektir.

Şekil 3.1 'de büyük bir senkron generatöre ait tipik bir uyarım kontrol sistemi fonksiyonel blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.1 Uyarım kontrol sisteminin fonksiyonel blok diyagramı (Kundur, 1994)

Şekil 3.2 'de ise uyarım kontrol sistemi bileşenlerinin blok diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Uyarım kontrol sisteminin tipik bir modeli

Şekil 3.2'deki uyarım kontrol sisteminde ana giriş, gerilim transdüserinin çıkışı olan ' V_C ' dir. Toplam noktada ' V_C ' işareti ve stabilize edici sinyallerden ESS'nin çıkış işareti ' V_F ' çıkarılır, referans gerilim değeri ' V_{REF} ' ve PSS'in çıkış işareti ' V_S ' ise toplanır.

V_F ve V_S işaretleri stabilize edici sinyallerdir. Kararlı hal durumunda bu iki stabilize edici sinyal sıfır değerini alır. Yani sadece $V_{ERR} = V_{REF} - V_C$ çıkış gerilim hata sinyali kalır. Sonuçta elde edilen sinyal regülatör tarafından yükseltilir. Gerilim regülatörü ile ilgili ana zaman sabiti ' T_A ', kazanç ise ' K_A ' dir. Regülatöre ait yükseltici üzerindeki sınırlayıcı doyma ve yükselticinin limitlerini tanımlar. ' T_B ' ve ' T_C ' ise regülatör içerisindeki TGR 'ye ait zaman sabitleridir. Gerilim regülatörü çıkışı V_R uyarıcıyı kontrol etmek için kullanılır. ' K_E ' uyarıcının kazancı olduğu gibi bu değere bağlı olarak DC uyarıcının kendinden veya bağımsız uyarmalı olduğu anlaşılır. ' T_E ' ise DC uyarıcının zaman sabitidir. Generatör alan gerilimi ' E_{FD} ' ile çarpılan ' V_X ' terimi uyarım gerilimindeki nonlineer fonksiyonu tanımlar. Uyarım geriliminden ' K_F ' kazancı ve ' T_F ' zaman sabiti yoluyla türetilen ' V_F ' sinyali de uyarım sisteminin kararlılığının artırılmasında kullanılır. Sonuç olarak gerilim hata sinyali ile gerekli alan gerilimi ' E_{FD} ' oluşturulmuş olur (IEEE Std., 421.5-1992).

3.2 Uyarıcı

Senkron makinenin alan sargısına DC güç sağlar. Uyarım sisteminin güç kısmını oluşturur. DC, AC ve Statik tip olmak üzere genel olarak üç grupta incelenebilirler. Uyarım sistemleri uyarıcı tipine göre isimlendirildiğinden aynı şekilde gruplandırılmaktadır. Şekil 3.2 'de DC1A tipi bir uyarıcı modeli (IEEE Std., 421.5-1992) gösterilmiştir.

3.3 Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR)

Uyarım regülatörü veya gerilim regülatörü olarak da isimlendirilmektedir. Giriş kontrol sinyallerini işler, yükseltir ve uyarıcının kontrol edilmesi için uygun hale getirir.

Yükseltme işi sınırlayıcı içeren bir yükseltici blok ile modellenir. Tüm uyarım sistemi modelleri bir yükseltici bloğu içerir. Yükselticiler; manyetik, dönen veya elektronik tipte olabilirler. Manyetik ve elektronik yükselticiler şekil 3.2 'deki gibi bir kazanç ve bir zaman sabitiyle karakterize edilebilirler. Yükseltici çıkışı, doyma veya güç kaynağı limitleriyle (V_{RMAX}, V_{RMIN}) sınırlandırılmıştır. Bu da şekil 3.2 'de non-windup tipi sınırlarıyla gösterilmiştir. Generatör çıkış gerilimi ile beslenen uyarım sistemlerinde yükselticilerde kullanılan sınırlayıcıların sınır değerleri, generatör çıkış gerilimine bağlı olarak değişir ($V_T \cdot V_{RMAX}, V_T \cdot V_{RMIN}$).

Giriş sinyalinin kontrole uygun hale getirilmesi işlemi ise bir karşılaştırma bloğu ile regülasyon ve kararlılık fonksiyonlarını içeren bloklar yardımıyla yapılır. Bu fonksiyonlar regülatörün ESS ve/veya TGR blokları yardımıyla gerçekleştirilir. Bu bloklar daha çok önemli zaman gecikmeleri içeren elemanlara sahip ve dinamik performansı zayıf olan DC ve AC tipteki uyarım sistemlerinin dinamik performanslarının artırılmasında kullanılır. ESS geri beslemeli bir kompanzasyon bloğudur. TGR ise faz ileri-faz geri yapısında bir kontrolördür (Şekil 3.2).

ESS 'nin görevi regülatör/uyarıcı döngüsündeki açık çevrim frekans cevabında uygun kazanç ve faz değerlerini sağlamak için gerekli faz ilerlemesini sağlamaktır. Geçici periyot için kazançta benzer bir zayıflatma etkisi, faz ileri-faz geri devresi kullanarak yani TGR nin ' T_B ' ve ' T_C ' değerleri uygun seçilerek de sağlanabilir (Padiyar, 1999).

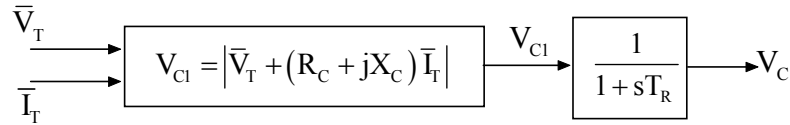
Modern AVR 'ler sürekli çalışan elektronik regülatörlerdir. Yüksek kazanç ve küçük zaman sabitleri vardır (Padiyar, 1999). Bu da bir yükselticiye ait transfer fonksiyonuna eşdeğerdir.

3.4 Gerilim Transdüseri ve Yük Kompanzatörü

AVR kontrol çevriminde hata sinyali çoğunlukla kontrol edilen AC çıkış geriliminin

doğrultulmuş değeri ' V_C ' ile referans değerin ' V_{REF} ' karşılaştırılmasıyla oluşur. Bu ' V_C ' değeri gerilim transdüseri ve yük kompanzatorünün çıkış değeridir. ' V_C ' çıkışını veren bu devre ile generatör çıkış gerilimi algılanır ve DC değerine çevrilir.

Yük kompanzatorünün parametreleri ' R_C ' ve ' X_C ', giriş değişkenleri ise fazör olarak ' \bar{V}_T ' ve ' \bar{I}_T ' dir. Yük akımı nedeniyle oluşan herhangi bir gerilim düşümünün kompanzasyonu ise ' $R_C + jX_C$ ' kompanzasyon empedansı kullanılarak şekil 3.3 'teki ' V_{Cl} ' gerilim genlik ifadesi ile modellenir. Kompanzasyon istendiğinde ' R_C ' ve ' X_C ' için uygun değerler girilir. Bu empedans ve ölçülen armatür akımı kullanılarak gerilim düşümü hesaplanır ve elde edilen gerilim değeri uç gerilimine eklenir veya çıkarılır. Çoğu durumda ' R_C ' çok küçük olduğundan kompanze edilen empedansın rezistans bileşeni ihmal edilir ve ' R_C ' sıfır değerine ayarlanır. Giriş değişkenleri olan senkron makinenin akım ve gerilimi, fazör olarak hesaba katılmalıdır. Senkron makine akımı baz alınarak per unit sistem kullanılmalıdır. Yük kompanzatorü kullanılmadığı zaman ' R_C ' ve ' X_C ' değerleri sıfırlanır.



Şekil 3.3 Gerilim transdüseri ve yük kompanzatorü blok diyagramı (IEEE Std., 1992)

Gerilim transdüseriyle ilişkili olan filtreleme işlemi karmaşık olmasına rağmen genellikle tek bir zaman sabiti ' T_R ' ile modellenebilir. Çoğu sistemde bu zaman sabiti çok küçüktür ve sadelik açısından sıfır kabul edilir (Padiyar, 1999). ' T_R ' zaman sabiti senkron makine çıkış geriliminin doğrultma ve filtreleme işini tanımlar. Uyarım kontrol sistemlerinin modellenmesinde yük kompanzator modeli genellikle kullanılmamaktadır. Bu yüzden şekil 3.2 'de yalnızca gerilim transdüseri modeli kullanılmıştır.

3.5 Güç Sistem Stabilizatörü (PSS)

En ekonomik elektromekanik sönüm kontrolüdür. Generatörlerde elektromekanik osilasyonlarının sönümlenmesinde ve güç sistemlerinde kararlılığının artırılmasında yaygın olarak kullanılır.

PSS, güç sistem osilasyonlarının sönümlenmesi için, regülatöre ilave giriş sinyali sağlar. PSS 'in giriş sinyali olarak rotor hız değişimi yaygın olarak kullanılır. Ayrıca bara frekansı, hızlandırıcı güç (mekanik giriş gücü ile elektriksel güç arasındaki fark) ve elektriksel güç

pratikte kullanılan giriş sinyalleri arasındadır (Padiyar, 1999).

Güç sistemleri karmaşık nonlineer sistemlerdir ve sık sık yetersiz sönümlenme nedeniyle düşük frekanslı güç osilasyonları oluştururlar. Bazen de düşük frekans ve küçük genlikteki bu osilasyonlar uzun bir zaman periyodu için mevcuttur ve güç transfer kapasitesinde azalmaya sebep olurlar. Yüksek kazançlı AVR 'ler, güç sistemi dinamik limitlerindeki artırıcı etkisine rağmen bazen de negatif bir sönümlenme etkisi gösterebilirler. Sonuç olarak özellikle büyük birleşik sistemlerde kararsızlığa neden olurlar. Bu problemin üstesinden gelebilmek için, uyarım sistemine yardımcı, stabilize edici bir sinyal ilave edilir. PSS 'ler bu ilave stabilize edici sinyali sağlarlar.

Şekil 3.2 'de uyarım kontrol sistemi girişine yardımcı sinyal üreten bir sinyal temizleyici, moment filtresi, dinamik kompanzator ve sınırlayıcı bloklarından oluşan PSS 'e ait blok diyagram modeli görülmektedir.

Burada sinyal temizleme devresi PSS 'in giriş sinyalindeki DC bileşeni süzen bir yüksek geçiren filtredir. Bu kısmın eksikliği durumunda hızda meydana gelen kalıcı değişiklikler generatör çıkış gerilimini etkileyecektir.

Dinamik kompanzator ise (3.1) ifadesinde verildiği gibi iki adet faz ileri-faz geri kontrol bloğundan oluşmaktadır.

$$T(s) = \frac{K_{stab} (1 + sT_1)(1 + sT_3)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)} \quad (3.1)$$

Burada 'K_{stab}' PSS kazancı, T1, T2, T3 ve T4 de zaman sabitleridir. Bu katsayılar moment sönümlenmesi sağlayabilmek için faz kompanzasyonu gereksinimlerine göre belirlenir. Fakat statik tipteki uyarıcılar için tek bir faz ileri faz geri (lead-lag) kontrol bloğu daha uygun olmaktadır.

PSS içerisindeki moment filtresi bloğu ise bir band söndüren filtredir. Bu filtrenin transfer fonksiyonu da (3.2) ifadesiyle verilmiştir.

$$FILT(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.2)$$

AVR işleyişine ters etki yapmasın diye PSS çıkışı negatif ve pozitif alt limitlerle sınırlandırılmalıdır. Bu işlem PSS modelinde çıkışa konulan bir sınırlayıcı blok ile gerçekleştirilir.

PSS 'in temel fonksiyonu generatör rotor osilasyonlarına sönümlenme etkisi ilave etmektir. Bu

da uyarıtıma ilave edilen stabilize edici ‘ V_s ’ sinyali ile sağlanır. Bu sinyal uyarıtım kontrol sisteminde gerilim hata sinyaline ilave edilir. PSS, sönümlenme sağlamak için rotor hız değişimine karşın bir elektriksel moment bileşeni üretmelidir. Pratikte generatör ve uyarıcının transfer fonksiyonlarının kazanç ve faz karakteristikleri frekansa bağlıdır. PSS ‘in transfer fonksiyonu, uyarıtım girişı ve elektriksel moment arasındaki faz gecikmesini kompanze edecek uygun bir faz kompanzasyon devresi olmalıdır. Tam bir kompanzasyon sağlanabilmesi için ideal olarak PSS ‘in faz karakteristiği, uyarıcı ve generatörün faz karakteristiklerinin tam tersi özellikte olmalıdır. Böylece PSS tüm osilasyon frekanslarında sadece sönümlenme momenti üretir. Generatörler genellikle basitlik ve sadelik açısından amortisör sargıları ihmal edilerek modellenirler. Ancak amortisör sargıları generatörün faz karakteristiklerini önemli ölçüde etkilediğinden, PSS parametrelerinin hesabında mutlaka dikkate alınmalıdır (Rogers, 1999).

Hızlı uyarıtım ve yüksek gerilim değişim aralığına sahip modern uyarıtım sistemlerinde, PSS kullanımıyla senkronlama momenti ve sistem geçici hal cevabı üzerinde negatif sönümlenme oluşmaktadır. Ancak buna rağmen sistem performansında önemli ölçüde bir artış sağlanmaktadır. PSS, hafif sönümlenme içeren sisteme, faz-ilerlemeli hız sinyali sayesinde ilave bir sönümlenme sağlamaktadır. Böylece uyarıtım sistemi ve uyarıtım sistem kontrolünün, rotor açı kararlılığı üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmektedir. Modern yaklaşımlarda yüksek kazançlı ve hızlı cevaba sahip bir uyarıcı ve PSS kombinasyonu kullanılır. Hatta artık bu iki sistemi bir arada kullanmak iyi bir performans açısından zorunluluktur (Bourles, 1998). Bu şekilde hem geçici hal kararlılığın iyileştirilmesi sağlanmakta hem de küçük sinyal kararlılık karakteristikleri iyileştirilmektedir.

3.6 Sınırlayıcı ve Koruma Devreleri

Modern bir uyarıtım kontrol sistemi basit bir gerilim regülatöründen çok daha kapsamlı bir sistemdir. Performans gereksinimlerinin karşılanmasına yardımcı olan birçok kontrol, sınırlayıcı ve koruma fonksiyonları içerir. Herhangi bir uyarıtım sistemi, uyarıcının tipine ve kullanıldığı uygulama alanının gereksinimlerine göre, bu fonksiyonların tümünü veya bir kısmını içerebilir. Kontrol fonksiyonları, özel değerleri istenen seviye için regüle ederler. Sınırlama fonksiyonları ise değerlerin belirli sınırları (kapasite limitleri vs.) aşmalarını önlerler. Herhangi bir sınırlayıcı arızalanırsa, koruma fonksiyonları uygun bileşen veya üniteleri devreden çıkarırlar (Kundur, 1994).

Uyarıcı ve senkron generatör pek çok koruma ve kontrol fonksiyonları içerirler. Yaygın olarak kullanılan fonksiyonlar; alan akımı sınırlayıcı, maksimum uyarıtım sınırlayıcı, çıkış

gerilimi sınırlayıcı, V/Hz sınırlayıcı ve uyarım alt limit sınırlayıcıdır. Devrelerine ve çıkış sinyallerine göre farklılık gösterirler. Uyarım sistemlerinin farklı bölgelerine toplam sinyal veya tek sinyal olarak uygulanırlar. Kolaylık açısından gruplandırılarak şekil 3.1 'de tek bir blok olarak gösterilmişlerdir.

Bu devreler normal şartlar altında herhangi bir faaliyet göstermezler. Ayrıca bunlar geçici hal ve küçük sinyal kararlılığı çalışmalarında genellikle modellenmezler. Uzun dönem kararlılığı ve gerilim kararlılığı çalışmalarında önemlidirler. Pratikte bu sınırlama fonksiyonlarının uygulamaları cihazın üreticisine, markasına, modeline ve kullanım şartlarına göre değişim gösterir. Bundan dolayı bu sınırlayıcı modelleri temel şartlara göre belirlenmelidir. Bu yüzden şekil 3.2 'de sınırlayıcıların modelleri gösterilmemiştir (Kundur, 1994).

3.6.1 Uyarım Sistemlerindeki Son Gelişmeler ve Gelecekteki Beklentiler

Uyarım sistemlerindeki son gelişmeler ise dijital teknolojiyle tanışma sayesinde olmuştur. Tristörler güç katında kullanılmaya başlamıştır. Daha önce analog devrelerle sağlanan kontrol, koruma ve lojik fonksiyonlar dijital olarak uygulanmaya başlanmıştır.

Dijital kontrolün ilave avantajları arasında

- esnek olması,
- diğer kontrol ve koruma fonksiyonları arasında bilgi alışverişine olanak sağlaması
- karmaşık kontrol stratejilerinin kolay uygulanmasına olanak sağlaması

sayılabilir.

Dijital kontroller ucuzluk ve güvenilirlik bakımından analog devrelere alternatif olduğu sürece, gelecekte daha yoğun bir şekilde kullanılmaya devam edecektir.

4. MODELLEME

Büyük bir güç sistemi ile ilgileniyorsak bileşenlerden her birinin tüm detaylarıyla temsil edilmesi pratik değildir. Bu yüzden oluşturulan sistem modelleri üzerinde doğruluk sınırları ölçüsünde basitleştirmeler yapılmaktadır. Yapılan simülasyonların çoğunda bu basitleştirilen modeller kullanılmaktadır. Analizlerin doğruluk sınırları ölçüsünde oluşturulan sistem modelleri üzerinde basitleştirmeler yapılarak simülasyon yapılmaktadır.

Pratikte, elimizdeki problemin frekans cevap aralığının önemine göre değerlendirilerek, gerekli doğruluk derecesine sahip olan uygun modeller seçilebilir. Modellerde basitleştirmeler yapılarak hesaplamalarda harcanan efor minimize edilebilir. Verilen çalışma zamanı için model seçiminde doğruluk derecesi yüksek modeller ve efor tasarrufu sağlayan basit modeller arasında uygun bir tercih yapılmalıdır. Bununla beraber generatör ve enerji ağının basit bir modeli kullanılarak geçici hal şartlarında senkron generatörlerin temel dinamik davranışları hakkında bilgi edinilebilir (Ong, 1997).

Modelleme, istenen performans gereksinimlerinin değerlendirilmesi, ilave kontrol ve koruma fonksiyonlarının koordinasyonu ve tasarımı ve güç sistemlerinin işletimi ve planlamasıyla ilgili sistem kararlılık çalışmaları için gereklidir. İstenen modelin detayları yapılacak çalışmanın amacına bağlıdır (Kundur, 1994). Buna göre senkron generatörün modeli inceleyeceğimiz çalışma amacına yani generatörün dinamik davranış tipine göre değişmektedir.

4.1 Senkron Makinelerin Dinamik Davranışları

Senkron generatörlerin muhtemel arıza ve sistem şartlarının değişmesi durumlarında daha uyumlu çalışmaları üzerine yapılan senkron generatörlerin dinamik davranışları ile ilgili çalışmalar üç gruba ayrılabilir (Ong, 1997).

Geçici hal kararlılığı çalışmaları; Şiddetli geçici bozucu etkilerin meydana getirdiği büyük salınımlarda generatörlerin senkronizmada kalma kabiliyetini incelenir.

Dinamik hal kararlılığı çalışmaları; Bazı çalışma durumlarındaki kararlılık ve küçük sinyal davranışı incelenir. Bu tip çalışmalarda genellikle karmaşık nonlinear modelden türetilen lineerleştirilmiş model kullanılır.

Uzun dönem dinamik enerji dengesi çalışmaları; Genellikle uzun bir periyot içerisinde senkronlama salınımları dışındaki çalışmalardır. Bu tip çalışmalarda senkronlama çalışmalarında kullanılan nonlinear generatör modellerinin yüksek bir frekans doğruluğuna sahip olması gerekmez. Bunun yerine daha yavaş çalışan bileşenler daha önem olacaktır.

4.2 Senkron Generatör Modelleri

Senkron generatör davranışını modelleyebilmek amacıyla genel olarak basitten karmaşığa doğru beş farklı model geliştirilmiştir. Model numaraları modelin içerdiği ve çözülmesi gereken diferansiyel denklem takımlarının sayısını göstermektedir. Bu modellerin hepsinde generatör, uygun bir reaktans gerisindeki geçici hal öncesi (subtransient) ya da geçici hal emk şeklinde tanımlanmıştır (Machowski vd., 1997).

Model 6 – ($\dot{E}_d'', \dot{E}_q'', \dot{E}_d', \dot{E}_q', \dot{\omega}, \dot{\delta}$); Bu modelde generatör geçici hal öncesi reaktansların gerisindeki geçici hal öncesi emk'larla modellenmiştir. Bu ilişki (4.1) ve (4.2) 'deki stator gerilim denklemlerinde tanımlanmıştır.

$$V_q = -R I_q + X_d'' I_d + E_q'' \quad (4.1)$$

$$V_d = -R I_d + X_q'' I_q + E_d'' \quad (4.2)$$

$$T_{d0}'' \dot{E}_q'' = E_q' - E_q'' + I_d (X_d' - X_d'') \quad (4.3)$$

$$T_{q0}'' \dot{E}_d'' = E_d' - E_d'' + I_q (X_q' - X_q'') \quad (4.4)$$

$$T_{d0}' \dot{E}_q' = E_f - E_q' + I_d (X_d - X_d') \quad (4.5)$$

$$T_{q0}' \dot{E}_d' = -E_d' - I_q (X_q - X_q') \quad (4.6)$$

V_d, V_q : generatör çıkış geriliminin d ve q bileşenleri

R : generatör armatür (stator) sargı direnci

I_d, I_q : armatür akımı d ve q eksenli bileşenleri

X_d, X_d', X_d'' : d eksenli senkron, geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları

X_q, X_q', X_q'' : q eksenli senkron geçici hal ve geçici hal öncesi reaktansları

E_q'' : geçici hal öncesi iç emk q bileşeni (q eksenli damper sargısı ve q eksenli çelik rotor gövdesindeki toplam akı ile orantılı)

E_d'' : geçici hal öncesi iç emk d bileşeni (d eksenli damper sargısı ve alan sargısındaki toplam akı ile orantılı)

E_q' : geçici hal iç emk q eksenli bileşeni (alan sargısı akısıyla orantılı)

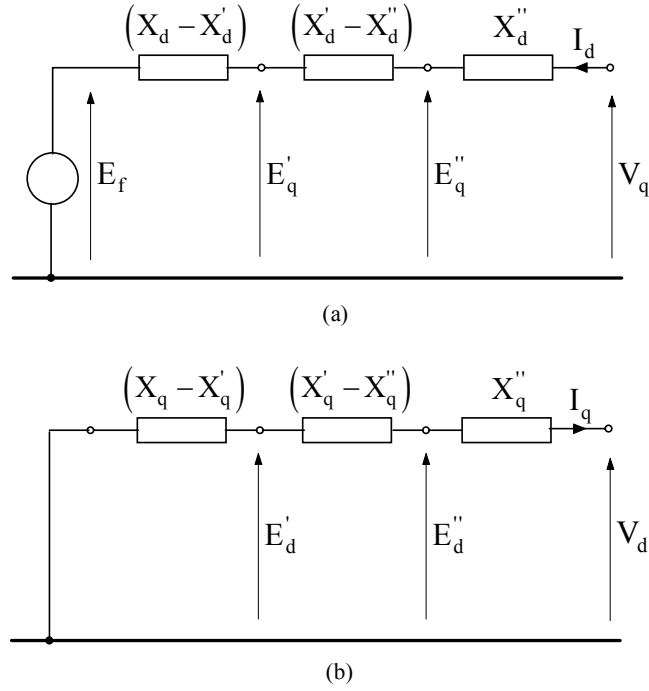
E_d' : yuvarlak rotorlu generatörde geçici hal iç emk d eksenli bileşeni (çelik rotor gövdesi q eksenli akısıyla orantılı)

E_f : uyarım emk'sı (uyarım gerilimi V_f ile orantılı)

T_{d0}'', T_{d0}'' : açık devre d eksenli geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri

T_{q0}', T_{q0}'' : açık devre q eksenli geçici ve geçici hal öncesi zaman sabitleri

Şekil 4.1 'de senkron generatöre ait eşdeğer devre diyagramları görülmektedir. (4.3), (4.4), (4.5) ve (4.6) ifadelerinin sağ tarafları bu eşdeğer devreler üzerinden Kirchhoff gerilim yasalarına göre çıkarılabilir.



Şekil 4.1 Rezistans ihmal edildiği durumda senkron generatör eşdeğer devreleri
(a) d-ekseni (b) q-ekseni (Machowski vd., 1997)

(4.3-6) ifadeleri rotor devresi akılarıyla bağlantılı olan emk'lardaki değişimi göstermektedir. Bunlara rotor açı ve hız değişimini içeren (4.7) ifadesi ilave edilmelidir.

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{M}(P_m - P_e - D\Delta\omega), \quad \Delta\omega = \omega - \omega_s = \frac{d\delta}{dt} \quad (4.7)$$

- ω : generatörün açısal hızı [radyan]
- ω_s : senkron açısal hız ($= 2\pi f$) [radyan]
- $\Delta\omega$: rotor hız sapması [radyan]
- δ : güç (rotor) açısı (sonsuz baraya göre)
- M : eylemsizlik sabiti
- P_m : generatör birincil hareketlendirici (türbin) tarafından sağlanan mekanik güç
- P_e : elektromanyetik hava-aralığı gücü
- D : sönüm katsayısı

(4.1) ve (4.2) diferansiyel denklemleri damper sargılarının etkisini içermektedir. Hareket denkleminde bulunan sönüm katsayısı, rüzgar etkisi ve sürtünme nedeniyle oluşan mekanik sönümlemeyi içerir. Bu da ihmal edilebilir ($D \approx 0$).

Generatör hava aralığı gücü ise (4.8) ifadesiyle hesaplanır. (4.8) denkleminde armatür gerilim değerlerinin yerine (4.9) ifadesi yazılırsa güç denkleminin başka bir ifadesi olan (4.10) elde edilmiş olur.

$$P_e = \left[V_d I_d + V_q I_q + (I_d^2 + I_q^2) R \right] \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d'' \\ E_q'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & X_q'' \\ -X_d'' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$P_e = (E_d'' I_d + E_q'' I_q) + (X_d'' - X_q'') I_d I_q \quad (4.10)$$

Model 5 – $(\dot{E}_d'', \dot{E}_q'', \dot{\omega}, \dot{\delta})$; Bu modelde q-ekseni üzerindeki rotor edi akımları ihmal edilerek $X_q' = X_q$ ve $E_d' = 0$ farzedilir. Böylece model 6 'yı temsil eden denklem kümesindeki (4.6) ifadesi iptal edilir.

Model 4 – $(\dot{E}_d', \dot{E}_q', \dot{\omega}, \dot{\delta})$; Bu modelde damper sargılarının etkisi ihmal edilerek (4.3) ve (4.4) denklemleri kaldırılır. Generatör, X_d' ve X_q' geçici hal reaktanslarının gerisindeki E_q' ve E_d' emk'ları ile temsil edilir. Böylece generatör denklemini (4.11) ifadesiyle gösterilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d' \\ E_q' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & X_q' \\ -X_d' & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

(4.9) ifadesindeki E_q' ve E_d' emk'larındaki değişimler (4.5) ve (4.6) diferansiyel denklemleri ile hesaplanır. (4.12) ile verilen hava aralığı gücü ifadesinde denklemin ikinci kısmı geçici hal salınım gücünü verir.

$$P_e = E_q' I_q + E_d' I_d + (X_d' - X_q') I_d I_q \quad (4.12)$$

Bu basitleştirilmiş model elektromekanik dinamiklerin analizinde yeterli bir doğruluk sağlamaktadır (Stott, 1979). Bu modelin en büyük dezavantajı ise sönüm katsayısının tam olarak değil, yaklaşık olarak hesaplanabilmesidir.

Model 3 – $(\dot{E}_q', \dot{\omega}, \dot{\delta})$; Model 4'te d eksenini geçici hal emk'sı ' E_d' ' sabit tutularak (4.6) denklemini iptal edilir. Bu modelde generatör yalnızca (4.3) ve (4.7) ifadeleri ile tanımlanır.

Damper sargılarının etkisi ihmal edilir. E_d' sabit kabul edilir. Rotor gövdesi ilave bir sargı ile gösterilse bile, rotor gövdesindeki edi akımları tarafından üretilen sönüm etkisi de ihmal edilir. Eğer q eksenini üzerinde rotor gövdesini temsil edecek bir sargı bulunmuyorsa $E_d' = 0$ ve $X_q' = X_q$ olur. Böylece (4.12) ifadesi (4.13) ifadesine indirgenir.

$$P_e = E'_q I_q + (X'_d - X'_q) I_d I_q \quad (4.13)$$

Model 2 – Klasik Model (ω, δ); Senkron generatörün klasik modeli, güç sistem dinamiklerinin basitleştirilmiş analizinde yaygın olarak kullanılır. Geçici halde ne d-ekseni armatür akımı I_d , ne de iç emk E_f uyarım gerilim değişimini tam olarak temsil eder. Generatör, hareket denklemi (4.7) ve geçici hal reaktansı X'_d 'nın gerisindeki sabit emk E' ile temsil edilir.

Bu model (4.5) denklemi ile de açıklanabilir. Buradaki zaman sabiti T'_{d0} birkaç saniye mertebesinde ve bağıl olarak oldukça uzundur. E_f ve I_f deki değişimler oldukça küçük olduğundan E'_q 'de çok fazla bir değişim göstermeyecektir. Bu da E'_q nün yaklaşık olarak sabit alınabileceği anlamına gelir. E'_d 'de zaten sabit kabul ediliyordu. Böylece her iki geçici hal emksi E' 'nın genliği ve rotora göre pozisyonunda sabit olarak kabul edilir. Rotor geçici hal salınımı ihmal edilirse ($X'_q = X'_d$) generatör iki eşdeğer devre yerine tek bir eşdeğer devre ile temsil edilebilir. Böylece ortaya sonsuz baraya bağlı bir generatör modeli çıkmış olur. Aynı şekilde (4.11) ifadesinden elde edilen cebrik ifadeler (4.14), tek bir denklem ile gösterilebilir (4.15).

$$I_t = I_q + jI_d \quad V_t = V_q + jV_d \quad E' = E'_q + jE'_d \quad (4.14)$$

$$\bar{V}_t = (\bar{E}'_q + j\bar{E}'_d) - jX'_d (\bar{I}_q + j\bar{I}_d) = \bar{E}' - jX'_d \bar{I}_t \quad (4.15)$$

Fetea ve Petroianu (1999) sonsuz baraya bağlı bir generatör modelinin akademik ve eğitim amaçlı çalışmalar için iyi bir model olduğunu savunmuşlardır.

4.3 Geçici Hal Kararlılığı Açısından SMIB Sistemi

Senkron generatörlerin türbin tarafından sürülen rotorları ile statorları arasındaki manyetik kuplajın şiddetli geçici bozucu etkiler sonucu bozulması halinde rotor açısı kritik değerini aşar. Yani bir kayma meydana gelir. Böylece senkron generatör AC enerji ağına göre kararlılığını kaybeder. Rotor uzun süre stator akımlarının oluşturduğu döner alanla senkronizmasını koruyamaz ve kutup kayması oluşur. Senkronlama kuvvetleri de rotoru tekrar senkronizmayı yakalaması için zorlarlar (Enel4ssh2, 2005).

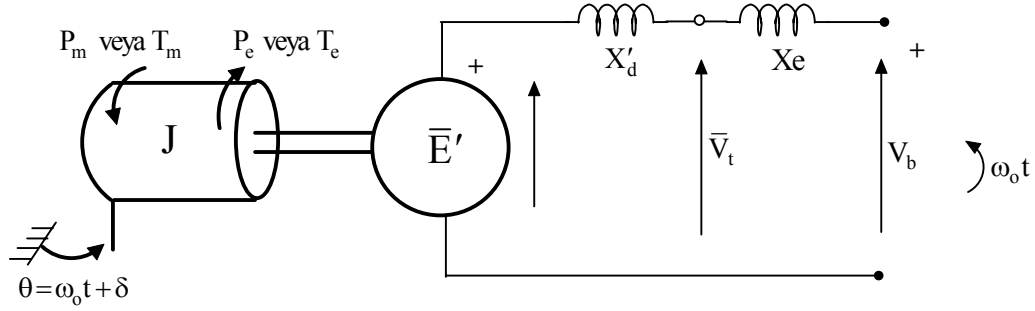
Senkronizma kaybına uğrayan büyük güçteki senkron makineler komşu sistemlerin gerilimleri üzerinde sert ve şiddetli dalgalanmalara neden olur. Bu şekilde senkronizma

kaybına uğrayan bir veya bir grup senkron makinenin ya hemen tekrar senkronizmaya girmesi sağlanır ya da sistemden ayrılır. Rotor açısı 90 derece olduğunda kararlı hal koşullarında rotor ve stator arasındaki senkronlama gücü de sıfır olur. Fakat geçici hal koşullarında bu açı geçici olarak kararlılık kaybı olmaksızın 90 derece olabilir. Bu kararlı hal ile geçici hal arasındaki önemli farklardan biridir.

Geçici hal kararlılığı, kararlı halden farklı olarak sistem değişkenlerindeki büyük değişimleri içermektedir. Böylelikle sistemin nonlineerliği ön plana çıkmaktadır. Nonlineer bir sistemin karakteristikleri her çalışma durumu ve her bozucu etki için farklılık gösterir. Bu yüzden geçici hal kararlılık analizleri ihtimaller üzerine yürütülür. Yani verilen bir çalışma durumunda, geçici hal kararlılık limitleri enerji iletim sisteminde meydana gelen bozucu etkilerin tipine, süresine ve yerine göre değişim gösterir. Geçici hal kararlılık limiti; ani bir bozucu etki sonrası kararlılık kaybı olmaksızın bir noktadaki mümkün olan maksimum güç akışını ifade eder. Bundan dolayı mümkün olabilecek her ihtimal için kararlılık kuralı oluşturmak imkânsızdır. Tüm güvenli koşullarda kararlılığın sağlanabilmesi için iyi bir sistem bilgisine sahip olmak çok önemlidir.

Modern bilgisayarların ve güçlü simülasyon programlarının devreye girmesiyle simülasyon çalışmalarında oldukça detaylı matematiksel modeller kullanmak mümkün hale gelmiştir. Bu da senkron generatör ve uyarım sistemlerindeki nonlineerliklerin daha fazla hesaba katılmasını sağlamıştır. Böylece geçici hal kararlılık analizlerinin yapılmasında önemli gelişmeler olmuştur. Bununla beraber, geçici hal kararlılık probleminin doğasında olan “kavramsal anlayış” sayesinde, geçici hal problemin çözümü için çok basit modeller ve grafiksel metotlar yeterli olmaktadır. Bu kavramsal anlayış nedeniyle salınım denklem modelinin kullanılması yeterli olabilmektedir. Bu model daha önce 2 numaralı klasik model olarak incelenmiştir.

Bu modelde senkron generatör, sabit alan akımı ve eşdeğer devre modeli ile temsil edilir (Şekil 4.2). Stator rezistansı, iletim hattı rezistansı ve türbindeki mekanik sürtünme de ihmal edilmiştir. Yani sönümlenme etkisi yoktur. Mekanik sistemi temsil eden türbin ve rotor atalet momenti modeldeki tek dinamik özelliştir. Hız regülatörü dinamikleri de ihmal edilmiştir. Güç veya moment ve (P veya T) eşit olarak düşünülmüş ve birbirinin yerine kullanılmıştır.



Şekil 4.2 Hareket denklemi modeli (Enel4ssh2, 2005)

J : Eylemsizlik momenti [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]

θ : Generatör milinin dönme açısı, açısal konum değiştirme miktarı [radyan]

ω_0 : Generatör milinin açısal dönüş hızı, senkron hız [rad/s]

E' : Transient reaktans gerisindeki transient iç emk

X_e : Generatörün sonsuz baraya bağlandığı reaktans

V_b : Sonsuz bara gerilimi

V_t : Generatör çıkış gerilimi

T_m : Generatöre verilen mekanik giriş momenti

T_e : Generatörden alınan elektriksel çıkış momenti

Dönen kısımda depolanan kinetik enerji ifadesi (4.16)'da, açısal momentum ifadesi ise (4.17)'de verildiği gibidir.

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_0^2 \quad (4.16)$$

$$M = J \cdot \omega_0 \quad (4.17)$$

E : Dönen kısımda depolanan kinetik enerji [Joule]

M : Açısal momentum [Joule-saniye / radyan]

Bu iki denklemden dönen kısımda depolanan kinetik enerji ifadesi (4.18)'deki gibi yazılabilir.

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \omega_0 \quad (4.18)$$

Dönen kısımda depolanan kinetik enerji ifadesi aynı zamanda makine gücü ile atalet sabitinin çarpımına eşittir.

$$E = S \cdot H = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \omega_0 \quad (4.19)$$

Buna göre atalet sabiti ifadesi de (4.20) deki gibi olur.

$$H = \frac{\frac{1}{2} \cdot M \cdot \omega_0}{S} = \frac{\text{senkron hızda depolanan enerji}}{\text{makina gücü}} \quad (4.20)$$

S : Makine gücü [MVA]

H : Atalet sabiti [MW.s/MVA]

Rotor hızı (4.21) ve rotor ivmesi ise (4.22) ifadeleriyle verilebilir (Enel4ssh2, 2005).

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_0 + \frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (4.21)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (4.22)$$

Makine generatör olarak çalıştığı için δ pozitif olacak ve girişe uygulanan mekanik giriş momentine karşı bir elektriksel çıkış momenti üretilecektir. Bu durumda hareket denklemi (4.23) deki gibi olacaktır.

$$J \left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \right) = T_m - T_e = \Delta T = T_a \quad (4.23)$$

$$E = \frac{M \cdot \omega_0}{2} \quad (4.24)$$

Pozitif bir moment artışı rotor açısında da bir artışa neden olacaktır. (4.23) deklemini (4.24) eşitliği kullanılarak düzenlenirse (4.25 ve 4.26) denklemleri elde edilir.

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\Delta T}{J} = \frac{(\Delta T \cdot \omega_0) \omega_0}{2 \cdot \frac{J \cdot \omega_0^2}{2}} = \frac{\Delta P \cdot \omega_0}{2E} \quad (4.25)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\Delta P}{M} \quad (4.26)$$

$$P_e = \frac{EV}{X_T} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (4.27)$$

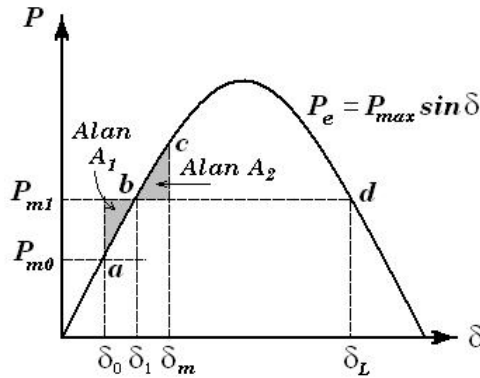
Sonra (4.27) eşitliği kullanılarak hareket denklemi (4.28) deki gibi elde edilir.

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \Delta P = P_m - P_{max} \sin \delta \quad (4.28)$$

Yine (4.27) eşitliğinden yola çıkılarak (4.23) ile verilen hareket denklemi ifadesi (4.29) daki gibi yazılabilir.

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \Delta T = T_m - T_{max} \sin \delta \quad (4.29)$$

Hareket denklemi mekanik giriş gücü ile elektriksel çıkış gücü arasındaki bağıntıyı tanımlar. Buna göre sistemde oluşabilecek herhangi bir dengesizlik sonucunda bir çıkış ve yükselme ardından da bir düşüş ve alçalma görülecektir. Yani sistem aslında mekanik bir osilatördür. Geçici hal kararlılığı bir bozucu etki sonrası oluşan ilk yükselme/alçalma durumunun üstesinden gelinebilmesi için gereken yeterli onarıcı gücün olup olmaması ile ilgilendir. Eğer bir sistem geçici hal durumunda kararlı ise, daha sonra bu sistem için küçük sinyal kararlılığı devreye girer. Bundan sonra küçük sinyal kararlılığı, oluşan elektromekanik osilasyonların genliğinin düşürülerek pozitif sönümlenmesi veya yetersiz sönümlenmesi ya da genliğin artarak negatif sönümle meydana gelmesi ile ilgilendir.



Şekil 4.3 Güç-açı eğrisi üzerinde eşdeğer alan kriteri gösterimi (Enel4ssh2, 2005)

Hareket denkleminde yararlanarak giriş mekanik gücünde yapılacak bir değişiklik sonrası oluşacak osilasyon ortamında, şekil 4.3 'te görüldüğü gibi yük açısının (δ) ilk önce bir maksimum noktaya çıkıp (δ_m) daha sonra da ilk konumu (δ_0) ile maksimum nokta arasında osilasyon yaparak kararlılığın sağlandığı bir noktada (δ_1) yeniden sabit kalacağı söylenebilir. Yük açısının değişme miktarı hız değişimi ile doğru orantılıdır. Bir bozucu etki sonrası oluşan osilasyonlar sırasında hız ve açı değişimi asla aynı zamanda sıfır olmaz. Açı denge noktasında iken hız değişimi maksimum noktada, hız değişimi sıfır olduğunda ise açı değişimi maksimum noktasındadır.

Rotor açısı, maksimum (δ_m) ve minimum nokta (δ_0) arasındaki yeni kararlı hal değeri olan δ_1 civarında osilasyon yapar. Eğer mevcut bir sönümleyici yoksa, osilasyonlar sonsuza dek devam eder. Sönümleyici mevcut ise, açı osilasyonları δ_1 kararlı hal değerinde son bulur.

4.3.1 Eşdeğer Alan Kriteri

Hareket denklemi nonlinear bir denklemdir ve analitik olarak çözülemez. Çözüm için bilgisayar simülasyonu (nümerik integrasyon) ve grafiksel teknikler kullanılabilir (Şekil 4.3) (Enel4ssh2, 2005).

Hareket denkleminde her iki tarafı $2 \frac{d\delta}{dt}$ ile çarparsak (4.30) ve tekrar düzenlersek (4.31) elde edilir.

$$\left(2 \frac{d\delta}{dt}\right) \left(\frac{d\delta}{dt}\right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2\Delta P}{M} \left(\frac{d\delta}{dt}\right) \quad (4.30)$$

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta} \Delta P d\delta \quad (4.31)$$

Bu kapalı formdaki denklem makineye uygulanan bir bozucu etki sonrasındaki hız değişimini $\Delta\omega = d\delta/dt$ vermektedir. Kararlı hal durumunda hız değişimi sıfırdır bu durum bozucu etki sonrası değişir. Kararlı işletimde bozucu etki sonrası yük açısı ilk salınımda δ_m maksimum değerindeki sınıra dayanır. Bu durumda makinenin rotor açısı maksimum değerinde hız değişimi ise sıfırdır. Yukarıdaki denklem kararlılık kriterinin gerçekleşmesi açısından (4.32) ifadesindeki gibi yazılabilir.

$$\frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (4.32)$$

Arıza sonrasında hız değişimi ve yük açısı artışı sıfır değerine ulaşacaktır. Yük açısı maksimum değerinden daha küçük değerler olarak bir kararlı hal değerine ulaşacak ve bu duruma göre sistem kararlı halini sürdürecektir. (4.32) ifadesinin her iki tarafını $2/M$ le bölerek sadeleştirebiliriz.

$$\int_{\delta_0}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (4.33)$$

(4.33) ifadesi kararlılık kriterinin fiziksel ve grafiksel olarak anlaşılmasını sağlar. Bu denklem

matematiksel olarak $(P_m - P_e)$ fonksiyonunun yük açısına “ δ ” göre çizilen grafiğinin $[\delta_0, \delta_m]$ aralığındaki alanını tanımlamaktadır. Sistemin kararlı olması için δ_0 ve δ_m arasında kalan bu alan sıfır olmalıdır. Bu alan (4.34) ifadesindeki gibi iki parça şeklinde ifade edilebilir (Şekil 4.3).

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_m} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (4.34)$$

$$\Rightarrow (\text{Alan}_1) + (\text{Alan}_2) = 0$$

Alan_1 ($\delta_0 - \delta_1$) arası ve $P_m > P_e$ ‘in olduğu pozitif bölge olarak, Alan_2 ise ($\delta_1 - \delta_m$) arası $P_m < P_e$ ‘in olduğu negatif bölge olarak tanımlanmıştır. Kararlılık şartının sağlanması için bu pozitif ve negatif bölgelerin eşit olması gerekir. Yani rotorun hızlanma esnasında kazandığı kinetik enerji daha sonra yavaşlama esnasında aynen geri verilmektedir. Güç sistemine bağlı bir senkron makinenin kararlılık durumunu değerlendirmek için kullanılan (4.33 ve 4.34) eşitliklerine eşdeğer-alan kriteri adı verilir.

Bu kriter, kararlılık şartları içerisinde mekanik güçte olabilecek ani maksimum artış miktarını tespit etmek için kullanılabilir. Aynı zamanda geçici hal kararlılığı şartlarında oluşabilecek maksimum rotor açısı da hesaplanmış olur. Yani kararlılık kaybolmadan yük açısının en fazla ulaşabileceği büyüklük konusunda fikir verir.

Büyük değerlerde maksimum yük açısı için, büyük değerlerde bozucu etki olması gerekir. Bunun için de mekanik güçteki artışın daha büyük olması lazımdır. Arttırılan mekanik güç (ΔP) miktarı arttıkça, yani P_m ‘in yeni değeri arttırıldıkça A_1 alanı büyüyecek ve A_2 alanının mümkün olan maksimum değerinden daha büyük hale gelecektir. P_m düşük iken kapasite tam olarak kullanılmadığından P_m ‘in arttırılmasıyla rotorun hızlanması için gerekli enerji de artacak ve böylece kapasite kullanımı da artmış olacaktır.

Geçici hal şartları altında makine kararlı hal limitini ($\delta = 90^\circ$) aştığı durumda kararlılık devam edebilir. Kararlı hal durumunda makinenin çalıştığı çalışma durumundaki kararlılık hali önemlidir. Yani bir bozucu etki sonrası yeni oluşan çalışma durumuna makinenin kararlı ve veya kararsız olarak gelip gelmediği önemli değildir. Geçici hal kararlılığı durumu ise bozucu etkinin tipine bağlıdır. Bozucu etki karşısında sistem belirli sınırlar içinde kalıyorsa kararlılığını devam ettiriyor demektir.

4.3.2 Geçici Hal Kararlılığı İçin Uyarım Kontrolü

Büyük bozucu etkiler generatör çıkış geriliminde önemli ölçüde değişime neden olmaktadır.

Bu önemli bir sorundur. Çıkış geriliminde oluşan bu geçici değişim sonucunda generatörün dışarıya verdiği senkronlama gücünde azalma olur. Bu sorunun çözümü için çıkış geriliminin bir an önce eski haline getirilmesi gerekir (Enel4ssh2, 2005).

Generatörün gerilim kontrol elemanı olan AVR uyarım sistemi yoluyla generatör çıkış gerilimini sabit tutmaya çalışır. Bu nedenle AVR, geçici hal kararlılığı üzerinde önemli bir rol oynar. Arıza esnasında çıkış gerilimini sabit tutmaya çalışır. Arıza sonrasında ise hızlı bir şekilde gerilimin eski konumuna dönmesini sağlar. Geçici hal şartlarında gerilimin eski seviyesine en hızlı bir şekilde dönmesi için, yüksek hızlı ve tavan gerilimi büyük olan uyarım sistemleri kullanılmalıdır. Bu şekilde alan devresinde iç gecikmenin de önüne geçilmiş olur.

Yani hızlı cevap verme ve tavan gerilimi büyük olan bir AVR kullanılarak yapılacak uyarım kontrolü, geçici hal kararlılığı için bir çözüm olarak sunulabilir. Fakat bu çözüm rotor osilasyonlarına sönümleme açısından zararlı olduğundan başka yöntemlerle bu sorunun da önüne geçilmektedir.

AVR, alan gerilimi seviyesini ayarlayarak arıza durumunda armatür reaksiyonu etkisiyle azalma eğilimi gösteren senkron generatörün akı seviyesini sabit tutmaya çalışır. Böylece çıkış gerilimi ve generatörün baralara güç transferinin devamlılığı sağlanır. Arıza durumunda çekilen hata akımları doğal olarak reaktif olduğundan ve generatörün reaktif çıkış gücü çok büyük olacağından, çıkış gerilimi azalma eğilimi gösterir. Arıza süresinin uzun olması ve hatanın generatör çıkışlarına yakın olması da bozucu etkilerin daha kötü bir durum ortaya çıkarmasına neden olur. Bu da AVR 'nin sabit akı seviyesini sürdürmesini zorlaştırır.

Generatör etiket değerlerinin olumlu yönde değiştirilmesi (daha düşük atalet sabiti, daha yüksek reaktanslar) ve generatörün yüklenmesinde kullanılan bağlantıların güvenilirlik seviyesinin artırılması uyarım sisteminde güvenilirliğin arttırılmasına katkıda bulunacaktır. Yüksek hızlı uyarıcıların kullanımı, yüksek değerli seri reaktanslara çalışmaya izin vermekte ancak uyarıcı kazançlarının daha da arttırılması mümkün gözükmemektedir. Modern uyarıcılar zaten yeterince hızlıdır. Bu yüzden sistem performansında iyileştirme yapabilmek için alternatif kompanzasyon yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir.

4.4 Küçük Sinyal Kararlılığı Açısından SMIB Sistemi

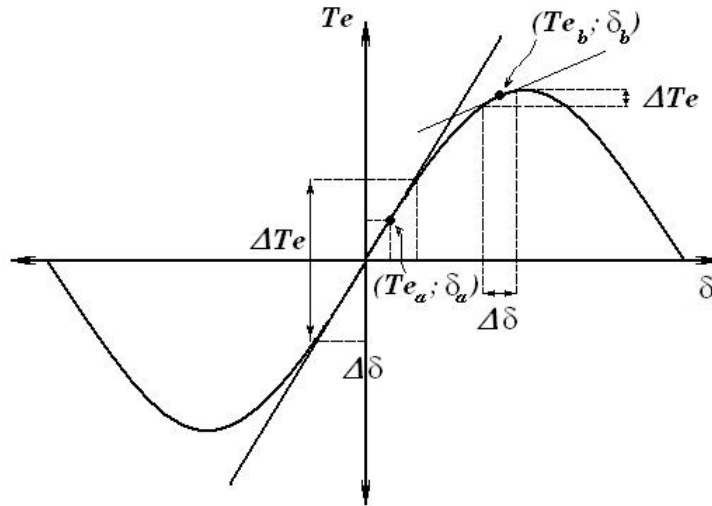
Güç sistemi ve buna ait alt sistemler nonlineer sistemlerdir. Aslında en basit şekilde ifade edilen SMIB sistemide nonlineer bir sistemdir. Bu yüzden her çalışma durumu için sistem cevabı farklı olduğu gibi bir çalışma durumunda uygulanan farklı bozucu etkiler karşısında da sistem cevabı farklı olacaktır. Sistemdeki nonlineerliğin ihmal edilmediği durumdaki güç sistem kararlılığına geçici hal kararlılığı adı verilir. Buna karşın hata minimize edilecek

şekilde sistem cevabı tahmin edilerek sistemdeki nonlinear karakteristiklerin ihmal edildiği durumdaki güç sistem kararlılığına ise küçük sinyal kararlılığı denir. Küçük sinyal kararlılığı, kapsam olarak küçük bozucu etkiler sonrasında sistemin senkronizmada kalma kabiliyetini içerir (Enel4ssh2, 2005).

Bozucu etkinin küçüklüğünün derecesi sistemin nonlinearlık derecesine ve çalışma durumuna göre tanımlanır. Fakat lineerize edilmiş bir sistem için bozucu etkinin yeterince küçük olup olmadığı konusunda kesin bir cevap yoktur. Bunun tahmini için ustalık ve tecrübe gerekmektedir. Kesin emin olabilmek için de lineerizasyon yapılmış detaylı model ile nonlinear olan detaylı model arasında karşılaştırma yapılması gerekir.

Pratik olarak, bir güç sisteminde ayarlı transformatörlerden, yük ve üretimdeki değişimlerden kaynaklanan küçük bozucu etkiler düşünüldüğünde küçük sinyal kararlılığı oldukça önemlidir.

Generatör elektriksel çıkış momenti ve yük açısı arasındaki ilişki düşünülürse lineer analizin geçerli olabileceği koşullar belirlenebilir. Şekil 4.4 'de gösterilen üretilen elektriksel çıkış momenti ve yük açısı arasındaki nonlinear ilişki tek makineli sistemin bir alt modelini temsil eder.



Şekil 4.4 Generatörün elektriksel çıkış momenti-açı ilişkisi (Enel4ssh2, 2005)

Bu nonlinear alt sistem $Te - \delta$ eğrisinin tanjantı şeklinde (Te_a, δ_a) çalışma noktasında lineerize edilmiş bir model ile gösterilebilir. Çalışma durumuna bağlı olarak ΔTe ve/veya $\Delta \delta$ aralığı makul bir yaklaşımdır. Her çalışma noktası (Te_i, δ_i) için farklı bir lineer yaklaşım (tanjant) bulunmaktadır. Buradan nonlinear bir modelden lineerize edilmiş bir modelin nasıl oluşturulabileceği gösterilebilir. Belirlenen bir çalışma noktasındaki nonlinear fonksiyonun

eğimi (tanjantı) lineerize edilmiş modeldir. Böylece fonksiyonun eğimi için genel bir ifade çıkarılmalı ve her çalışma noktasında bu eğim hesaplanmalıdır. Nonlinear bir modelin herhangi bir δ açısı için matematiksel ifadesi (4.35) ile ve lineer yaklaşımı da (4.36) ifadesiyle verilmiştir.

$$T_e = T_{\max} \sin \delta \quad (4.35)$$

$$\frac{dT_e}{d\delta} = T_{\max} \cos \delta \quad (4.36)$$

(4.37) eşitliğine göre δ_a yük açısı değerindeki lineer model ifadesi (4.38) ifadesi şeklinde yazılabilir.

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \approx \frac{dT_e}{d\delta} \quad (4.37)$$

$$\Delta T_e = \left[\frac{dT_e}{d\delta} \Big|_{\delta_a} \right] \Delta \delta \approx [T_{\max} \cos \delta_a] \Delta \delta \quad (4.38)$$

Burada $\Delta T_e = T_e - T_{e_a}$; elektriksel moment değişimi, $\Delta \delta = \delta - \delta_a$; yük açısı değişimi,

$\frac{dT_e}{d\delta} \Big|_{\delta_a}$ ise (T_{e_a}, δ_a) çalışma noktasındaki tanjant yani eğimdir. Belirli bir çalışma noktasında

tanjantı bulmak için genelleştirilmiş denklemini hesaplamak, bu çalışma noktası için lineer modelin katsayılarını hesaplamak demektir. Bu hesaplanan katsayılar, çalışma noktası civarında küçük bozucu etkilere karşı gerçek sistem davranışının nasıl olacağı hakkında bilgi verir.

Sistemin ΔT_e ve $\Delta \delta$ civarındaki küçük bozucu etkilere karşı cevabı hakkında tahmini bilgi edinebilmek amacıyla, lineerize edilmiş modelin (T_{e_a}, δ_a) noktası için hesaplanan katsayılar diğer bir çalışma noktası (T_{e_b}, δ_b) için kullanılamaz. Farklı eğimler farklı küçük sinyal karakteristiklerini tanımlamaktadır.

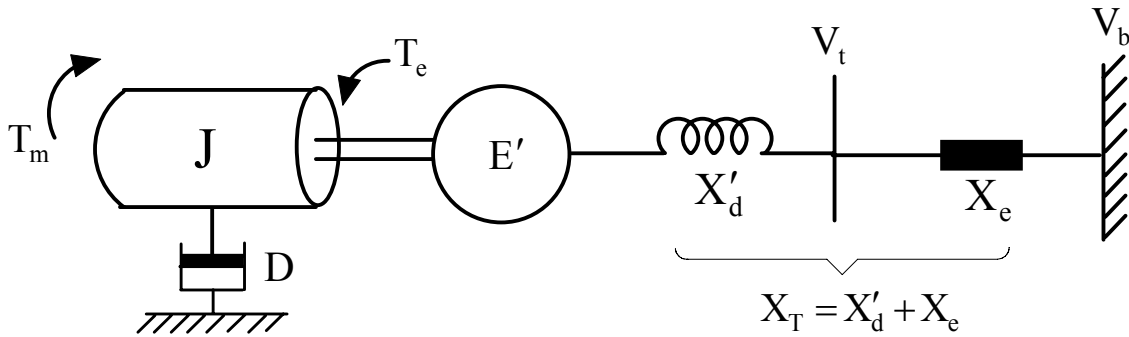
Genel olarak birçok değişkene sahip nonlinear denklemlerden oluşan modeller lineerize edildiğinde oluşan lineer model pek çok katsayıya sahip olacaktır. Ve bu da durum uzay matrisi şeklinde düzenlenebilir. Bu katsayıları içeren matrislerin yorumuna dayanan birçok güçlü lineer sistem analiz teknikleri mevcuttur. Bunların en önemlilerinden birisi de sistemin özdeğerleridir. Detaylı (yüksek dereceli) bir sistem birçok sayıda özdeğer içerebilir. Bu özdeğerler, kompleks bir düzlem $(\sigma, j\omega)$ üzerinde gösterilebilirler. Kompleks düzlem

üzerindeki özdeğerlerin tip ve pozisyonları sistemin küçük sinyal karakteristikleri hakkında özel detaylar sunar. Her bir özdeğer veya kompleks konjuge özdeğer çifti sistemin küçük sinyal cevabının bir modu hakkında bilgi verir. Pratik olarak birçok sayıda özdeğere sahip olan sistemin zaman cevabı da bu küçük sinyal modlarının bir kombinasyonu olacaktır.

Enerji iletim sistemine bağlı bir senkron makinenin küçük sinyal karakteristiklerini veya küçük sinyal kararlılığını etkileyen faktörleri incelemek için sistem modelleri üzerine lineerizasyon teknikleri uygulanmalıdır. Ve lineerize edilen modelin katsayıları da özdeğer vs. gibi yöntemlerle yorumlanmalıdır. Basitlik açısından genellikle SMIB sistemi üzerinde inceleme yapılmaktadır. Uygulamalarda enerji iletim hattının rezistansı genellikle ihmal edilir ve hat tümüyle reaktif olarak düşünülür.

4.4.1 Klasik Model (Hareket denklemleri modeli)

Geçici hal kararlılığı için de kullanılan bu model basit bir kullanıma sahip olduğundan lineerizasyon ve analiz işlemleri hakkında temel bir fikir vermek amacıyla kullanılmaktadır. Hareket denklemleri modeli olarak da isimlendirilen bu modelde makine sabit bir gerilim E' ve sabit bir reaktansla X'_d temsil edilmektedir. Şekil 4.5 'de gösterilen sisteme ait denklemler (4.39) ve (4.40) ifadeleriyle verilmiştir (Enel4ssh2, 2005).



Şekil 4.5 Sonsuz baraya X_e reaktansı üzerinden bağlı senkron generatör (Enel4ssh2, 2005)

$$T_e = \frac{E' V_b}{X_T} \sin \delta \quad (4.39)$$

$$J \frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} + T_e = T_m \quad (4.40)$$

$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega$ ifadesi (4.40) eşitliğinde yerine koyulursa (4.41) ifadesi elde edilir.

$$J \frac{d}{dt} \Delta\omega + D\Delta\omega + T_e - T_m = 0 \quad (4.41)$$

Böylece (4.40) ifadesiyle gösterilen ikinci derece diferansiyel denklemini, (4.42 ve 4.43) ifadeleriyle gösterilen iki birinci derece denklemle ifade etmiş oluruz.

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{1}{J} \{T_m - T_e - D\Delta\omega\} \quad (4.42)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega \quad (4.43)$$

Artık dinamik modele ait denklemler (4.39, 4.42 ve 4.43) olmuştur. Bu modeldeki tek nonlineer ifade (4.39) eşitliğidir. Bu eşitliğin ‘ $\delta = \delta_0$ ’ çalışma noktasındaki lineerizasyonu (4.44) ifadesiyle gösterilmiştir. Lineerize edilmiş ifadedeki eğimi temsil eden kısım “senkronlama moment katsayısı” olarak isimlendirilir. Bu ifade de (4.45) ‘de gösterilmiştir.

$$\Delta T_e = \left[\frac{E'V_b}{X_T} \cos \delta_0 \right] \Delta\delta \quad (4.44)$$

$$K_S = \frac{E'V_b}{X_T} \cos \delta_0 \quad (4.45)$$

(4.42) eşitliğinde T_m yerine ΔT_m , (4.28) ifadesinde ise $\frac{d\delta}{dt}$ yerine $\frac{d}{dt} \Delta\delta$ kullanılırsa verilen

çalışma noktası civarındaki küçük değişimler için lineer modele ait sistem dinamikleri (4.46 ve 4.47) deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt} \Delta\omega = \frac{1}{J} \{ \Delta T_m - K_S \Delta\delta - K_D \Delta\omega \} \quad (4.46)$$

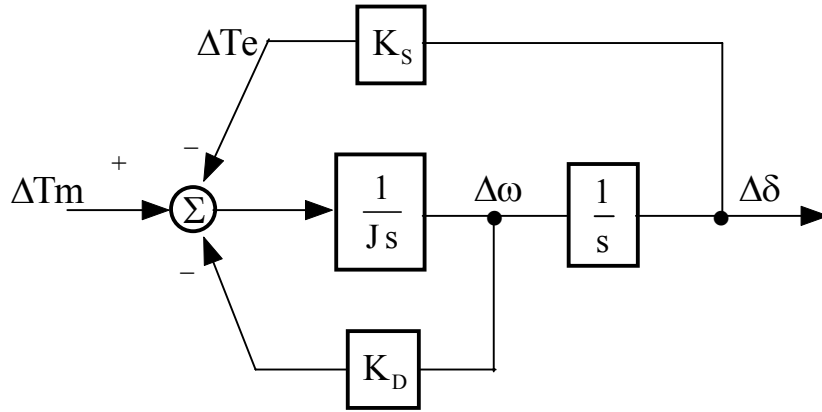
$$\frac{d}{dt} \Delta\delta = \Delta\omega \quad (4.47)$$

(4.46) eşitliğinde (4.42) ‘den farklı olarak kullanılan “ $K_D = D$ ” sönümlenme momenti katsayısı, “ K_S ” ise senkronlama momenti katsayısıdır. Bu denklemler

“ $\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t)$ ” gibi durum uzay matrisi formunda düzenlenirse (4.48) eşitliği elde

edilir. Bu eşitliğin blok diyagram olarak gösterimi ise şekil 4.6 ‘daki gibidir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{J} & -\frac{K_S}{J} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (4.48)$$



Şekil 4.6 Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi blok diyagramı (Enel4ssh2, 2005)

Sisteme mekanik moment değişimi yoluyla bir bozucu etki uygulanırsa ($\Delta T_m \geq 0$) iki çeşit zıt moment ortaya çıkar.

- Yük açısı değişimi “ $\Delta\delta$ ” ile ortaya çıkan zıt moment (K_S bloğu çıkışı)
- Açısal hız değişimi “ $\Delta\omega$ ” ile ortaya çıkan zıt moment (K_D bloğu çıkışı)

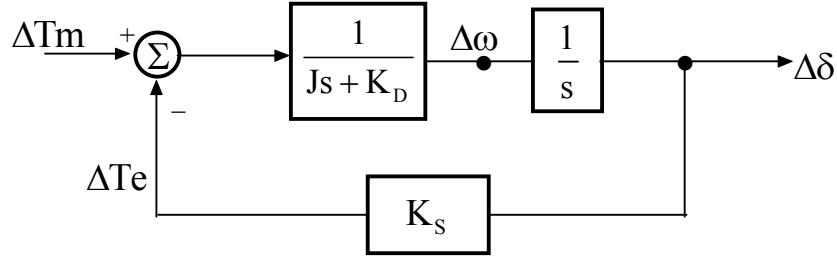
Bunlardan senkronlama momenti olarak isimlendirilen ilki, enerji dönüşümünü (mekanik enerjiden elektrik enerjisine) temsil eden bir momenttir ve yok edilemez özelliğe sahiptir. Mekanik güçte pozitif yönde bir değişim olduğunda, oluşan fazlalık mekanik güç artışı generatör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür ve böylece senkronizasyon korunmuş olur. Senkron makine “ ΔT_m ” mekanik moment artışını yeterli senkronlama momenti ile karşılayamaz duruma gelirse senkronizasyon kaybına uğrar. Mekanik giriş momentinde oluşan artış nedeniyle generatör şaftı hızlanmaya başlar. Senkronlama momenti oluşturma kabiliyeti kararlılık için çok önemlidir.

Sönümlenme momenti olarak isimlendirilen ikinci tip moment ise enerji kaybını (kayıp momenti) temsil eder. Rotor osilasyonları neticesinde oluşur ve zamana göre azalış gösterir. Bu osilasyonlar $\Delta\delta$ ve $\Delta\omega$ de oluşan osilasyonlardır.

Şekil 4.6 da gösterilen hareket denklemleri modelinde elektriksel çıkış momenti tümüyle senkronlama momenti olarak gösterilmiştir. Sönümlenme momentinin tek kaynağı olarak da mekanik şaft sistemindeki kayıp moment (4.49) ifadesiyle gösterilmiştir.

$$\Delta T_L = K_D \Delta\omega \quad (4.49)$$

Şekil 4.6 ‘daki blok diyagram gösterimi şekil 4.7 ‘deki gibi basitleştirilebilir.



Şekil 4.7 Senkron generatörde mekanik güç-açı değişimi basitleştirilmiş blok diyagramı (Enel4ssh2, 2005)

Blok diyagramdan (4.50, 4.51 ve 4.52) eşitlikleri çıkartılabilir. (4.51 ve 4.52) eşitlikleri belirli bir çalışma durumu için sistemin küçük bir bozucu etkiye karşı cevabında meydana gelen osilasyonların doğal frekansını ve sönümlenme katsayısını göstermektedir. Bu sonuçlar (4.48) eşitliğinde verilen A matrisinin özdeğerlerinden de elde edilebilir.

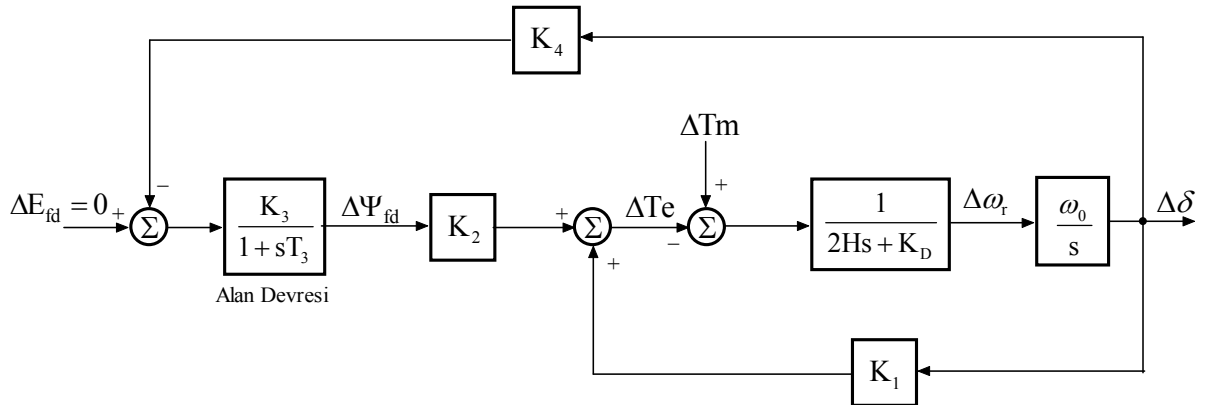
$$\frac{\Delta\delta}{\Delta T_m} = \frac{1/s(J \cdot s + K_D)}{1 + \frac{K_S}{s(J \cdot s + K_D)}} = \frac{1}{J \cdot s^2 + K_D \cdot s + K_S} = \frac{1/J}{s^2 + \frac{K_D}{J} \cdot s + \frac{K_S}{J}} \quad (4.50)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_S}{J}} \quad (4.51)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{J \cdot K_S}} \quad (4.52)$$

4.4.2 Geçici Hal Reaktansı (X'_d) Arkasındaki Değişken Gerilim (E'_q) Modeli-AVR siz

Nonlinear hareket denklemleri modeline alan devresi dinamikleri eklenerek lineerize edilirse şekil 4.8 'de görülen küçük sinyal modeli elde edilir (Enel4ssh2, 2005).



Şekil 4.8 Geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli (AVR'siz) (Enel4ssh2, 2005)

Lineerize edilmiş model üzerindeki katsayılarına ait ifadeler aşağıda verilmiştir.

$$K_1 = \frac{E_{q0} V_b}{X_{qT}} \cos \delta_0 + \frac{X_q - X'_d}{X'_{dT}} i_{q0} V_b \sin \delta_0 \quad (4.53)$$

$$K_2 = \frac{V_b \sin \delta_0}{X'_{dT}} \quad (4.54)$$

$$K_3 = \frac{X'_{dT}}{X_{dT}} \quad (4.55)$$

$$K_4 = \frac{X_d - X'_d}{X'_{dT}} V_b \sin \delta_0 \quad (4.56)$$

$$T_3 = K_3 T'_{d0} \quad (4.57)$$

Bu denklemlerde kullanılan bazı reaktansların açılımları da (4.58) de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} X_{dT} &= X_d + X_e \\ X'_{dT} &= X'_d + X_e \\ X_{qT} &= X_q + X_e \end{aligned} \quad (4.58)$$

Bu denklemlerle tanımlanan model senkron makineye ait lineer Heffron-Phillips modelinin temelidir. Sistem kararlılığına uyartım kontrolü etkisinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılır.

K_1 : Senkronlama moment katsayısıdır. Önceden de görüldüğü gibi çalışma durumuna bağlıdır. Fakat buradaki özel durum nedeniyle relüktans (manyetik direnç) moment bileşeni de vardır.

K_2 : Alan akımı değişimi ile elektriksel moment değişiminin ilişkisini belirten bir katsayıdır. Bu katsayının çalışma durumuna bağlı olarak olduğu açıkça görülmektedir.

K_3 (empedans faktörü parametresi) ve T_3 (yükli durumdaki alan zaman sabiti); birlikte bozucu etki-alan akı değişimi ilişkisini belirleyerek dinamik cevabı etkilerler. Çalışma durumundan bağımsız olmalarına karşın, alan akı değişiminin hızını tayin ettikleri için makine için oldukça önemli parametrelerdir.

K_4 : Yük açısı değişimi ve K_3 yoluyla alan akı değişimi arasındaki bağlantıyı yapan katsayıdır. Makinede çok etkili bir katsayıdır. Armatür reaksiyonunun demanyetizasyon etkisini temsil eder.

Yük açısını arttırmak (pozitif bir $\Delta\delta$ değişim) stator ve rotor akıları arasındaki karşıtlığın zıt

yönde artmasına neden olur. Bu akı değişimi de rotor alanında bir değişiklik meydana getirir. Faraday yasasına göre akı değişimi, endüklenen emk'ya eşit olduğundan, buradan iki önemli sonuç ortaya çıkar.

- Yük açısı değişiminin “ $\Delta\delta$ ” büyük olması, rotor akı değişiminin de büyük olması sonucunu doğurur. Bu da sönümlemede önemli bir etkiye sahip olan alan gerilimi ve alan akımlarının büyük olmasını sağlar.
- Rotor açısında oluşan değişimin sonucu olarak alanın mıknatıslığı gider yani demanyetizasyon oluşur. Demanyetizasyonun etkisi ile üretilen zıt moment azalır. Bu faydalı bir etkidir. Açık değişimi nedeniyle oluşan bu küçük demanyetizasyon nedeniyle, senkronlama momenti, alan akısının sabit kaldığı farzedilen duruma göre bir miktar azalır.

Lineer modele ait tanımlanan bu denklemler ile bu şekilde teorik düşünceler ortaya konmasına karşın, modele ait denklemlere fiziksel açıdan bakmak çok daha faydalı olacaktır.

Şekil 4.8 'de görülen sistem bir bozucu etkiye maruz kalırsa yani mekanik giriş momentine küçük bir ΔT_m artışı uygulandığında ne olacağı gözlemlendiğinde, makinede iki yol üzerinden stabilize edici elektriksel karşıt momentlerin üretildiği görülür.

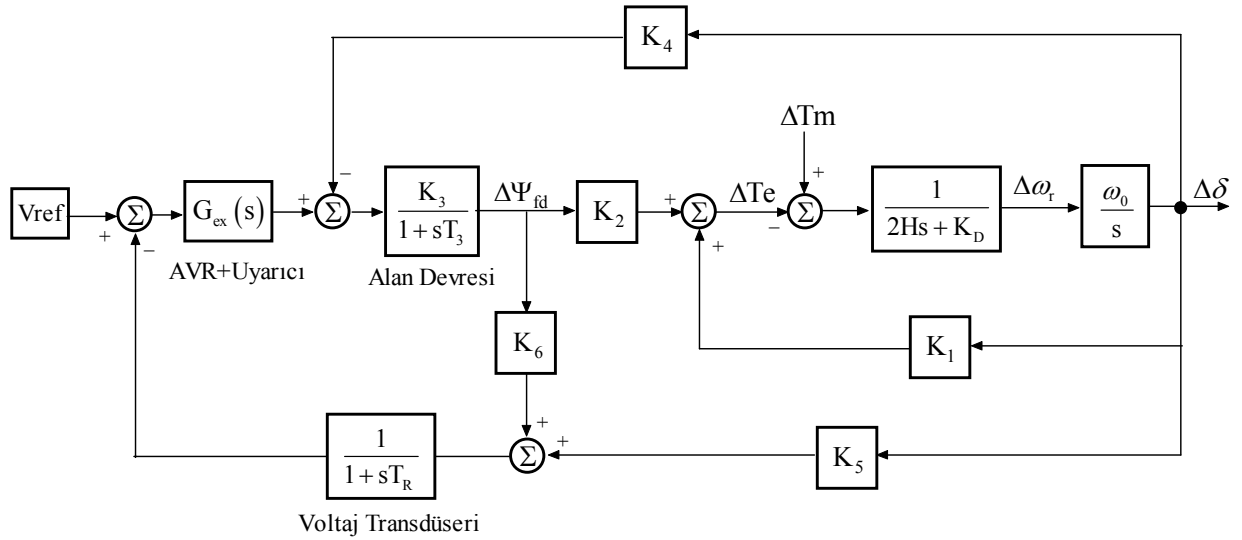
- K_1 bloğunun çıkışı, tamamıyla senkronlama momentidir. Ve bu momentin genliği çalışma durumuna bağlıdır.
- K_2 bloğunun çıkışı ise, senkronlama ve sönümleme momenti bileşenlerinden oluşur. Bu iki bileşen de çalışma durumuna bağlıdır.

Bölüm 4.4.2 'de SMIB sistemi; elektriksel dinamiklerin hesaba katılmadığı klasik model olarak tanıtılmıştır. Bölüm 4.4.3 'de ise SMIB sistemi; alan devresi dinamiklerinin hesaba katıldığı geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli olarak tanıtılmıştır.

4.4.3 Geçici Hal Reaktansı (X'_d) Arkasındaki Değişken Gerilim (E'_q) Modeli-AVR ile

Alan devresi dinamiklerinin de temsil edildiği önceki modele, gerilim regülatörü kontrolleri ve uyarıcı modeli de ilave edilir ve lineerizasyon işlemi yapılırsa yeni bir lineer model elde edilir. Bu model hem rotor osilasyonlarının, hem de harici uyartım kontrollerinin alan akı değişimleri ve kararlılık üzerindeki etkilerinin incelenmesine olanak vermektedir. Bu modelin oluşması için öncelikle şekil 4.8 'de gösterilen AVR 'siz modele çıkış gerilim değişimi ' ΔE_{fd} ' dahil edilmelidir. Bu aslında geçici hal reaktansı gerisindeki değişken gerilim modelinin bir parçasıdır. Basitlik açısından AVR 'siz modelden çıkarılmıştır. Ancak sisteme AVR eklendiği zaman çıkış gerilim değişiminin model üzerinde gösterilmesi zorunlu hale gelir. Çünkü AVR generatör çıkış gerilimini geri besleme sinyali olarak kullanmaktadır (Şekil 4.9) (Enel4ssh2,

2005).



Şekil 4.9 Geçici hal reaktansı arkasındaki değişken gerilim modeli (AVR'li) (Enel4ssh2, 2005)

Burada yapılan modeli değiştirmek değil modele harici kontrolörler ilave etmektir. Uyarıcı da bu kontrolörlerden birisidir. Modelde DC, AC ve statik tip uyarıcılar kullanılabilir. Fakat birçok modelde uyarıcının basit gösterimleri kullanılmaktadır. Aşağıda sıklıkla kullanılan basitleştirilmiş uyarıcı tipine iki örnek verilmiştir.

$$G_{ex}(s) = K_A \quad : \text{Yüksek kazançlı tristör tipli statik uyarıcı} \quad (4.59)$$

$$G_{ex}(s) = \frac{K_a}{1+s \cdot T_a} \quad : \text{DC ve AC tipler için kullanılan uyarıcı} \quad (4.60)$$

Diğer modele ilave olarak kullanılan K_5 ve K_6 katsayıları da (4.61) ve (4.62) ifadeleriyle tanımlanmıştır.

$$K_5 = \frac{X_q}{X_{qT}} \frac{V_{d0}}{V_{t0}} V_b \cos \delta_0 - \frac{X'_d}{X'_{dT}} \frac{V_{q0}}{V_{t0}} V_b \sin \delta_0 \quad (4.61)$$

$$K_6 = \frac{X_e}{X'_{dt}} \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \quad (4.62)$$

Oldukça karmaşık olan bu model üzerinde yapılabilen simülasyon çalışmaları ile AVR'nin etkisinin detaylı olarak incelenmesi mümkündür. Blok diyagram üzerinde yapılan simülasyonlar, kavramların anlaşılması açısından kolaylık sağlamaktadır. AVR eklenmesi nedeniyle artık alan akı değişimleri hem armatür reaksiyonu hem de alan gerilim değişimleri nedeniyle oluşmaktadır. K_5 ve K_6 ifadeleri AVR performansının çalışma şartlarına göre

değişeceğini göstermektedir. Bundan dolayı AVR 'nin ayarlanmasına ihtiyaç vardır. AVR etkisiyle hem senkronlama hem de sönümlenme momentlerinde oluşacak değişim açıkça görülmektedir. Ne tür değişimlerin olacağı, denklemlerin analizi ve simülasyon çalışmaları ile görülebilir. (Kundur, 1994).

AVR 'nin etkisiyle senkronlama momenti artar sönümlenme momenti ise azalır. Sönümlenme momenti negatif olduğunda, osilasyon modu kompleks düzlemin sağ tarafına kayar. Bu da sistem kararlılığını olumsuz yönde etkiler. Bu problemin çözümü için bir güç sistem stabilizatörünün kullanılması önerilmektedir (Enel4ssh2, 2005).

4.5 Yapılan Çalışmalarda Kullanılan Güç Sistem Modelleri

Heffron ve Phillips (1952) tarafından harici bir empedans üzerinden sonsuz baraya bağlı bir senkron makinenin lineerize edilmiş modeli tanımlanmıştır. Mello ve Concordia (1969) tarafından yapılan çalışmalar sonucu bu geliştirilen lineer modelin düşük frekanslı osilasyonların analizi için çok uygun olduğu anlaşılmıştır. Heffron ve Phillips (1952) ayrıca olan dik bileşenler olan senkronlama momenti " $\Delta\delta$ " ve sönümlenme momentini " $\Delta\omega$ " ayırıştırarak önemli bir işlemi keşfetmişlerdir.

Yu (1983) tarafından yapılan çalışmada üçüncü derece makine modeli temel geçici hal kararlılık analizi açısından yeterli görülmüştür. Hiyama vd. (1994) simülasyon çalışmaları için bu üçüncü derece modeli kullanılmıştır.

Deckman ve Costa (1994) tarafından yapılan çalışmada güç sistemlerinin dinamik çalışmaları için bir güç duyarlılık modeli türetilmiştir. Bu modelin performans testi klasik Heffron-Phillips modeli (Mello ve Concordia, 1969) ile karşılaştırılarak yapılmıştır.

Jadric (1998) tarafından yapılan çalışmada senkron generatörün hem küçük sinyal hem de büyük sinyal kararlılığı için kullanılabilen ve iyi sonuç veren ortalama bir model geliştirilmiştir. Bu model nonlineer özellikte ancak zaman bağımlı olarak geliştirilmiştir.

Kundur (1994), Padiyar (1999), Mackovski (1997) ve Rogers (1999) 'ın güç sistem kararlılığı ve analizi kitaplarında simülasyon çalışmaları için kullanılan birçok model tanıtılmış ve kullanılmıştır. Önerilen uyartım kontrolörlerinin diğer kontrolörlerle karşılaştırılarak performanslarının test edilebilmesi için IEEE tarafından geliştirilen modeller (IEEE benchmark) de bulunmaktadır. Bu modeller de pek çok kitap ve makale tarafından kullanılmıştır.

Abido ve Abdel-Magid (1998; 1999a; 1999b; 1999c) tarafından yapılan çalışmalarda tek makineli sistem için SMIB sistem modeli çok makineli sistem için de her makinenin iki

eksenli dördüncü derece nonlinear modelle tanımlandığı 3 makineli 9 baralı test sistemi kullanılmıştır.

Chung vd. (1999) tarafından simülasyon çalışmaları için daha önce Yu (1983) tarafından kullanılan lineerize edilmiş Heffron-Phillips güç sistem modeli kullanılmıştır. Kontrolör performansı aktif ve reaktif yük koşullarında, ani yük değişimleri ve kısa devre arızası durumunda rotor açısı değişimi gözlemlenerek test edilmiştir.

Abdel-Magid vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada iki farklı model kullanılmıştır. Bunlar çok makineli sistem modelleridir. İlk model Anderson ve Fouad (1994) tarafından da kullanılan 3 makineli 9 baralı sisteme aittir. İkinci model ise Hiyama ve Sameshima (1991) tarafından da kullanılan 10 makineli 39 baralı NETS 'dir. Çalışmada her bir senkron makine dördüncü derece iki eksenli nonlinear modelle tanımlanmıştır.

9 generatör, 1 sonsuz bara ve 39 baraya sahip olan NETS modeli Bazenella vd. (2000) ve daha önce de Byerly vd. (1978) tarafından simülasyon modeli olarak kullanılmıştır. Bu sistem aynı zamanda bir IEEE benchmark'ıdır. Bu modelde AVR birinci derece bir transfer fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Çalışmada 22 numaralı baraya kısa devre uygulanarak 9 adet generatörün yük açılarının bu arızaya verdiği tepki incelenmiştir.

Gan vd. (2000) tarafından simülasyon çalışmalarında model olarak daha önce Pai (1989) tarafından kullanılan 10 makineli 39 baralı NETS kullanılmıştır. 26 numaralı barada üç faz ve toprak kısa devre arızası durumunda model üzerindeki dinamik performans gözlenmiştir.

Lu vd. (2001a) yaptıkları simülasyon çalışmasında 3 çeşit model kullanmışlardır. Bu modeller Power System Toolbox for MATLAB (1997) programından hazır olarak alınmıştır. Kullanılan ilk model SMIB sistem, ikincisi 2 bölgeyi 4 makineli 13 baralı sistem diğeri ise 16 makineli 68 baralı sistemdir.

Lu vd. (2001b) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise nonlinearliklerin hesaba katıldığı dördüncü derece generatör modeli ve IEEE ST1 tipi standart uyarım sistemi modeli kullanılmıştır. Böylece generatör ve uyarım sisteminden oluşan tüm model yedinci dereceden olmaktadır. İletim hattı üzerine kısa devre arızası uygulanmış ve bu arıza 0.1 s sonra temizlenmiştir. Önerilen kontrolör performansının değerlendirilebilmesi için hafif, orta ve ağır yükleme koşulları için yapılan simülasyonlarda generatörün açısal hız değişimi incelenmiştir.

Paulus ve Murgas (2002) tarafından yapılan çalışmada ise SMIB sistemi kullanılmıştır. AVR modeli için, IEEE Committee Report (1981) 'dan alınan statik tip, generatör modeli için de Machowski vd. (1997) tarafından yazılan güç sistem kararlılığı kitabındaki model 6 tipi

kullanılmıştır.

Hu vd. (2002) tarafından önerilen kontrolörün performansını göstermek amacıyla simülasyon çalışmalarında 6 makineli 22 baralı bir sistem modeli kullanılmıştır.

Ivanescu vd. (2002) güç sistem kontrol problemiyle ilgili çalışmalarında zaman bölgesi simülasyonları için Snyder vd. (1997) tarafından da kullanılan 29 makineli 400 durum değişkenli nonlinear gerçekçi bir enterkonnekte sistem modeli üzerinde çalışmışlardır. Ancak bu 400 durum değişkeni için tasarlanan kontrolör de 400 duruma sahip olacağından bu model 6 değişkenli modele indirgenerek kontrolör tasarlanmıştır.

Abido ve Abdel-Magid (2003) 'in çalışmalarında generatörün elektromekanik hareket denklemi ve generatör iç gerilim denkleminde oluşan üçüncü derece modelle tanımlanan SMIB sistem modeli kullanılmıştır.

You vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada önerilen PSS 'in etkinliği üç farklı model üzerinde test edilmiştir. Bu modeller SMIB sistemi, 2 bölgesi 4 makineli 13 baralı sistem ve 16 makineli 68 baralı sistemdir. Kullanılan modellerde her generatör için 6 adet durum değişkeni bulunmaktadır. Örnekleme frekans değeri olarak 0.01 s kullanılmıştır. Kullanılan modeller yine Power System Toolbox for MATLAB (1997) programından hazır olarak alınmıştır. İlk modelde bir generatör modeli, bir hız regülatörü ve bir IEEE ST3 tipi uyarım sistemi bulunmaktadır. Hat sonunda 3 faz kısa devre arızası uygulanmakta ve arıza 0.05 s sonra düzeltilmektedir. Hafif ve ağır yük koşullarında simülasyonlar yapılmıştır. Generatörlerin birbirinden uzak iki bölgeye yerleştirildiği ikinci modelde ise sonsuz bara bulunmamaktadır. Arıza ve hata temizleme ilk modeldeki gibidir. Bu modelde G1 ve G4 generatörleri IEEE DC tip, G2 generatörü kazanç ve zaman sabitinden oluşan basitleştirilmiş tip, G3 generatörü ise IEEE ST3 tipi uyarım sistem modeli içermektedir. İlk olarak yalnız G2 generatörü üzerine PSS yerleştirilmiş ve osilasyonların sönümlenmesi izlenmiştir. İkinci olarak da G2 ve G3 generatörleri üzerine birer PSS yerleştirilerek alanlar arası osilasyonların sönümlenmesi gözlenmiştir. New England / New York enterkonnekte sisteminin indirgenmiş modeli olan üçüncü modelde ise G1 'den G8 'e kadar tüm generatörlere IEEE DC tip uyarım sistemi kurulmuştur. G3 generatörüne IEEE ST3 tipi AVR ve önerilen PSS eklenmiştir. Diğer generatörlerde uyarım sistemi ve hız regülatörü yoktur. Arıza ve hata temizleme ilk modeldeki gibidir. Yalnız üç faz arızası farklı hatlara uygulanmaktadır. G9 generatöründe PSS olmadan, klasik PSS ile önerilen PSS ile farklı yük koşullarında yapılan simülasyonlarda G9 generatörü ve alanlar arası osilasyonların sönümlenmesi gözlenmiştir. Bu çalışmada performans değerlendirme açısından gözlenen parametre hız değişimidir.

Abido ve Abdel Magid (2004) 'in çalışmalarında lineerize edilmiş SMIB modeli ve IEEE ST1 tipi AVR ve PSS kullanılmıştır. Ayrıca kontrolörlerle birlikte tüm modelin durum uzay denklemleri de verilmiştir.

Bunlara ilaveten SMIB sistem modeli (Seval vd., 2004, Chaturvedi ve Malik, 2005), yedinci derece nonlinear senkron generatör modeli ve ST1A tipi uyarıcı modeli içeren SMIB sistem modeli (Malik, 2004), her makinenin yedinci derece modelle temsil edildiği 3 makineli 5 baralı sistem modeli (Elshafei vd., 2005), 9 senkron makine ve 10 numaralı makinenin bağlandığı sonsuz bara olarak modellenen 39 numaralı baradan oluşan NETS modelleri (El-Zonkoly, 2006) ve 16 makineli 68 baralı sistemi temsil eden NETS-NYPS sistem modeli (Kumar vd., 2006) de araştırmacılar tarafından çalışmalarında kullanılmıştır.

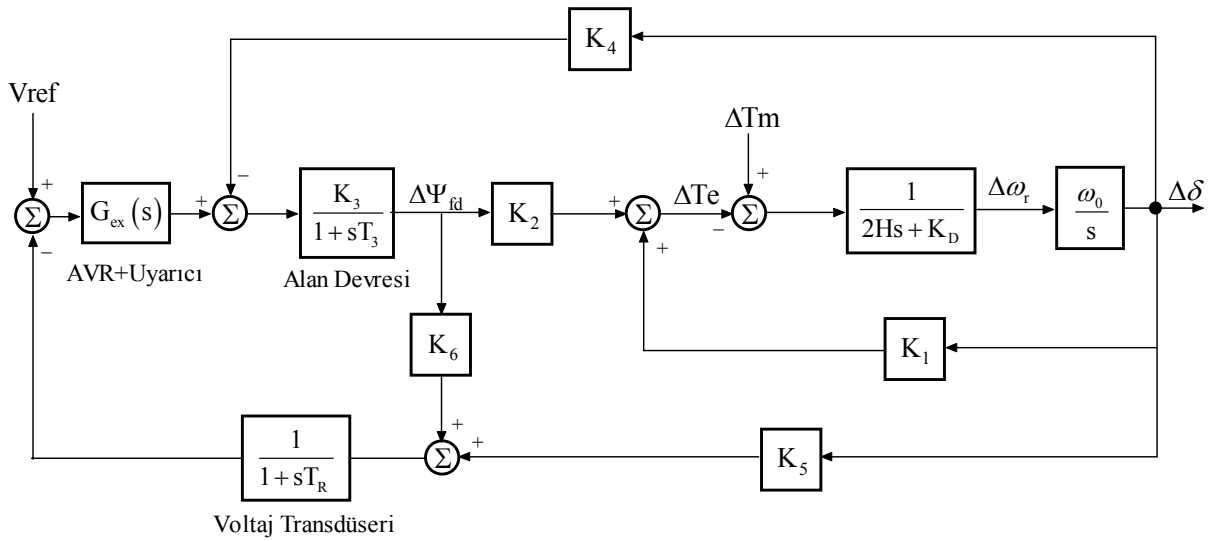
Pek çok araştırmacı tarafından geliştirilen modeller daha sonraları yine birçok araştırmacı tarafından simülasyon çalışmalarında kullanılmıştır. Literatürde model geliştiriciler ve bu modelleri yaptıkları çalışmalarda önerdikleri yöntemlerin performans testi için kullananlar olmak üzere iki farklı araştırmacı vardır. Son 20 yılda bilgisayar teknolojisinde yaşanan hızlı gelişmeler sayesinde daha karmaşık modeller üzerinde daha hızlı simülasyonlar yapabilmek teknik olarak mümkün hale gelmiştir. Bu da gerçeğe daha yakın olan karmaşık modellerin geliştirilmesini ve simülasyon çalışmalarının artmasını sağlamıştır.

5. ÖRNEK SİSTEM ÜZERİNE UYGULAMALAR

Simulasyon çalışmasında kullanılan sistem modeli ve uygulanan kontrol yöntemlerinin modelleri ‘Matlab Simulink’ programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modellerin simülasyonu da Ek-1 de verilen optimump.m isimli Matlab m_file ana programı ve buna bağlı alt programlar ile yapılmıştır. Her kontrol yönteminin uygulanması farklı bir alt program ile gerçekleştirilmiştir. Ana programda sistem ve simülasyon parametreleri girilmiş alt programlarda ise uygulanan kontrol yöntemine ait parametreler girilerek simülasyon yaptırılmış ve elde edilen sonuçlar analiz edilerek sayısal ve grafiksel olarak gösterilmiştir.

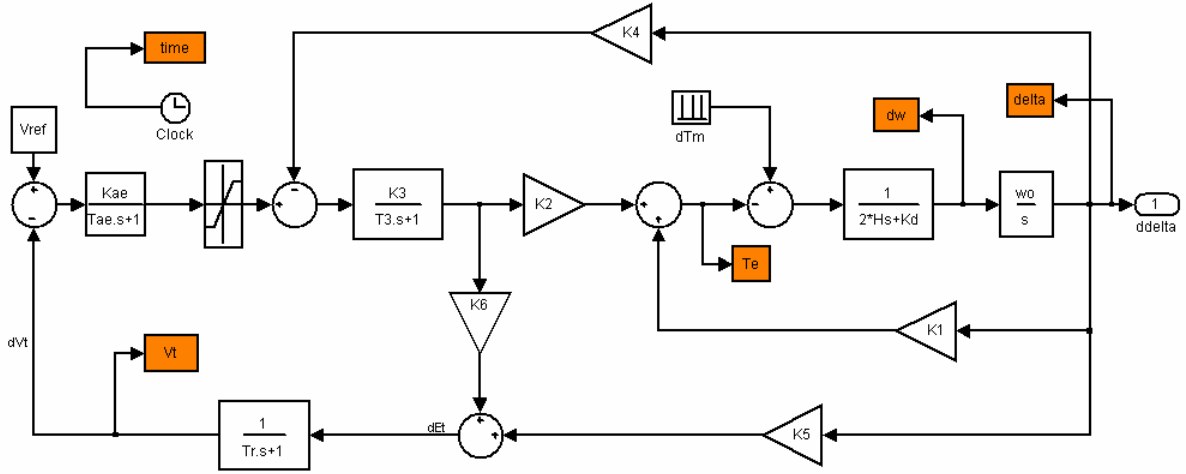
5.1 Üzerinde Çalışılan ve İlave Kontrolör İçermeyen Güç Sistem Modelinin Dinamik Davranışının İncelenmesi ve Simülasyonu

Şekil 5.1 ‘de uygulamada kullanılan SMIB sisteminin blok diyagram şeklinde gösterimi şekil 5.2 ve 5.3 ‘de ise bu modelin Matlab simulink programında uygulanan şekilleri görülmektedir.

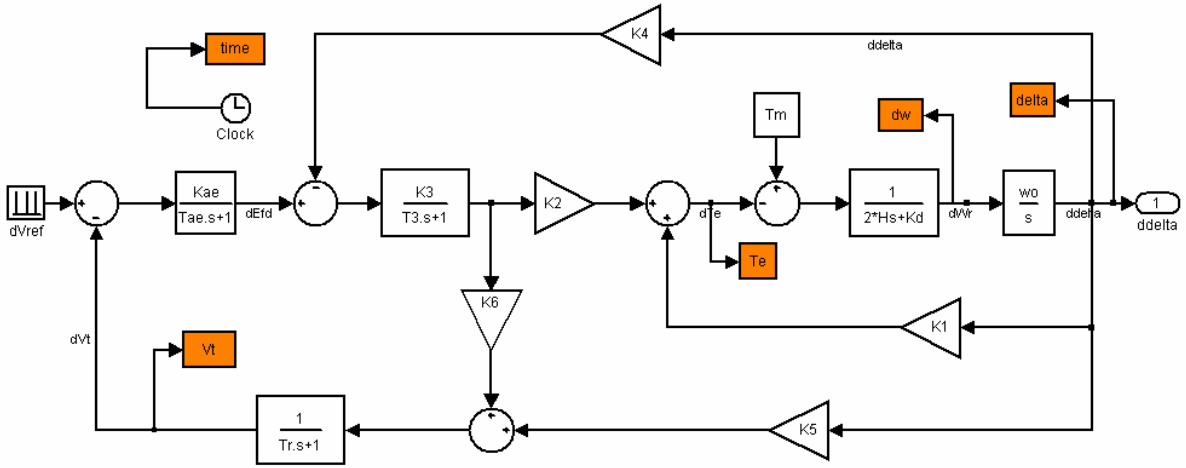


Şekil 5.1 İlave kontrolör içermeyen sistem modeli

Öncelikle üzerinde simülasyonların yapıldığı sistemin dinamik davranışını incelemek amacıyla model üzerindeki temel parametreler değiştirilmiş ve bu değişimlere karşı sistemin tepkisi incelenmiştir. Model üzerinde sırasıyla Tm (Şekil 5.2) ve Vref (Şekil 5.3) girişlerine bozucu etki uygulanarak simülasyonlar yapılmıştır.



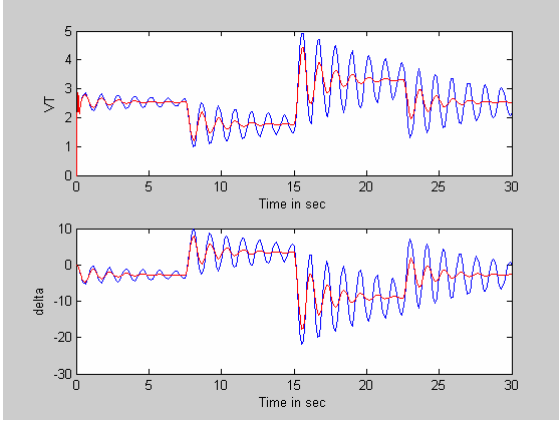
Şekil 5.2 İlave kontrolör içermeyen sistem modeli simulink gösterimi (Bozucu etki T_m girişinde)



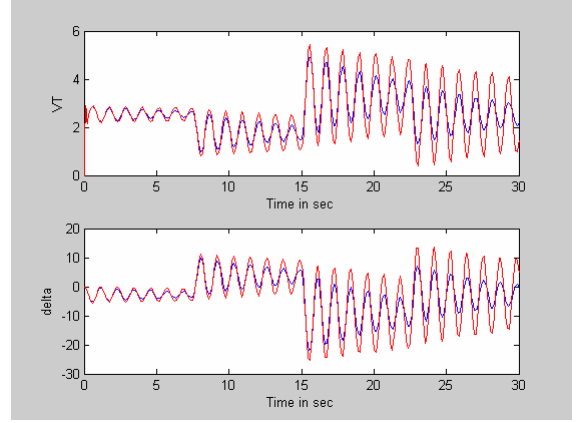
Şekil 5.3 İlave kontrolör içermeyen sistem modeli simulink gösterimi (Bozucu etki V_{ref} girişinde)

Bu simülasyonlarda 'D' sönüm katsayısı, 'f' üretilen gücün frekansı, ' K_A ' AVR kazanç katsayısı ve 'H' atalet sabitinin değişimleri karşısında sistem çıkış değişkenleri olan ' V_T ' çıkış gerilimi ve ' δ ' yük açısının zamana göre değişimleri izlenmiştir.

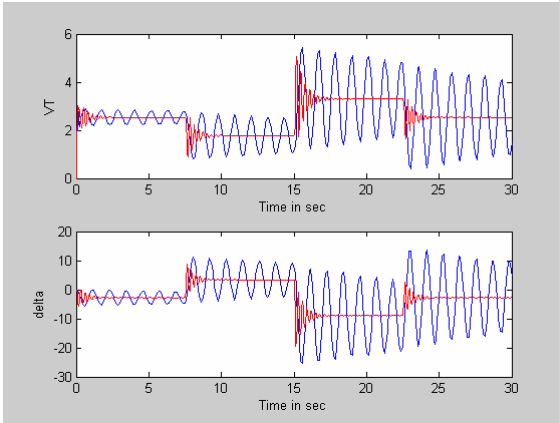
Yapılan simülasyon sonuçlarına göre model parametrelerindeki değişimlerin sistem kararlılığı üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. T_m ve V_{ref} girişlerine ayrı ayrı bozucu etki uygulanarak yapılan simülasyonlarda benzer sonuçlar elde edilmiştir. T_m girişine bozucu etki uygulayarak sistem parametrelerinde yapılan değişimlerin sistem cevabı üzerindeki etkileri Şekil 5.4-11'de, V_{ref} girişine bozucu etki uygulayarak sistem parametrelerinde yapılan değişimlerin sistem cevabı üzerindeki etkileri de Şekil 5.12-19'da görülmektedir.



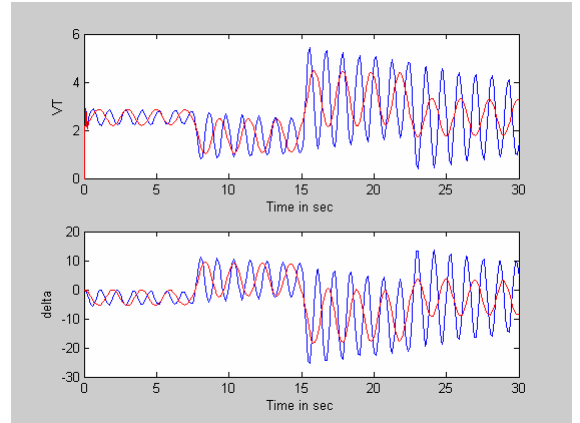
Şekil 5.4. D sönüm oranının artırılması
D1=2 D2=10



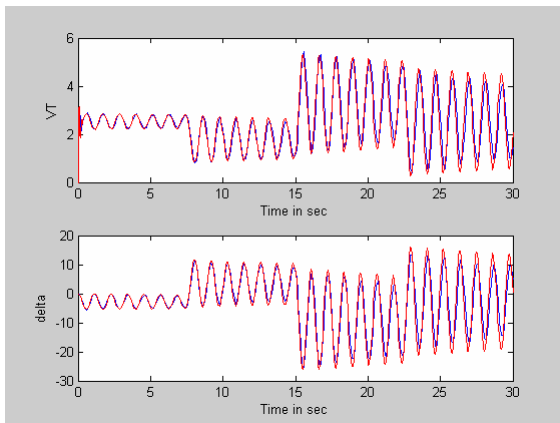
Şekil 5.5. D sönüm oranının azaltılması
D1=2 D2=0



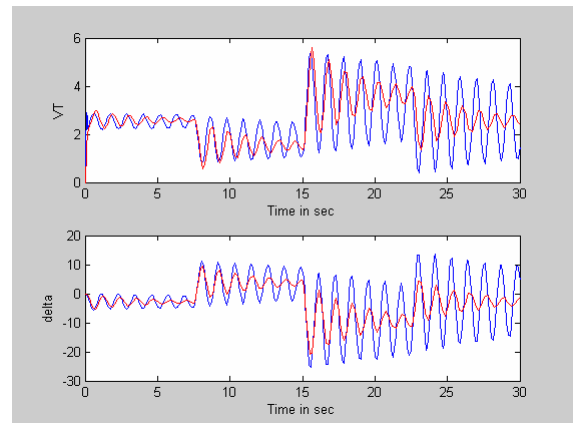
Şekil 5.6. Frekansın artırılması f1=60 Hz
f2=180 Hz



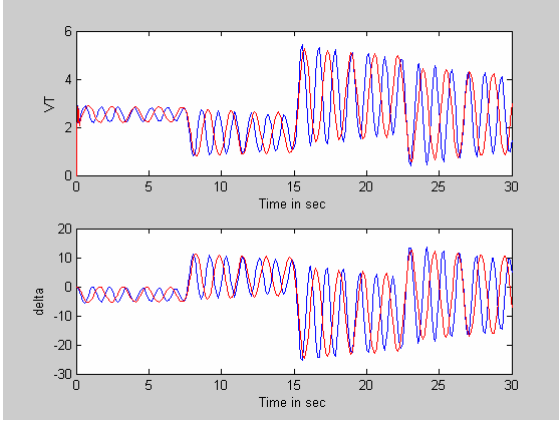
Şekil 5.7. Frekansın azaltılması f1=60 Hz
f2=20 Hz



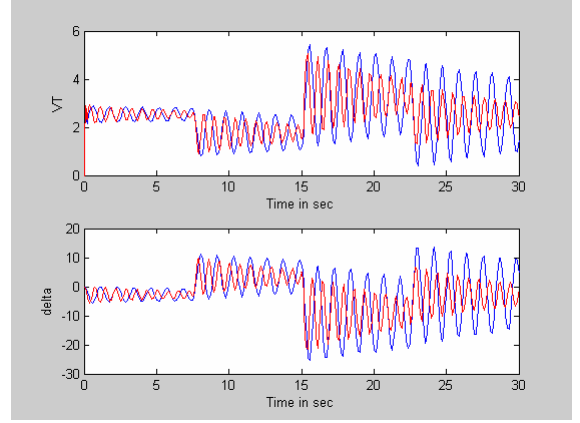
Şekil 5.8. KA Uyarım sistemi kazancının artırılması KA1=200 KA2=400



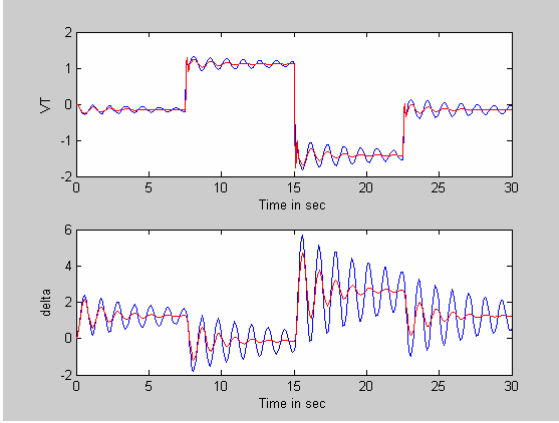
Şekil 5.9. KA Uyarım sistemi kazancının azaltılması KA1=200 KA2=50



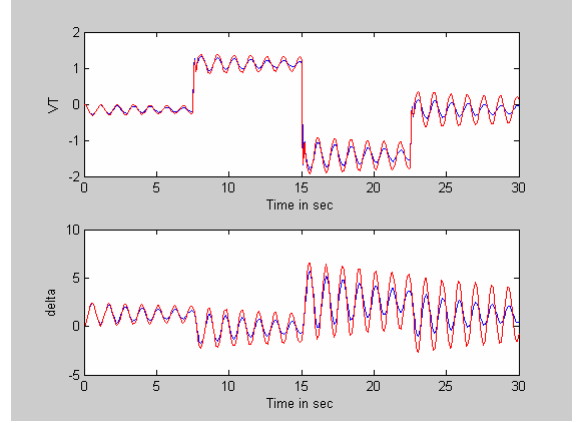
Şekil 5.10. “H” eylemsizlik momentinin artırılması $H1=5$ $H2=10$



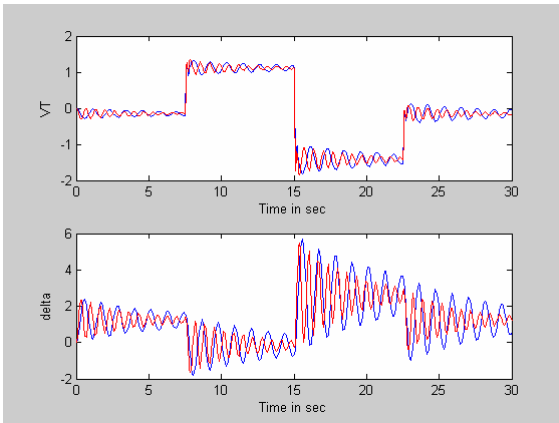
Şekil 5.11. “H” eylemsizlik momentinin azaltılması $H1=5$ $H2=2$



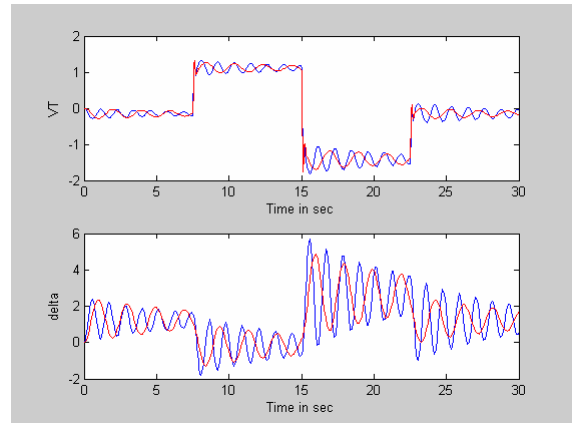
Şekil 5.12. D sönüm oranının artırılması $D1=2$ $D2=10$



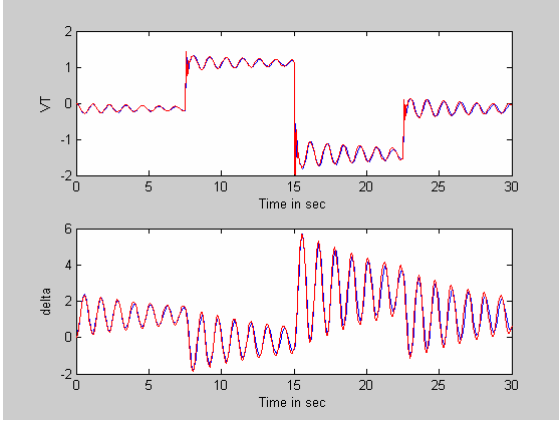
Şekil 5.13. D sönüm oranının azaltılması $D1=2$ $D2=0$



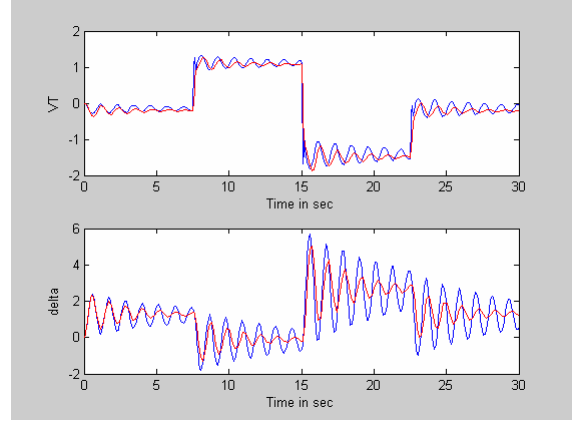
Şekil 5.14. Frekansın artırılması $f1=60$ Hz $f2=180$ Hz



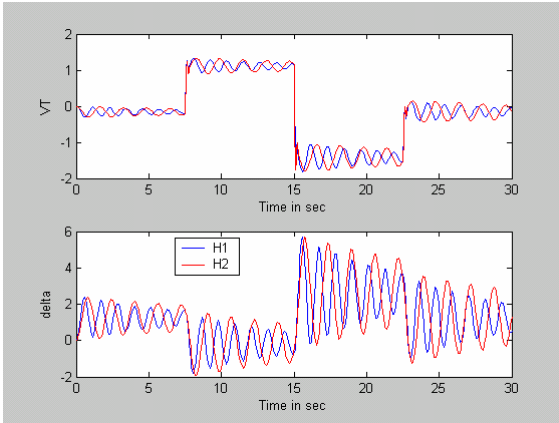
Şekil 5.15. Frekansın azaltılması $f1=60$ Hz $f2=20$ Hz



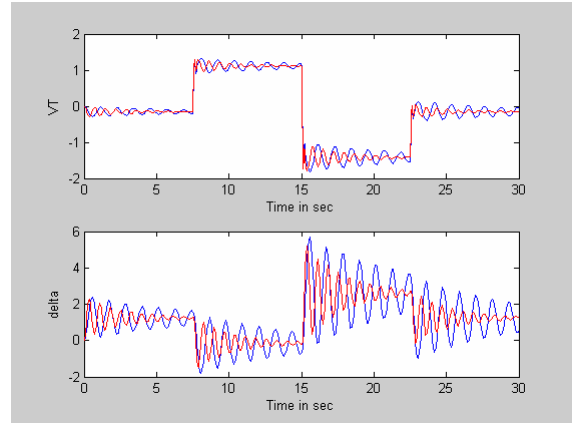
Şekil 5.16. KA Uyarım sistemi kazancının artırılması KA1=200 KA2=400



Şekil 5.17. KA Uyarım sistemi kazancının azaltılması KA1=200 KA2=50



Şekil 5.18. "H" eylemsizlik momentinin artırılması H1=5 H2=10



Şekil 5.19. "H" eylemsizlik momentinin azaltılması H1=5 H2=2

Sonuç olarak model parametrelerinden 'D' ve 'f' değerleri artırılıp, 'KA' ve 'H' değerleri azaltıldığında sistemin çıkış cevabının iyileştiği gözlenmiştir. Bu parametre değerleri çizelge 5.1 'de görülmektedir. En iyi çıkış cevabını veren parametreler koyu renkle gösterilmiştir.

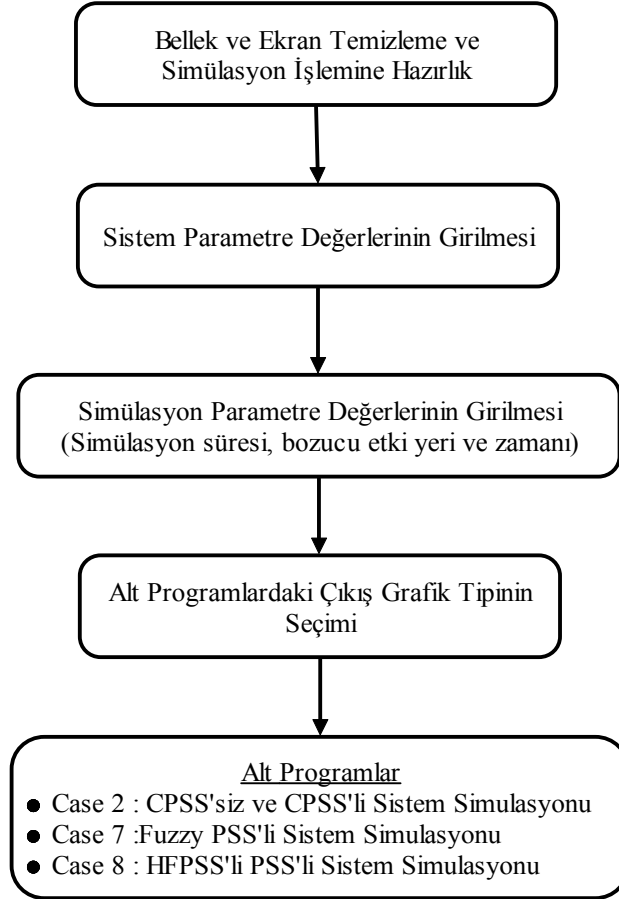
Çizelge 5.1 Sistem parametreleri için kullanılan değerler

	Verilen Değerler		
	Düşük	Normal	Yüksek
D (Sönüm Katsayısı)	0	2	10
f (frekans [Hz])	20	60	180
KA (Uyarım Kazancı)	50	200	400
H (Atalet sabiti [MW.s/MVA])	2	5	10

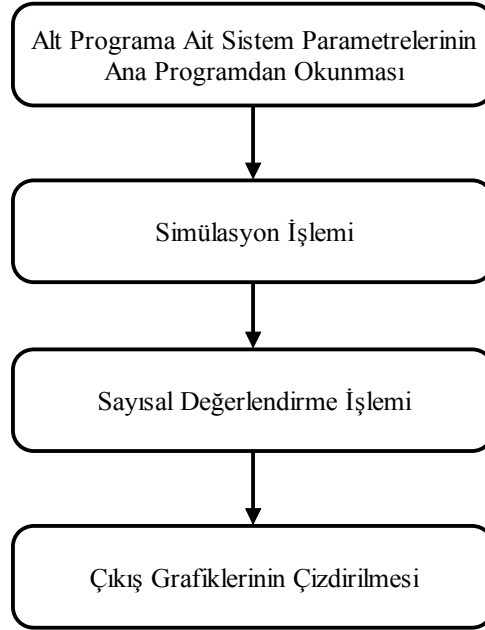
5.1.1 Model ve Simulasyon Parametreleri

Bu model AVR sistemine ilave bir kontrolör içermemektedir. Uyarım kontrol sistem modeli olarak bölüm 4.4.3 'de anlatılan DC ve AC tipteki uyarıcılar için kullanılan basitleştirilmiş model kullanılmıştır.

İlave kontrol içermeyen sistem modelinin Matlab programı ana program ve ek programlar şeklinde Ek-1 de verilmiştir. Ana program ve örnek bir alt programın içeriğini özetleyen diyagramlar ise şekil 5.20 ve 5.21 'de görülmektedir.



Şekil 5.20 Ana pogramın içeriği



Şekil 5.21 Ana program içinden çalıştırılan alt pogramın içeriği

Tüm simülasyon işleminde kullanılan parametreler de çizelge 5.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 5.2 Simülasyon parametreleri

Simülasyon süresi	tstop= 24 s
Çözümleyici	Fixed-step ode 14x (extrapolation)
Örnekleme aralığı	0.01
Extrapolasyon derecesi	4
Periyodik örnekleme	Simple tasking mode

5.1.2 Bozucu Etki Yeri, Zamanı ve Şiddeti

Bu çalışmada tüm simülasyon uygulamaları için bozucu etki uygulama yeri olarak mekanik güç “Tm” girişi seçilmiştir. Yapılan analizlerde sistemin 24 saniyelik simülasyonu kullanılmıştır. Ancak simülasyon sonuçları gösterilirken görülebilirlik ve bozucu etkiye kararlı haldeki sistemin verdiği tepkinin incelenmesi açısından 12-24 saniye arasındaki sonuçlar gösterilmiştir. Bozucu etkinin uygulanması için 15 nci saniyeye kadar beklenmiştir. Bunun nedeni kontrolör performansının en iyi şekilde gözlenebilmesi ancak sistem kararlı iken bozucunun sisteme uygulanmasıyla mümkün olmasıdır. Böylece bozucu etki 15 nci saniye sonrasında 0.5 saniyelik bir zaman dilimi (15-15.5 saniyeler arası) içerisinde sisteme uygulanmıştır. Bozucu etki şiddeti ise 0.5 birim olarak seçilmiştir. Yani sisteme kare dalga şeklinde bir bozucu etki uygulanmaktadır.

5.1.3 Performans Değerlendirmesi İçin Gözlenen Parametreler

Simüle edilen sistemde sistemin performansını değerlendirebilmek için literatürde sıkça

kullanılan 4 parametre dikkate alınmıştır. Bu parametreler generatör çıkış gerilimi, güç açısı elektriksel çıkış torku (momenti) ve generatör açılal hızı (mil dönüş hızı) 'nın zamana göre değişimleridir.

5.1.4 İşletim Koşulları

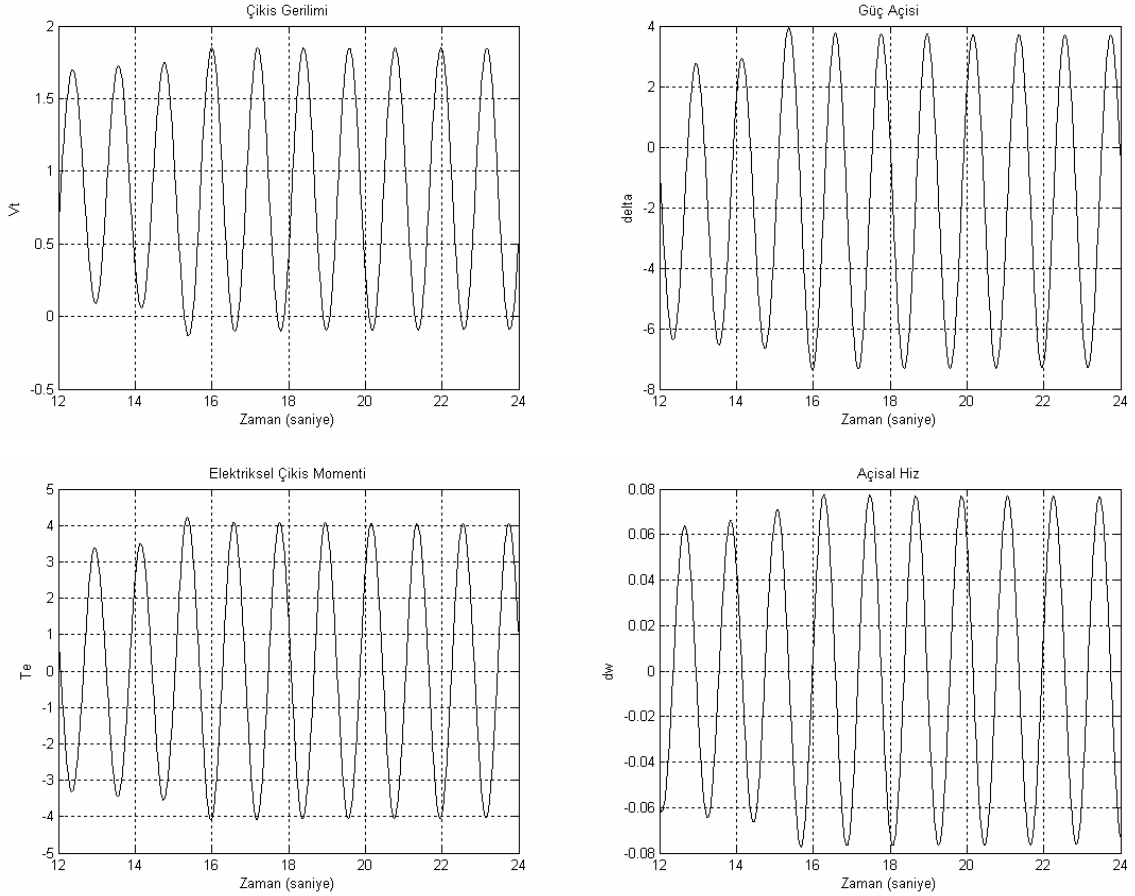
Senkron generatörlerin sistem modelleri yükleme koşullarına göre farklı çalışma durumu parametreleri içermektedir. Bu çalışmada kullanılan sistem modeli simülasyonunda 4 farklı çalışma durumu üzerinde çalışılmıştır. Bu durumlar çizelge 5.3 'de gösterilmiştir (Gupta vd.,2003).

Çizelge 5.3 Simulasyonlarda kullanılan dört farklı çalışma durumuna ait parametreler

No	P	Q	xe	K1	K2	K3	K4	K5	K6
1	0,6000	0,0361	xe	1,4336	1,5855	0,2889	2,0294	0,0194	0,2628
2	1,5000	0,2303	xe	1,6117	1,8883	0,2889	2,4170	-0,1524	0,1898
3	1,8000	0,3352	xe	1,5911	1,8987	0,2889	2,4303	-0,1717	0,1866
4	1,0000	0,3333	3*xe	0,7430	1,0776	0,4180	1,3794	-0,1739	0,4561

Bu çalışma durumlarından 1 nolu çalışma durumu hafif yük koşulunu, 2 nolu çalışma durumu orta yük koşulunu, 3 nolu çalışma durumu ağır yük koşulunu, 4 nolu çalışma durumu ise reaktif yüklü koşulu temsil etmektedir (Gupta vd., 2003).

İlave kontrol yöntemi içermeyen SMIB sistemi için çizelge 5.3 'de gösterilen 4 no'lu çalışma durumuna ait simülasyon sonuçları şekil 5.22 'de görülmektedir.



Şekil 5.22 “4” nolu çalışma durumu için kontrolör içermeyen modele ait simülasyon sonuçları Şekilde V_t , δ , T_e ve ω parametrelerinin zamana göre 12 saniyelik simülasyon süresi boyunca (12-24s arası) değişimleri gösterilmiştir. Burada AVR sistemine ilave bir kontrolör olmadığından ve sistem ağır reaktif yük koşulu olan 4 nolu çalışma durumunda çalıştığından sistem sistemin dinamik performansı oldukça düşüktür. Sistem sabit genlikli osilasyon yaptığından 15 nci saniyede sisteme 0.5 saniye süresince uygulanan bozucunun etkisi genlik artışı şeklinde görülmektedir. Bu şekildeki sistem cevabına sahip sisteme kritik kararlı sistem denebilir.

5.1.5 Sistem Performansının Sayısal Olarak Değerlendirilmesi

Yukarıda simüle edilen sistemin gözlenen çıkış parametrelerinin görsel açıdan değerlendirilmesine ilave olarak, kontrolör performansını sayısal olarak ifade eden farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlere örnek olarak IAE (integral of absolute error) (5.1) ve ITAE (integral of time absolute error) (5.2) yöntemleri verilebilir (Li ve Tso, 2000).

$$IAE = \int |e| dt \quad (5.1)$$

$$ITAE = \int t |e| dt \quad (5.2)$$

Bu çalışmada simülasyon sonuçlarının sayısal performans ölçütü olarak IAE performans değerlendirme kriteri seçilmiştir. Böylece kontrol yönteminin farklı yük koşulları altındaki performansı sayısal bir değerle ifade edilebilmektedir. Burada hesaplanan IAE değeri ne kadar küçükse sistem performansı da o kadar iyi anlamına gelmektedir. Sayısal performansın hesaplanmasında bozucu etki uygulanma zamanı (15 nci saniye) ile simülasyon bitim süresi (24 ncü saniye) arasındaki zaman aralığı dikkate alınmıştır.

Çizelge 5.4 'de 4 farklı çalışma durumu için ilave kontrolör içermeyen sisteme ait sayısal performans (IAE) değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 İlave kontrol içermeyen sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri

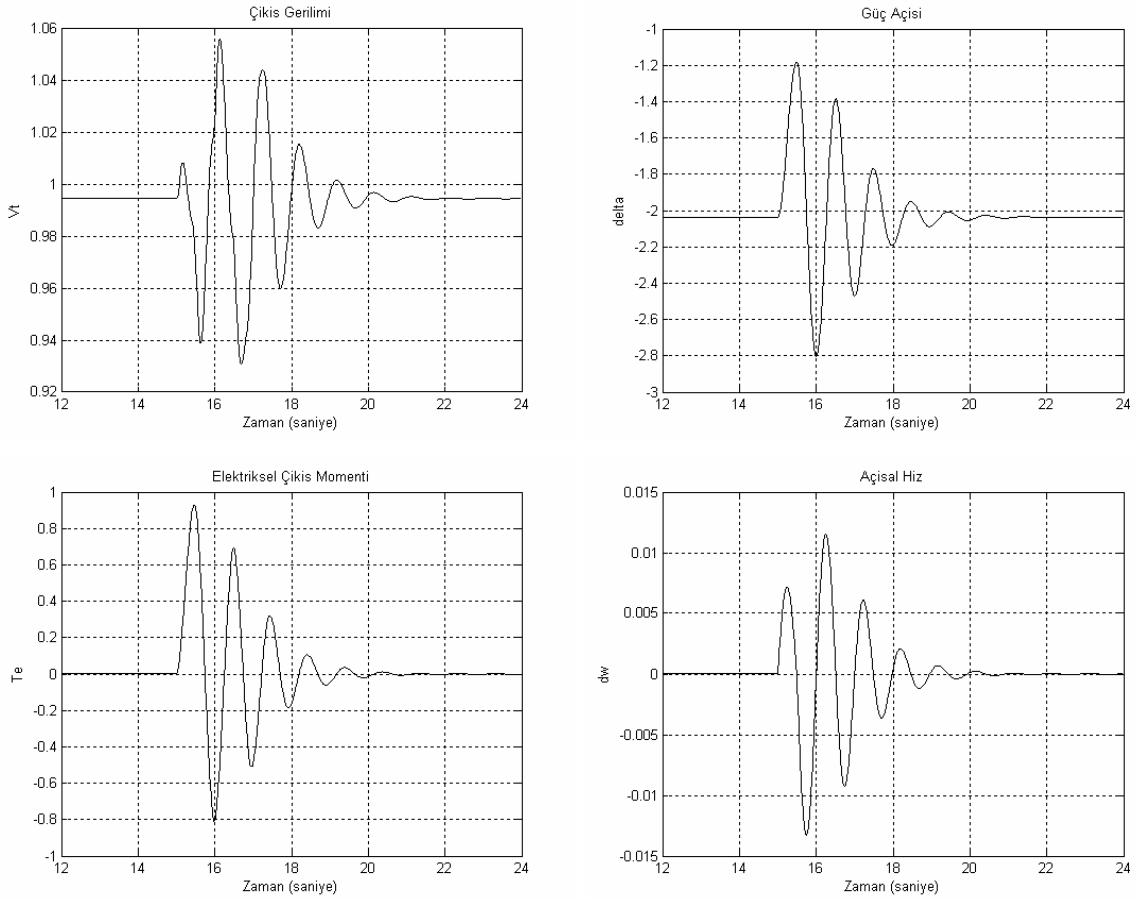
Çalışma Durumları	IAE Performans İndeksi			
	ΔV_t	$\Delta \delta$	ΔT_e	$\Delta \omega$
1	3.01	147.9	201.7	2.657
2	257.32	1599.3	2489.7	32.658
3	289.62	1624.6	2502.4	32.774
4	571.90	3183.3	2320.4	43.977

Çizelge 5.4 'de gösterilen IAE değerlerine göre sistem yalnızca 1 nolu çalışma durumunda iyi bir performans göstermiştir. Yük koşullarının sırasıyla ağırlaştığı 2 ve 3 nolu çalışma durumlarında ve ağır reaktif yük koşulu olan 4 nolu çalışma durumunda ise performans oldukça kötüdür. Yani diğer durumlara göre kararlılık derecesi oldukça düşüktür.

5.2 Kontrol Metodları

Güç sisteminde kullanılan kontrolörlerin ana amacı, istenen kararlılık ve güvenlik şartlarının makul maliyet sınırları içerisinde gerçekleştirilmesidir. Eskiden kontrolörler klasik kontrol teorisini kullanarak tek girişli ve tek çıkışlı (SISO) olarak tasarlanıyordu. Son yıllarda güç mühendisliği alanında ileri kontrol tasarımı uygulamalarına duyulan ilgi giderek artmaktadır. (Gan vd., 2000).

Kontrol sistemlerinde amaç kontrol edilen çıkış değişkeni “y(t)” nin istenen şekilde davranmasıdır. Bu amaca ulaşabilmek için tasarlanacak kontrolörler kontrol sistemine özgü belirlenen tasarım kriterlerini sağlayacak şekilde olmalıdır.



Şekil 5.26 “4” nolu çalışma durumu için pss ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları

Bu simulasyonlar PSS ’siz simulasyonda olduğu gibi 4 nolu çalışma durumu için yapılmıştır. Bu simulasyonlarda sistemin yaklaşık 5 saniye içerisinde bozucu öncesi konumuna geldiği görülmektedir. Bu sonuç 4 nolu çalışma durumu için oldukça iyi gözükmetedir.

Sisteme ilave edilen CPSS ‘in diğer çalışma durumlarında gösterdiği performansı değerlendirebilmek için IAE performans değerlendirme kriterine göre elde edilen sonuçlar da çizelge 5.6 ’da verilmiştir.

Çizelge 5.6 İlave Kontrol olarak PSS İçeren Sistem Modelinde (15-24s arası) IAE değerleri

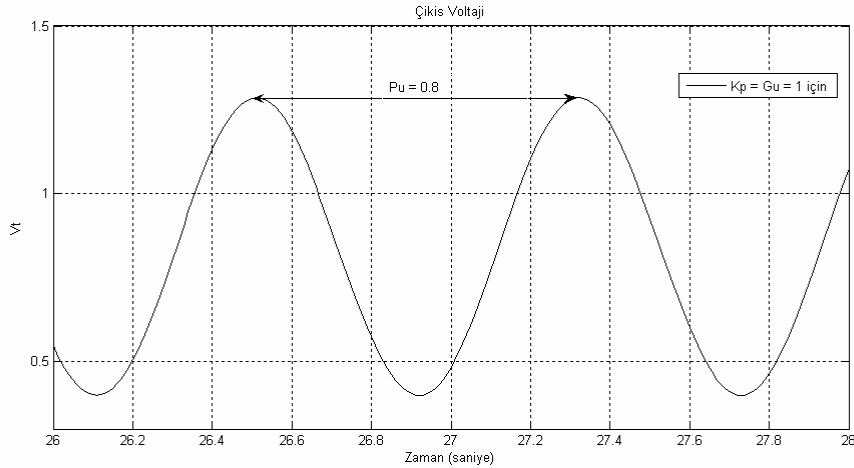
Çalışma Durumları	IAE Performans İndeksi			
	ΔV_t	$\Delta \delta$	ΔT_e	$\Delta \omega$
1	14.574	80.991	86.612	0.92453
2	2.4214	26.281	67.284	0.55263
3	2.5701	27.585	72.008	0.59881
4	10.106	114.45	122.42	1.7728

IAE sonuçlarına göre PSS ‘li sistemin 1 ve 4 nolu durumlarına göre 2 ve 3 nolu çalışma durumlarında daha iyi bir performans sergilediği gözlenmiştir.

5.4 Kullanılan PID Kontrol Yöntemi

PID kontrolörünün oransal (K_p), integral (K_i) ve türevsel (K_d) katsayılarının ayarlanması için Ziegler Nichols ayarlama yönteminin kapalı çevrim tipi (Ziegler Nichols tuning method: closed loop) kullanılmıştır. Bu ayarlama metodunda önce integral ve türevsel bileşenler '0' yapılır. Sonra oransal kazanç küçük değerden kademeli olarak artırılır. Gözlenen sistem çıkışında sabit genlikli bir osilasyon elde edilene kadar arttırılmaya devam edilir. Sabit genlikli bir osilasyon olduğu durumdaki oransal kazanç değeri $K_p = G_u$ olarak alınır. Burada 'Gu' 'son kazanç' olarak isimlendirilir. Bu osilasyonun periyodu 'Pu' ya ise 'son periyod' adı verilir.

Uygulamada sistemin Vt çıkışında $K_p = 1$ olduğunda sabit genlikli osilasyon görülmüştür. Buna göre $K_p = G_u = 1$ değeri elde edilmiş olur. Sabit genlikli osilasyondaki iki tepe arasındaki uzaklık olan Pu değeri ise 0.8 s olarak ölçülmüştür (Şekil 5.27).



Şekil 5.27 Sistemin 'Vt' çıkışındaki sabit genlikli osilasyon ve hesaplanan Gu ve Pu değerleri

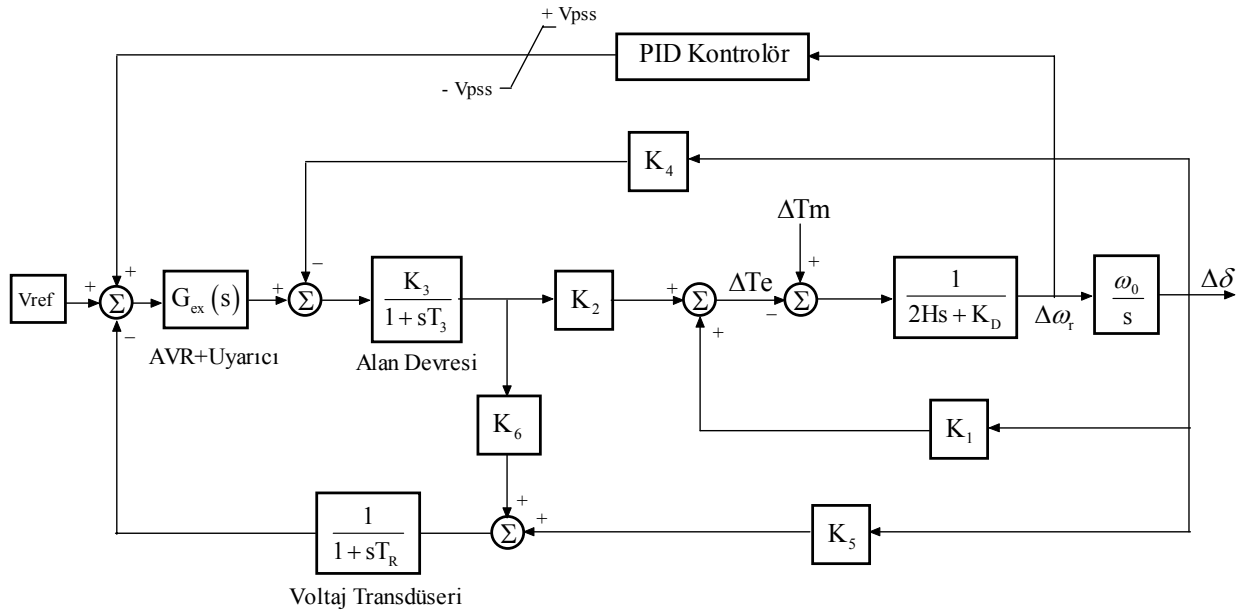
Bu Gu ve Pu değerleri kullanılarak PID kontrol parametreleri çizelge 5.7 'de görüldüğü gibi elde edilir.

Çizelge 5.7 Ziegler Nichols yöntemine göre hesaplanan PID katsayı değerleri

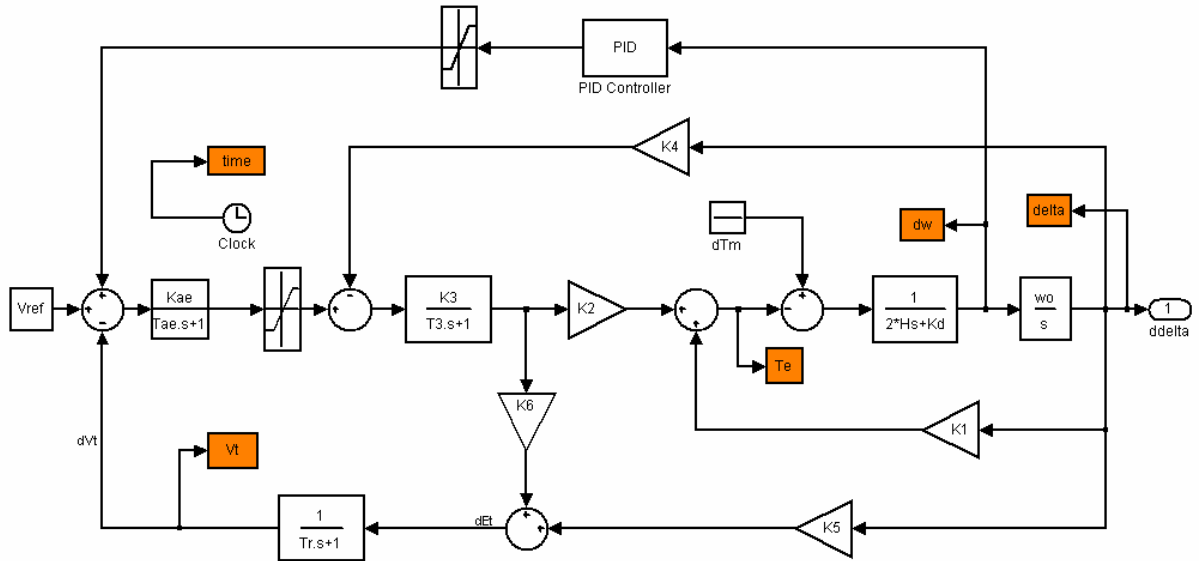
P	I	D
0.6 Gu	2 / Pu	Pu / 8
0.6	2.5	0.1

5.5 SMIB Modeli Üzerinde PID Kontrolörünün İlave Kontrolör Olarak Kullanılması

SMIB sisteminde CPSS yerine klasik PID kontrolör konularak elde edilen sistem modeli şekil 5.28 ve 5.29 'da gösterilmiştir.



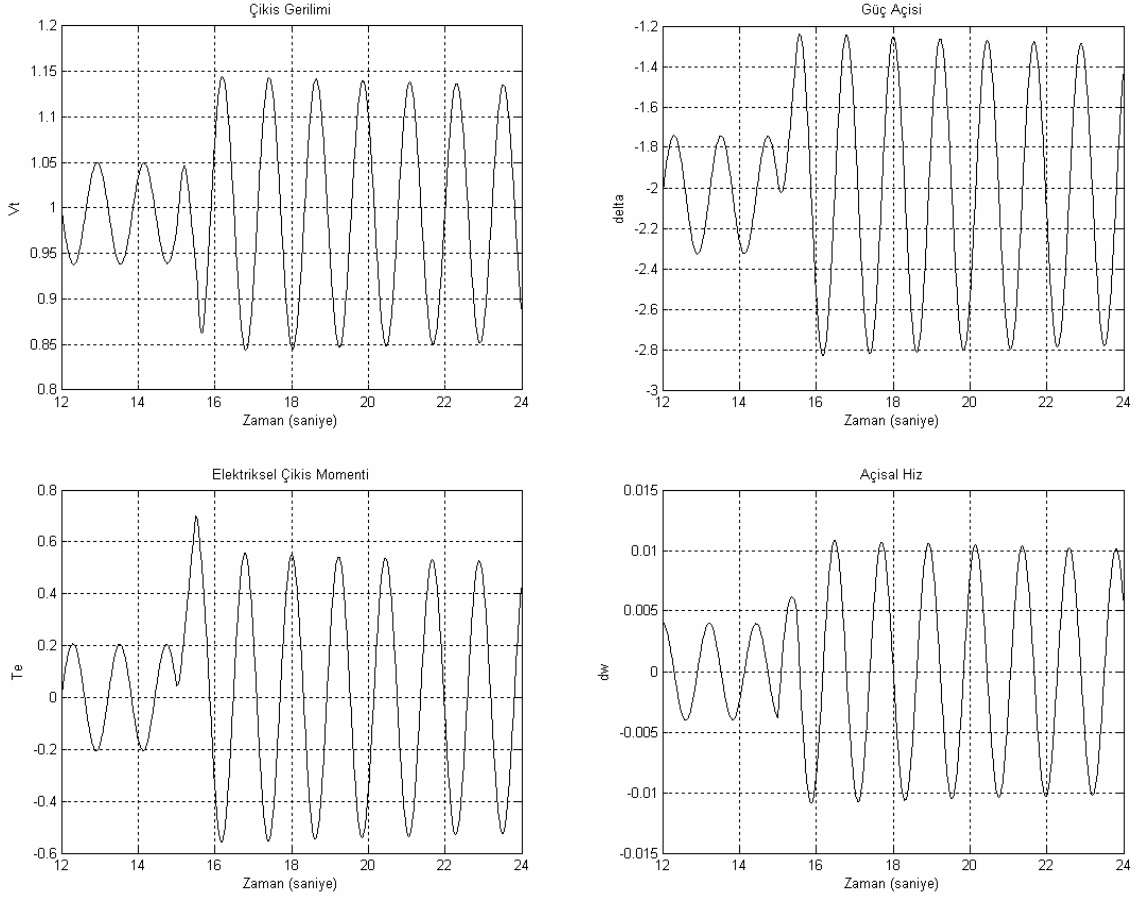
Şekil 5.28 PID ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli



Şekil 5.29 PID ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli simulink gösterimi

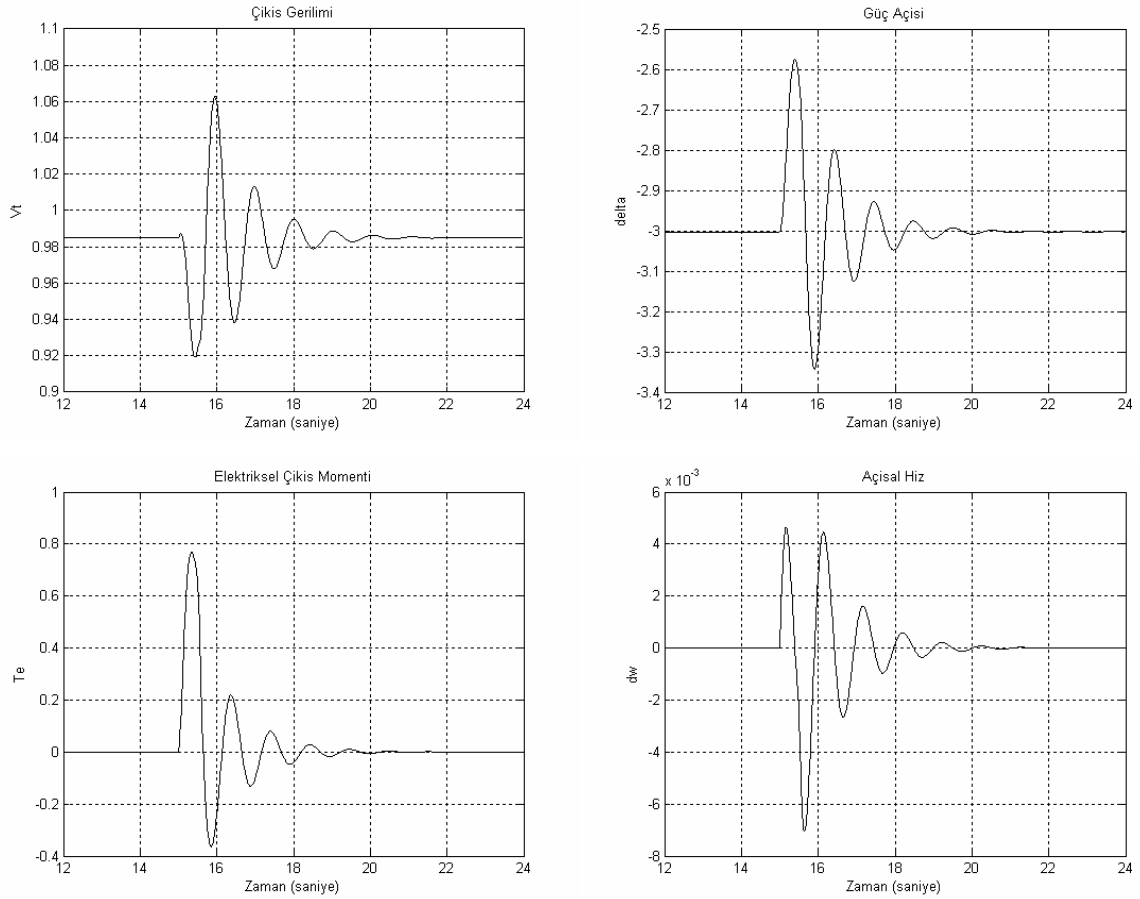
PID kontrolör çıkışında CPSS çıkışında da kullanılan sınırlayıcı aynen kullanılmıştır. Sınır değerleri ise aynı şekilde $\pm V_{pss}=0.25$ olarak alınmıştır. PID kontrolörün katsayıları Ziegler Nichols ayarlama yönteminin kapalı çevrim tipine göre tüm çalışma durumlarına göre ayrı ayarlanmıştır. Bu ayarlanan parametre kümelerinin tüm çalışma durumları için gösterdikleri performanslara bakılarak içlerinden en iyisi seçilmiştir. Bu nedenle PID kontrolörün katsayıları ayarlanırken sistemin 3 nolu yükleme koşulu değerleri kullanılmıştır (Çizelge 5.3).

PID ilave kontrolörlü bu sistemde bozucu etki yeri, zamanı ve şiddeti için de yine önceki bölümdeki değerler kullanılmıştır. Gözlenen çıkış parametrelerine ait 12 s 'lik (12-24 s aralığındaki) simülasyon sonuçları şekil 5.30 'da verilmiştir. Bu simülasyonlarda sistemin 4 nolu çalışma durumuna ait parametreler kullanılmıştır.



Şekil 5.30 “4” nolu çalışma durumu için PID ilave edilmiş sisteme ait simülasyon sonuçları

4 nolu çalışma durumunda ise şekil 5.30 'da görüldüğü gibi sabit genlikli osilasyon yaptığı bozucu etki ile de bu osilasyonun genliğinin arttığı görülmüş ve kritik kararlı bir durum sergilemiştir. Bu nedenle önceki kontrolörün simülasyon sonuçları 4 nolu çalışma durumu için verildiği halde burada 3 nolu çalışma durumuna göre ayarlanmış PID kontrolörlü simülasyon sonuçları da verilmiştir (Şekil 5.31).



Şekil 5.31 “3” nolu çalışma durumu için PID ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları

Şekillerde görüldüğü gibi PID kontrolör her çalışma durumuna göre başarılı sonuçlar verememektedir.

Sisteme ilave edilen PID kontrolörün tüm çalışma durumlarına göre performansını değerlendirebilmek için IAE performans değerlendirme kriterine göre elde edilen sonuçlar çizelge 5.8 'de verilmiştir.

Çizelge 5.8 PID kontrolör içeren sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri

Çalışma Durumları	IAE Performans İndeksi			
	ΔV_t	$\Delta \delta$	ΔT_e	$\Delta \omega$
1	12.247	73.69	65.956	0.77172
2	7.857	42.34	56.763	0.61206
3	9.146	45.74	61.471	0.68062
4	79.667	428.35	309.580	5.90480

IAE sonuçlarına göre PID 'li sistemin 2 ve 3 nolu çalışma durumlarında 1 nolu çalışma durumuna göre yüksek bir performans, 4 nolu çalışmada ise kötü bir performans gösterdiği ve kararlılık derecesinin çok düşük olduğu gözlenmiştir.

5.6 Fuzzy Sistemlerinin Çeşitleri

“Eğer-O halde” kuralları ile ilgili olan çıkarım işlemlerine bağlı olarak, bulanık çıkarım sistemleri genel olarak üç sınıfa ayrılabilir. Bunlar, Mamdani, Sugeno ve Tsukamoto sistemidir.

Bunlardan Mamdani sistemi en yaygın olarak kullanılır. Oysaki Sugeno sistemi daha kompakt ve hesaplama açısından daha verimlidir. Böylece zaman alıcı ve matematiksel olarak zor olan durulama işlemini gerektirmez. Bu nedenle bulanık modellemeye dayanan örnek data için en popüler adaydır ve uyarlanabilir tekniğin kullanımına olanak tanır. Sugeno sisteminde her bir kuralın çıkışı, giriş değişkenlerinin önceden belirlenmiş fonksiyonu olarak tanımlanır (Yılmaz vd., 2002).

5.7 Mamdani Tipi Fuzzy Sistemi

Mamdani tipi bulanık model çok kolay oluşturulur, insan davranışlarına çok uygundur. Bu nedenle çok yaygın bir kullanıma sahiptir ve diğer bulanık mantık modellerin temelini oluşturur. İlk defa bir buhar motorunun insan tecrübelerinden elde edilen sözel kontrol kuralları yardımıyla kontrolü amacıyla Mamdani ve Assilian tarafından 1975 yılında kullanılmıştır. Bu modelde hem giriş değişkenleri hem de çıkış değişkeni kapalı formdaki üyelik fonksiyonları ile ifade edilir (Yılmaz ve Arslan, 2005).

Mamdani tipi bir bulanık model aşağıdaki gibi 5 adımda oluşturulur (Yılmaz ve Arslan, 2005);

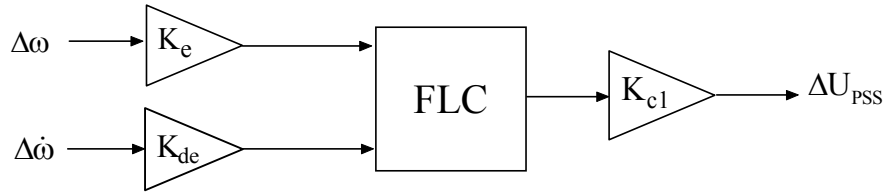
- Girişlerin bulanıklaştırılması: öncül kısımdaki bütün bulanık ifadeleri kullanarak giriş değişkenlerine ait 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerinin belirlenmesi.
- Bulanık mantık işlemlerini kullanarak kural ağırlıklarının belirlenmesi
- Bulanık küme mantıksal işlemcilerin (ve, veya) uygulanması
- Sonuçların toplanması: her bir kuralın çıkışını temsil eden bulanık kümelerin birleştirilmesi
- Durulaştırma: tek bir sayıya dönüştürülmüş toplam bulanık küme sonuçlarının durulaştırılması

Mamdani tipi bulanık modelin avantajlarını aşağıdaki gibi özetlenebilir (Yılmaz ve Arslan, 2005);

- Modelin oluşturulması basittir
- Diğer bulanık mantık modellemenin temelini oluşturur
- İnsan davranış ve duyularına uygundur.

5.8 Uygulamada Kullanılan Mamdani Tipi FLC (FPSS)' nin Tasarımı

Burada FPSS 'in amacı CPSS gibi davranarak sisteme ilave edilecek yardımcı kontrol işaretini üretmektir. FPSS 'in giriş değişkenleri olarak generatör hız değişimi ' $\Delta\omega$ ' ve bu değer'in türevi ' $\Delta\dot{\omega}$ ' kullanılmıştır. FPSS 'in çıkış değişkeni ise ΔU_{PSS} şeklinde isimlendirilmiştir. Kullanılan fuzzy yapısı mamdani tipidir. Fuzzy kontrolörler üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerine göre ölçekleme katsayılarıyla normalize edilmiş giriş ve çıkış değerlerini kullanırlar (Şekil 5.32).



Şekil 5.32 Fuzzy kontrolör (FPSS) ün giriş ve çıkış değişkenlerine ait ölçekleme katsayıları

Ancak yapılan çalışmada normalizasyon işlemi, giriş ve çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonlarının sınır değerleri üzerinden yapılmıştır. Bu sınır değerleri, CPSS 'li sistemin simülasyon modeli üzerinde yapılan hesaplamalarla elde edilmiştir (Çizelge 5.9).

Çizelge 5.9 CPSS simülasyonundan Fuzzy üyelik fonksiyonları sınır değerlerinin tahmini

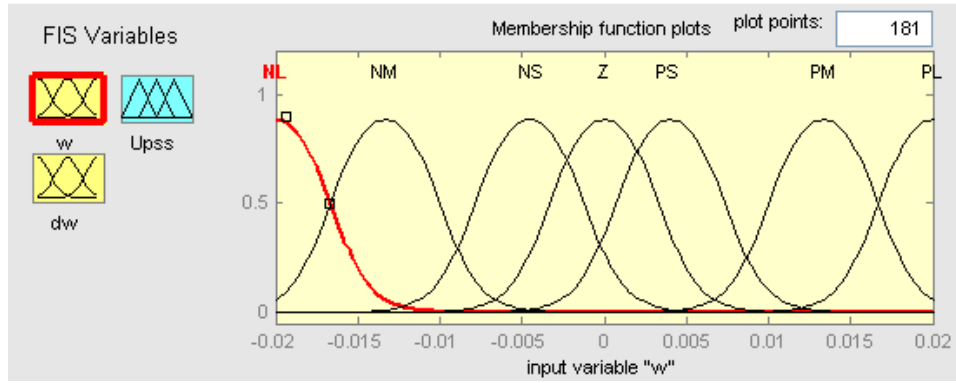
Çalışma Durumları	w değişimi (min-max noktaları)	dw değişimi (min-max noktaları)	CPSS çıkışı değişimi (min-max noktaları)
1	± 0.006	$\pm 6.10^{-4}$	± 0.15
2	± 0.005	$\pm 5.10^{-3}$	± 0.1
3	± 0.005	$\pm 5.10^{-4}$	± 0.1
4	± 0.01	$\pm 1.10^{-3}$	± 0.2
Seçilen Sınır Değerleri	± 0.02	$\pm 3.10^{-3}$	± 0.2

Kullanılan sistemin simülasyonu ve çizelge 5.9 'da belirtilen 4 farklı çalışma durumuna ait bilgiler daha sonra uygulama bölümünde izah edilecektir. Giriş ve çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerinin seçiminden sonra ise '1' olarak alınmış olan ölçekleme katsayıları üzerinde deneme yanılma yöntemiyle ayarlama yapılarak performansın en üst noktada olması sağlanmıştır. Yapılan bu ayarlama sonrasında elde edilen ölçekleme katsayılarının simülasyonda kullanılan değerleri de Çizelge 5.10 'da görüldüğü gibi belirlenmiştir.

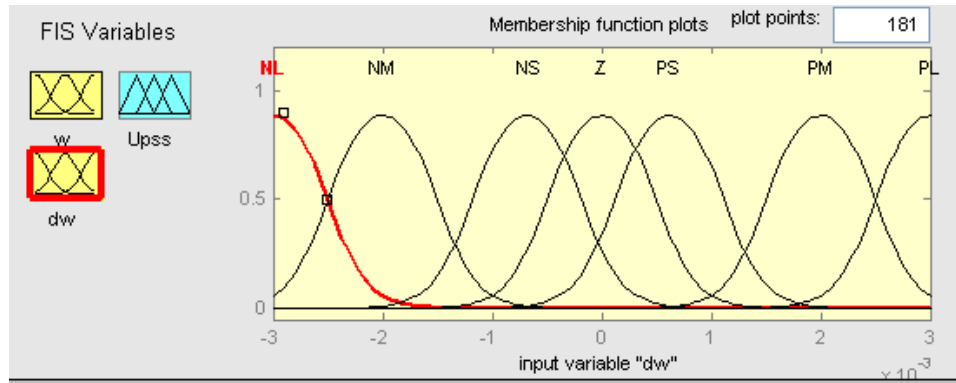
Çizelge 5.10 Fuzzy PSS için kullanılan ölçekleme katsayıları

Seçilen Ölçekleme Katsayıları		
Ke	Kde	Kc1
1	0.8	5

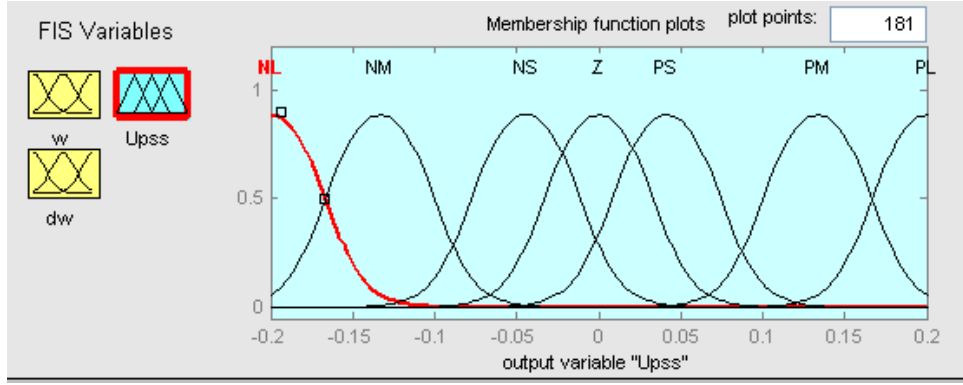
İki giriş ve bir çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonlarında 7 adet dilsel değişken kullanılmış ve bu değişkenlere ait üyelik fonksiyonları şekil 5.33, 5.34 ve 5.35 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.33 'w' giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonu



Şekil 5.34 'dw' giriş değişkenine ait üyelik fonksiyonu



Şekil 5.35 ‘U_{PSS}’ çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonu

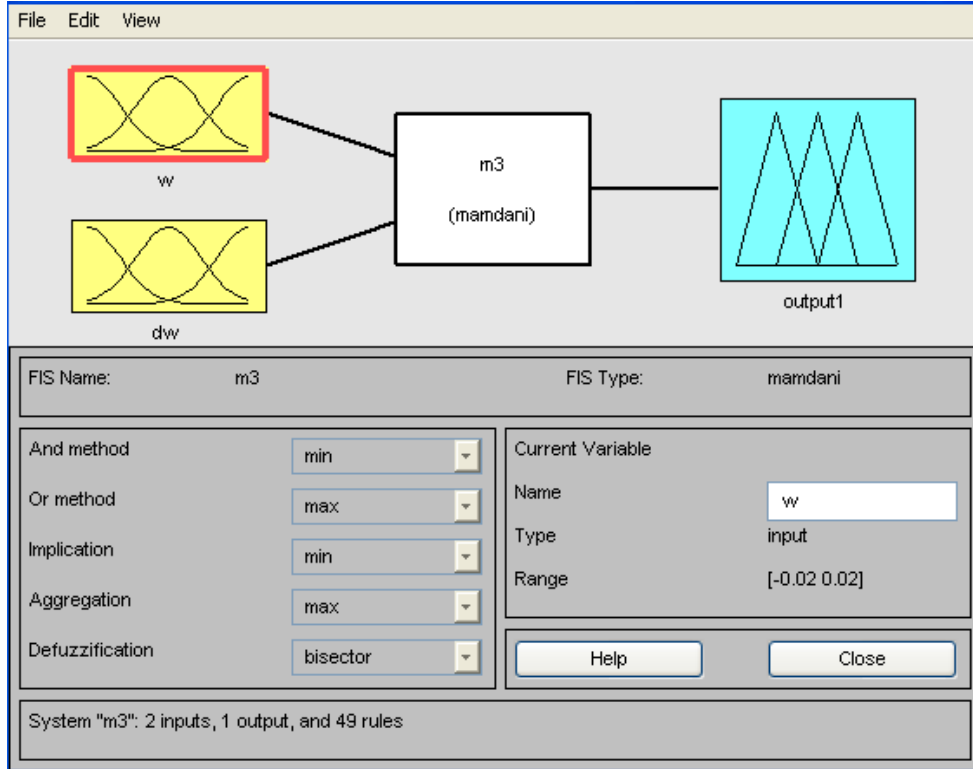
Tüm üyelik fonksiyonları için 2 sigmoid eğrisinin çarpımı şeklindeki eğriler kullanılmıştır. Sigmoid eğrisinin matematiksel ifadesi (5.3)’de, iki sigmoidin çarpımı ile elde edilen eğrinin matematiksel ifadesi de (5.4)’de verilmiştir. Bu denklemlerde eğri a ve c parametrelerine bağlı olan x vektörü ile tanımlanmıştır. Üyelik fonksiyonu olarak bu eğrilerin kullanılmasının nedeni güç sisteminin yüksek derecede nonlinear özelliğe sahip olmasından dolayıdır.

$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (5.3)$$

$$f_1(x; a_1, c_1) * f_2(x; a_2, c_2) \quad (5.4)$$

Üyelik fonksiyonları 7 adet fuzzy kümesinden oluşmaktadır. Bu kümelerin üyelik fonksiyonunun sınır değerleri aralığındaki yerleşimi, fuzzy kontrolör performansının başarısını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kümelerin yerleşimi üyelik fonksiyonlarının ait olduğu giriş veya çıkış değişkenlerinin durumuna bağlıdır. Yapılan uygulamalarda üyelik fonksiyonlarını oluşturan fuzzy kümelerin yerleşimi merkezde sık ve sınırlara doğru daha seyrek olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5.33, 5.34 ve 5.35). Böylece kontrolör performansının önemli ölçüde arttığı görülmüştür.

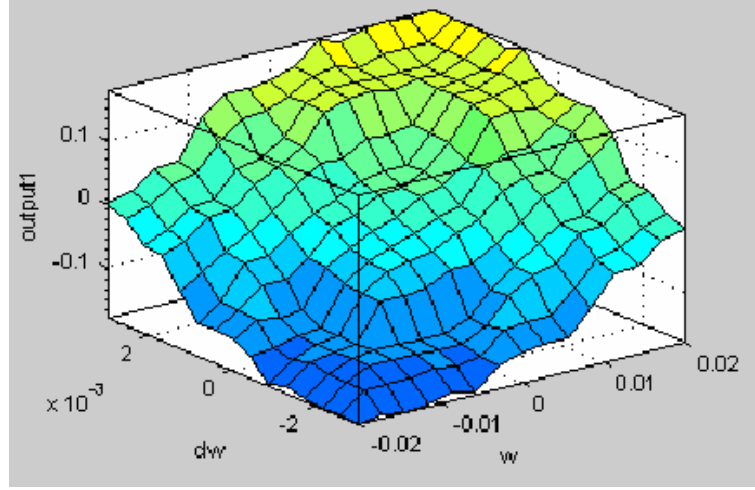
Bulanıklaştırma kısmında ‘and’ ve ‘or’ metodları için sırasıyla min ve max operatörleri kullanılmıştır. Ayrıca implication (anlamli kılma) kuralı için min ve aggregation (birleştirme) kuralı için de max operatörleri kullanılmıştır. Durulaştırma bölümü için bisector (açıortayların kesişimi) metodu seçilmiştir. FPSS tasarımı için kullanılan kurallar şekil 5.36 ‘da toplu halde görülmektedir. FPSS ‘in fuzzy kural tabanını özetleyen kural tablosu çizelge 5.11 ‘de kontrol yüzeyi ise şekil 5.37 ‘de gösterilmiştir.



Şekil 5.36 FPSS yapısı ve tasarımıda kullanılan kurallar

Çizelge 5.11 FPSS 'e ait kural tablosu

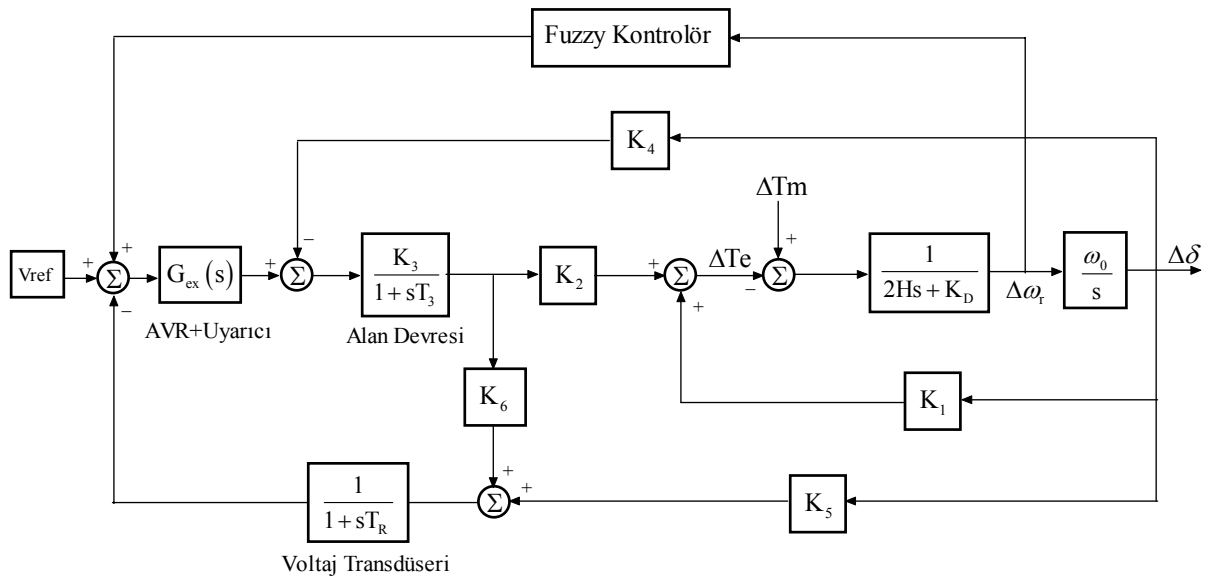
		W						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
dw	NL	NL	NL	NL	NM	NM	NS	Z
	NM	NL	NM	NM	NM	NS	Z	PS
	NS	NL	NM	NS	NS	Z	PS	PM
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PL
	PM	NS	Z	PS	PM	PM	PM	PL
	PL	Z	PS	PM	PM	PL	PL	PL



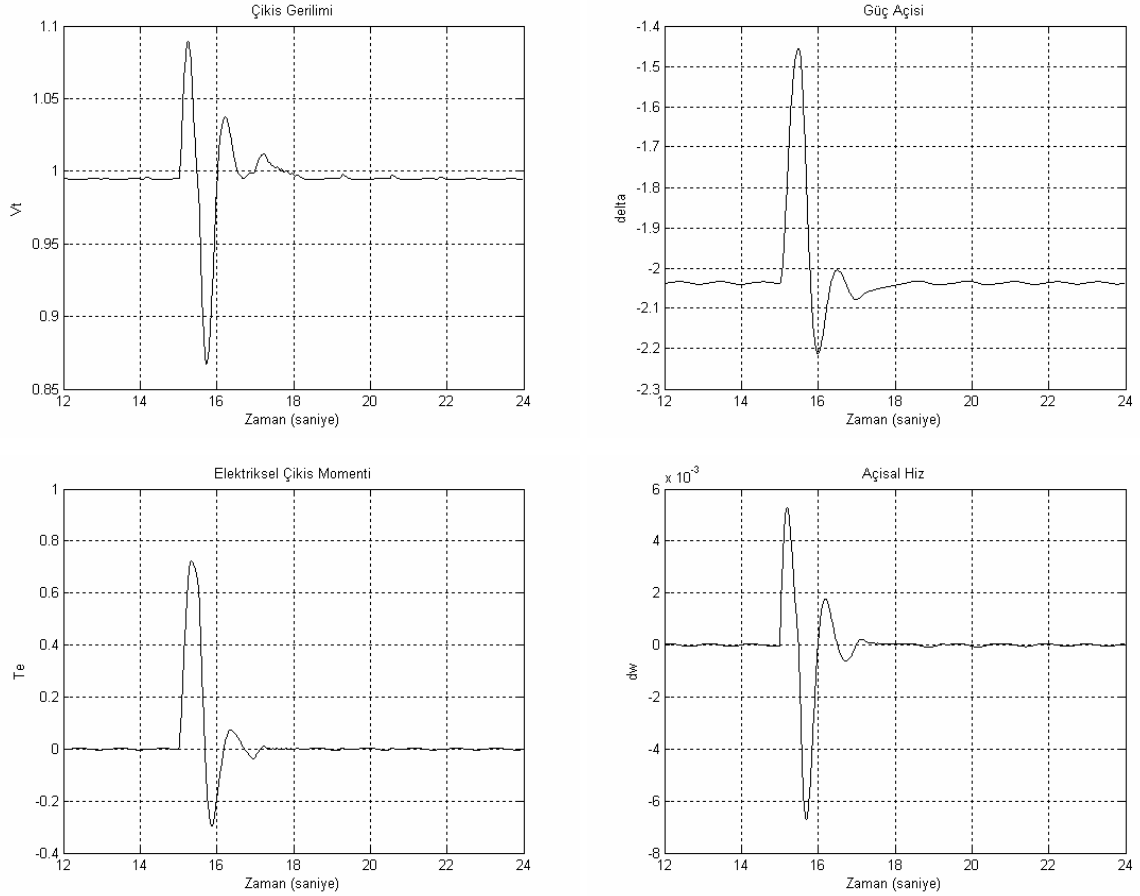
Şekil 5.37 FPSS 'e ait kontrol yüzeyi

5.9 SMIB Modeli Üzerinde Fuzzy Kontrolörün İlave Kontrolör Olarak Kullanılması

SMIB sisteminde CPSS yerine klasik Fuzzy kontrolör konularak elde edilen sistem modeli şekil 5.38 ve 5.39 'da görülmektedir. Fuzzy kontrolör çıkışında CPSS çıkışında kullanılan sınırlayıcı kullanılmamıştır. Çünkü fuzzy algoritmasındaki çıkış üyelik fonksiyonlarının mevcut sınır değerleri ile bu sınırlayıcı işlevi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.38 Fuzzy kontrolör ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli



Şekil 5.40 “4” nolu çalışma durumu için fuzzy kontrolör ilave edilmiş sisteme ait simülasyon sonuçları

Sisteme ilave edilen Fuzzy kontrolörün tüm çalışma durumlarında gösterdiği IAE performans değerleri çizelge 5.12 ’de verilmiştir.

Çizelge 5.12 Fuzzy kontrolör içeren sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri

Çalışma Durumları	IAE Performans İndeksi			
	ΔV_t	$\Delta \delta$	ΔT_e	$\Delta \omega$
1	3.8112	19.563	34.313	0.17466
2	2.3451	14.029	37.069	0.17163
3	1.9941	12.643	37.952	0.17917
4	9.2278	36.935	44.942	0.45993

Bu sonuçlara göre Fuzzy kontrolörlü sistem tüm çalışma durumlarında oldukça iyi bir performans göstermesine karşın, en iyi performansı 3 nolu çalışma durumu için göstermiştir.

6. ÖNERİLEN KONTROL SİSTEMİNİN UYGULAMASI

6.1 Sugeno (TSK) Tipi Fuzzy Sistemi

Sugeno ya da Takagi – Sugeno tipi fuzzy sistemi ilk olarak 1988 yılında Takagi, Sugeno ve Kang tarafından önerilmiştir (Jang ve Sun, 1995). Mamdani bulanık mantık yönteminin bir uyarlamasıdır. Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması ve bulanık mantık işlemleri Mamdani tipi ile tamamen aynıdır. Ancak çıkış üyelik fonksiyonlarında farklılık bulunmaktadır. Sugeno tipi bulanık modellemede çıkış üyelik fonksiyonları sabit veya lineer olarak iki şekilde olur. Çıkış üyelik fonksiyonları sabit ise, sıfıncı derece Sugeno, lineer (birinci derece doğru denklemi şeklinde) ise birinci derece Sugeno bulanık model olarak adlandırılır. Sugeno tipi bulanık model, Mamdani tipi bulanık modelden daha karmaşıktır. Fakat uyarlanabilir tekniklerle birlikte kullanılmaya daha uygundur.

Birinci (sıfıncı) derece Sugeno bulanık modeli (6.1) ifadesiyle tanımlanabilir.

$$\text{Eğer } x = A \text{ ve } y = B \text{ ise } z = f(x, y) = px + qy + r(c) \quad (6.1)$$

Burada A ve B, x ve y üyelik fonksiyonları için tanımlanmış öncül kısımdaki bulanık kümeler, p, q ve r (r) ise sonuç kısmındaki parametrelerdir. Böylece her bir kural için bir çıkış değeri elde edilir (Yılmaz ve Arslan, 2005).

Sugeno tipi bulanık modelin avantajları aşağıda sıralanmıştır;

- Hesaplama için çok uygundur.
- Lineer olmayan sistemlerin kontrol edilmesi için lineer teknikler kullanılabilir.
- Optimizasyon ve uyarlanabilir tekniklerle birlikte iyi çalışır ve çıkış parametrelerini optimize ederek sonuçları iyileştirir.
- Çıkış uzayında sürekliliği garantiler.
- Matematiksel analiz için uygundur.

Sugeno tipi bulanık modelin dezavantajları ise aşağıdaki gibidir.

- Yüksek derecedeki Sugeno bulanık modelleme kullanıldığında oldukça kompleks bir yapıya sahip olur.
- Giriş ve alt küme sayılarının artması verilerin eğitilmesini zorlaştırır, sonuçların elde edilmesi için belirlenmesi gereken sonuç parametrelerinin sayısı artar.
- İnsan sezgilerine çok uygun değildir

6.2 Uyarlanabilir Ağ Yapısına Dayalı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) Mimarisi

Esasen ANFIS yapısı, Sugeno tipi bulanık sistemlerin, sinirsel öğrenme kabiliyetine sahip bir ağ yapısı olarak temsilinden ibarettir. Bu ağ, her biri belli bir fonksiyonu gerçekleştirmek üzere, katmanlar halinde yerleştirilmiş düğümlerin birleşiminden oluşmuştur (Özçalık ve Uygur, 2003). İlk olarak Jang (1993) tarafından önerilmiştir (Chen ve Zhang, 2005). İsminden de anlaşılacağı gibi, ANFIS, istenilen performansa ulaşabilmek için bulanık mantık ile uyarlanabilir sinir ağlarını birleştiren bir sistemdir. Bu sistem bir öğrenme adaptasyonu gerçekleştirmek için uyarlamalı sistem çerçevesi içerisine yerleştirilmiş Sugeno tipi fuzzy sistemidir. Böyle bir çerçeve, fuzzy sistemleri daha sistematik ve uzman bilgiye daha az ihtiyaç gösteren duruma getirir (Yılmaz vd., 2002).

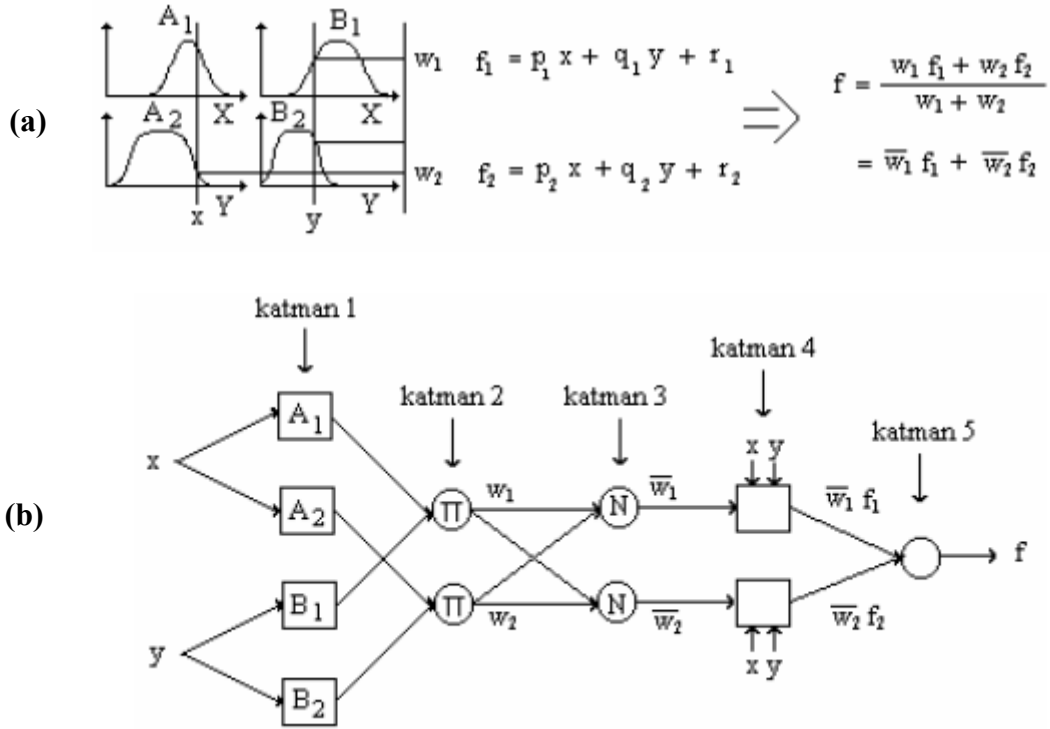
Uyarlamalı sinir ağı, doğrusal bağlarla bağlanan çok sayıda düğümden oluşan ağ yapısıdır. Her bir düğüm sabit ve ayarlanabilir parametreler kullanılarak bir düğüm fonksiyonu ile karakterize edilir. Sinir ağlarının öğrenme ve eğitime fazı, eğitim datasını yeterince tespit edecek şekilde parametreleri belirleme işleminden oluşur. Temel öğrenme kuralı, hatayı minimize etmeyi amaçlayan geriye yayma yöntemidir. Bu yöntemde genellikle ağ çıkışı ve istenen çıkışlar arasında kareler farkının toplamına dayanan hata minimize edilmeye çalışılır. Aynı zamanda, aşırı-eğitime (aşırı-öğrenme) istenmez ve genellikle kaçınılır. Çünkü aşırı öğrenme, yapının aşırı bir şekilde eğitim datasına uyarlanması nedeniyle ağın tahmin kapasitesini azaltabilir. Genel olarak, model performansı ayrık test datası ile kontrol edilir (Yılmaz vd., 2002).

Basit olması açısından, bulanık çıkarım sistemini, x ve y gibi iki girişi ve z gibi bir çıkışı olduğunu farz ederek ele alalım. İki tane bulanık kuralı bulunan, birinci dereceden sugeno tipi fuzzy sistemi için tipik kural kümesi;

Kural-1: Eğer x , A_1 ise ve y B_1 ise ***O Halde*** $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

Kural-2: Eğer x , A_2 ise ve y B_2 ise ***O Halde*** $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

şeklinde ifade edilir. Buradaki p , q ve r eğitim esnasında belirlenecek dizayn parametreleridir. Sugeno bulanık modeli için bulanık akıl yürütme mekanizması Şekil 6.1a 'da gösterilmiştir. Bu iki kurala uygun 5 tabakadan oluşan ileri sürümlü, eşdeğer ANFIS mimarisi (Tip-3) de şekil 6.1b 'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 (a) Birinci dereceden iki girişli ve iki kurallı “Sugeno Bulanık Modeli” (Tip-3) ; (b) Eşdeğer ANFIS yapısı (Tip-3) (Jang, 1996).

Tip-1 ve Tip-2 ANFIS mimarileri de bulunmaktadır (Jang, 1993). Burada yalnızca Tip-3 mimarisi üzerinde durulacaktır. Yapıdaki yuvarlak şekil sabit düğüm noktalarını, kare şekli ise uyarlanabilir düğüm noktalarını göstermektedir. Yani kare şeklindeki düğümlerde parametreler uyarlama veya eğitim esnasında değişmektedir (Yılmaz vd., 2002). Söz konusu bu ANFIS mimarisi için aynı katmanda bulunan düğümler, aşağıda da gösterildiği üzere aynı düğüm fonksiyonlarına sahiptirler (Darus vd., 2004). Bu tabakalardaki düğümlerin işlevleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Jang ve Sun, 1995). Burada L katmanındaki i düğümünün çıkışı $O_{L,i}$ şeklinde belirtilmiştir.

Katman-1: Bu katmandaki tüm düğümler uyarlanabilir. Her bir i düğüm noktasının çıkışı bulanık üyelik fonksiyonu girişinin üyelik derecesidir. Bu düğümlerin çıkışları (6.2) ifadesindeki gibi tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x), & i &= 1,2, & \text{yada} \\ O_{1,i} &= \mu_{B_{i-2}}(y), & i &= 3,4, & \text{için} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Burada i düğümüne ait girişler x ve y, düğüm fonksiyonu ile ilişkili bulanık kümeler (küçük, büyük, vs.) ise A_i ve B_{i-2} olarak gösterilmiştir. Başka bir deyişle $O_{1,i}$ verilen x girişinin A_i bulanık kümesine olan üyelik derecesidir.

üyelik fonksiyonları için uygun bir biçimde parametrelendirilmiş herhangi bir üyelik fonksiyonu olabildiği gibi genellikle çan eğrisi (6.3) veya gauss fonksiyonu (6.4) şeklinde seçilir. Üyelik dereceleri olan $\mu_{A_i}(x)$ ve $\mu_{B_i}(y)$, $[0,1]$ arasında değerler alır.

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}} \quad (6.3)$$

$$\mu_{A_i}(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right] \quad (6.4)$$

(6.3) 'deki $\{ a_i, b_i, c_i \}$ ve (6.4) 'deki $\{ a_i, c_i \}$ parametre kümeleridir. Bu parametrelerin değerleri değişirken çan eğrisinin şekli de değişir. Böylece üyelik fonksiyonlarını oluşturan kümelerin şekilleri değişmektedir. Bu katmanın parametreleri, *öncül parametreler* olarak isimlendirilir (Özçalık ve Uygur, 2003).

Katman-2: Bu katmandaki her bir düğüm, kendisine gelen sinyallerin çarpımını çıkış olarak üreten, 'Π' ile etiketlenmiş sabit bir düğümdür. Her bir düğümün çıkışı, kuralın etkinlik derecesini belirtir (Özçalık ve Uygur, 2003).

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2. \quad (6.5)$$

Katman-3: Bu katmanda yer alan her bir düğüm, N ile etiketlenmiş, sabit bir düğümdür. Katmandaki i düğümü, i kuralının etkinlik derecesinin, bütün kuralların etkinlik dereceleri toplamına oranını hesaplar. Bu katmanda yer alan düğümlerin çıkışları, hesaplanışlarına uygun olarak, normalize edilmiş etkinlik dereceleri olarak adlandırılırlar (Özçalık ve Uygur, 2003).

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad (6.6)$$

Katman-4: Bu katmana ait her i düğümü, düğüm fonksiyonu ifadesi (6.7) 'deki gibi olan uyarlanabilir bir düğümdür.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1, 2. \quad (6.7)$$

Burada \bar{w}_i , katman 3'ün çıkışıdır. $\{p_i, q_i, r_i\}$ ise bu katmanda bulunan düğümlerin parametre kümesidir. Bu katmanın parametreleri, *sonuç parametreleri* olarak isimlendirilir.

Katman-5: Yuvarlak şekilli düğümlere sahip son katman basit bir toplayıcı olduğundan 'Σ'

ile etiketlenmiştir. Bu katmanda toplam çıkışı hesaplamak üzere, kendisine gelen sinyallerin tümünü toplayan, sabit, tek bir düğüm yer alır.

$$O_{5,1} = \text{toplam çıkış} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (6.8)$$

Yukarıda açıklanan ANFIS yapısında iki adet uyarlanabilir katman (birinci ve dördüncü katman) vardır. Birinci katman giriş üyelik fonksiyonuyla (çan eğrisi) ilişkili olan üç değişken parametreye (öncül parametreler), dördüncü katman ise birinci derece polinomuyla ilişkili olan üç değişken parametreye (sonuç parametreleri) sahiptir.

Bu yapı için eğitime ve öğrenme algoritmasının görevi ANFIS çıkışını eğitim datasına uydurmak için tüm değişken parametreleri ayarlamaktır. Eğer bu parametreler sabitse, ağıın çıkışı şöyle olur.

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \\ &= \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \\ &= \bar{w}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \bar{w}_2 (p_2 x + q_2 y + r_2) \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$f = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \quad (6.10)$$

(6.10) eşitliği tüm çıkışların sonuç parametrelerinin lineer bir kombinasyonu olduğunu ifade etmektedir. Bu nedenle p_i , q_i ve r_i parametrelerinin optimum değerleri, eğitim düşümü “gradient descent” ve en küçük kareler yönteminin birleşimiyle kolayca belirlenebilir. Bununla beraber, eğer üyelik fonksiyonları sabit değilse ve değişmelerine izin veriliyorsa, araştırma bölgesi büyük olur ve eğitim algoritmasının yakınsaması daha yavaş olur. Böyle bir durumda en küçük kareler yöntemini eğitim düşümü yöntemiyle birleştiren hibrid algoritma eğitimde daha etkili olmaktadır (Yılmaz vd., 2002).

Böylece, tamamıyla Sugeno bulanık modelinin işleyişine sahip, uyarlanabilir bir ağ yapısı inşa edilmiş olur (Özçalık ve Uygur, 2003).

ANFIS ağına ait parametrelerin güncellenmesinde, iki aşamalı bir öğrenme algoritması olan, hibrid öğrenme algoritması kullanılmıştır.

6.2.1 ANFIS Ağında Kullanılan Hibrid Öğrenme Algoritması

Hibrid öğrenme algoritmasında, ANFIS ağ yapısına ait toplam parametre kümesi; $S = S1 + S2$ şeklinde ifade edilecek olursa, $S1$ öncül parametrelere, $S2$ de sonuç parametrelerine karşılık gelir. Hibrid algoritma ilk aşamada ise (ileri yön geçiş aşaması “forward pass”) ise ANFIS

ağına ait sonuç parametreleri, ikinci aşamada ise (geri yön geçiş aşaması “backward pass”) ise ağın öncül parametreleri güncellenir.

6.2.1.1 İleri Yön Geçiş Aşamasında Sonuç Parametrelerin Güncellenmesi

Hibrid öğrenme algoritmasının ileri yön geçişini oluşturan ve en küçük kareler tahmini (LSE) yöntemi kullanılmak suretiyle gerçekleştirilen kısmında, ağın girişindeki üyelik fonksiyonlarına ait parametreler (S1 ile belirtilen öncül parametreler) sabit tutulur. Böylece ağın çıkışı, S2 parametre kümesi içinde bulunan sonuç parametrelerinin lineer bir kombinasyonu haline gelir. Modellenecek sisteme ait P tane giriş-çıkış verisi (eğitim datası) ile S1 giriş parametrelerinin verilen değerleri kullanılarak, ağın çıkışı, matrisel formda,

$$A\theta = B \quad (6.11)$$

şeklinde ifade edilebilir (Özçalık ve Uygur, 2003). (6.11) eşitliğinde yer alan “ θ ” vektörü, elemanları S2 ’nin parametreleri olan “bilinmeyen vektör” dür. Bu denklem, standart lineer en küçük kareler problemini tanımlar. Ve buna göre “ θ ” için en iyi çözüm, $\|A\theta - B\|^2$ ’nin minimum değeridir. Bu minimum değer ise (6.12) ifadesiyle verilen LSE yöntemiyle bulunan ‘ θ^* ’ değeridir.

$$\theta^* = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (6.12)$$

(6.12) ifadesinde A^T , A matrisinin transpozudur. Eğer $A^T \cdot A$ singüler değilse (determinantı sıfır olan bir kare matris değilse), $(A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T$ ifadesi, A matrisinin pseudo-inversidir. Bunun yerine, yinelemeli LSE formülü de kullanılabilir.

Bilinmeyen “ θ ” Vektörünün Yinelemeli LSE ile Hesabı

Özel olarak (6.11) ifadesindeki A matrisinin i_{nci} satırı “ a_i^T ” ifadesi ile, B matrisinin i_{nci} elemanı “ b_i^T ” ifadesi ile gösterilsin. Bu durumda θ vektörü, iteratif olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Özçalık ve Uygur, 2003).

$$\begin{aligned} \theta_{i+1} &= \theta_i + S_{i+1} \cdot a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T \cdot \theta_i) \\ S_{i+1} &= S_i - \frac{S_i \cdot a_{i+1} \cdot a_{i+1}^T \cdot S_i}{1 + a_{i+1}^T \cdot S_i \cdot a_{i+1}} \quad , \quad i = 0, 1, \dots, P-1 \end{aligned} \quad (6.13)$$

Burada yinelemeli LSE yöntemiyle elde edilen θ^* değeri θ_p ’ye eşittir. (6.13) ifadesinde ihtiyaç duyulan başlangıç şartları $\theta_0 = 0$ ve $S_0 = \gamma \cdot I$ dir. Burada “ γ ”, pozitif büyük bir sayı,

“I” ise MxM boyutunda bir birim matristir.

6.2.1.2 Geri Yön Geçiş Aşamasında Öncül Parametrelerin Güncellenmesi

Hibrid öğrenme algoritmasının geri yön geçişinde, S2 çıkış parametreleri sabit tutulur ve ağıın çıkışındaki hata sinyali geriye doğru yayılarak, eğim düşümü yöntemiyle öncül parametreler güncellenir. Geri yön geçişinde giriş parametreleri için güncelleme formülü aşağıdaki gibidir;

$$\Delta\alpha = -\eta \frac{\partial E}{\partial \alpha} \quad (6.14)$$

Burada α herhangi bir giriş parametresini, η öğrenme oranını, E ise ağıın çıkışındaki hata değerini göstermektedir (Özçalık ve Uygur, 2003).

6.3 Önerilen Yöntem (Hiyerarşik Fuzzy Kontrol Yöntemi)

Fuzzy kontrol teorisi nonlinear sistemlere uyumlu bir kontrol yöntemidir. Bu nedenle güç sistemlerinin dinamik kararlılığını arttırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır. Fuzzy kontrol yönteminin daha etkin kullanılabilmesi ve geliştirilebilmesi için bugüne kadar birçok çalışma yapılmıştır. Fuzzy kontrol sisteminde toplam kural sayısının ve buna bağlı olarak hesaplamaların nasıl azaltılacağı problemi de bu çalışmalardan birisidir (Lee vd., 2003).

Geleneksel fuzzy sistemlerinde kural sayısı kontrolör giriş değişkenleri sayısı ile üstel olarak artar. Bu üstel ilişki (6.15) ifadesiyle verilmiştir.

$$m^n \quad (6.15)$$

Burada m; her fuzzy giriş değişkeni için tanımlanan üyelik fonksiyonundaki küme sayısı, n ise kontrolör giriş değişkeni sayısıdır.

Giriş sayısı ve parametre sayısı arasındaki bu üstel ilişki *kural patlama olayı* “rule explosion phenomenon” olarak isimlendirilmiştir. Buna göre çok sayıda girişe sahip olmayan bir sistemde bile oldukça fazla sayıda ayarlanması gereken parametre bulunmaktadır. Özellikle ikiden fazla sayıda girişe sahip kontrol sistemlerinde oluşan bu kural patlama probleminin üstesinden gelebilmek için farklı bir fuzzy yapısına ihtiyaç duyulmuştur (Emara ve Elshafei, 2004).

Yukarıda bahsedilen problemin giderilmesi için gerekli kontrol ihtiyacından dolayı, (Raju vd., 1991) tarafından hiyerarşik yapıya sahip bir fuzzy kontrolörün kullanılması önerilmiştir. Bundan sonra da araştırmacılar tarafından bu kontrol yönteminin geliştirilmesi ve farklı alanlara uygulanması konusunda çalışmalar yapılmaya başlamıştır. Aşağıda bunlara örnekler verilecektir.

Hiyerarşik fuzzy kontrolün fikir babası olan Raju ve Zhou (1993) tarafından yapılan çalışmada, kontrolör parametreleri sistem parametre değişimine göre ayarlanarak hiyerarşik fuzzy sistemi uyarlanabilir hale getirilmiştir. Kontrolör buhar generatörünün su akış kontrol probleminde uygulanmış ve simulasyon yapılarak performansı test edilmiştir.

Gegov ve Frank (1995) tarafından yapılan çalışmada, çok değişkenli sistem kontrolü için hiyerarşik fuzzy kontrolü önerilmiş ve bir şehir trafik ağı davranışının simulasyonu için kullanılmıştır. Kontrol aşamasında hesaplanan fuzzy ilişkilerinin sayısı önemli oranda düşmüştür. Bu çalışma ile fazla sayıda kontrol parametresi içeren büyük ölçekli sistemler ile fuzzy kontrol teorisi arasındaki boşluk doldurulmuştur.

Hiyerarşik fuzzy yöntemi için benzer bir yaklaşım, TSK (Takagi-Sugeno-Kang) tipi fuzzy sistemi kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca hiyerarşik fuzzy kontrolün teorik olarak evrenselliği ispatlanmış ve diğer birçok kontrol uygulaması için de kullanılabilir bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Hiyerarşik fuzzy kontrolü için giriş değişkenlerinin sayısı ile toplam kural sayısı arasındaki ilişki (6.16) ifadesiyle verilmiştir (Wang 1998, 1999).

$$(n-1)m^2 \quad (6.16)$$

Buradaki m ve n değişkenleri (6.15) 'deki ifadeyle aynıdır.

Örnek olarak, 3 giriş değişkeni ve her değişkende 7 fuzzy kümesi bulunan bir sistemi düşünelim. Bu sistem klasik fuzzy ile kontrol edilirse, kural sayısı (6.15) ifadesine göre $m^n=7^3=343$ olur. Bu sistemin kontrolü için hiyerarşik fuzzy yapısı kullanılırsa kural sayısı bu defa $(n-1)m^2=(3-1)7^2=98$ olmaktadır. (6.16) ifadesinden hiyerarşik yapıda giriş değişkeni sayısı arttıkça, kural sayısı bakımından etkinliğin artacağı sonucunu çıkarabiliriz.

Ancak iki adet fuzzy altsistem içeren hiyerarşik fuzzy yapısında her fuzzy altsistem için farklı bir kural tablosu bulunmaktadır. Mesela 3 girişli hiyerarşik yapının içerdiği iki fuzzy altsistem için 2 adet kural tablosu bulunmaktadır. Bazen bu fuzzy altsistemlerde giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonlarının içerdiği küme sayıları aynı olmayabilir. Bu durumda her fuzzy alt sistem için kural sayısı ayrı ayrı hesaplanarak toplanır.

3 girişli fuzzy örneği için hiyerarşik yapının içerdiği birinci fuzzy altsistemde her iki giriş değişkeninin üyelik fonksiyonlarındaki küme sayıları 'k₁' ikinci fuzzy altsistemde ise 'k₂' olsun. Hiyerarşik fuzzy yapısının içerdiği fuzzy altsistemlerin tümü 2 adet girişe sahiptir. Bu durumda iki tane klasik 2 girişli fuzzy altsistemin toplam kural sayısı (6.16) ifadesinden yararlanarak ayrı ayrı iki fuzzy altsistem kural sayısının toplamı şeklinde yazılabilir.

$$k_1^2 + k_2^2 \quad (6.17)$$

Fuzzy altsistemlerde giriş ve çıkış değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonlarının içerdiği küme sayıları aynı olmadığı durumda klasik fuzzy kontrolörlerdeki kural sayısı hesabını gösteren (6.15) denklemini de farklılık gösterecektir. (6.15) ifadesine göre n giriş değişkenine sahip klasik fuzzy kontrolörde toplam kural sayısı n tane m (üyelik fonksiyonlarındaki küme sayısı) 'in yan yana yazılarak çarpımı şeklindeydi. Şimdi bu üç giriş değişkeninin üyelik fonksiyonlarındaki küme sayılarının m_1, m_2, m_3 şeklinde farklı olduğunu düşünelim. Böylece (6.15) ifadesi de (6.18) 'deki gibi yazılabilir.

$$m_1 * m_2 * m_3 \quad (6.18)$$

n girişli sistem için (6.17) ve (6.18) ifadelerini genelleştirirsek (6.17) yerine (6.19) ve (6.18) yerine de (6.20) ifadeleri yazılabilir.

$$k_1^2 + k_2^2 \dots + k_n^2 \quad (6.19)$$

$$m_1 * m_2 * m_3 \dots * m^n \quad (6.20)$$

Bunlara da örnek vermek gerekirse üyelik fonksiyonlarındaki küme sayıları 7,7,5,3 olan 4 girişli bir fuzzy kontrolörde klasik fuzzy yapısı kullanılırsa $7 \times 7 \times 5 \times 3 = 735$ olan kural sayısı hiyerarşik fuzzy yapısı kullanıldığında ise $(7 \times 7) + (5 \times 5) + (3 \times 3) = 83$ kurala sahip olunacağı söylenebilir. Yalnız burada ikinci fuzzy altsistemde her iki giriş için 5'er bulanık küme üçüncü fuzzy altsistemde ise her iki giriş için 3'er bulanık küme kullanıldığı farzedilmiştir. Yani $k_1=7, k_2=5$ ve $k_3=3$ olarak alınmıştır.

Joo ve Lee (2002) tarafından yapılan çalışmada önerilen hiyerarşik fuzzy kontrol yöntemi, top ve terazi sistemi problemine uygulanmış ve çok daha az olan kural sayısına karşın iyi bir sonuç elde edilmiştir. Ayrıca önerilen kontrol yöntemi klasik hiyerarşik fuzzy kontrolörden daha farklı dizayn edilerek ikinci katmandaki fiziksel anlamı olmayan sinyallerle kural oluşturma problemini de ortadan kaldırmıştır. Fuzzy altsistemlerin hepsinin girişinde fiziksel anlamı olan gerçek değişkenler kullanılmıştır.

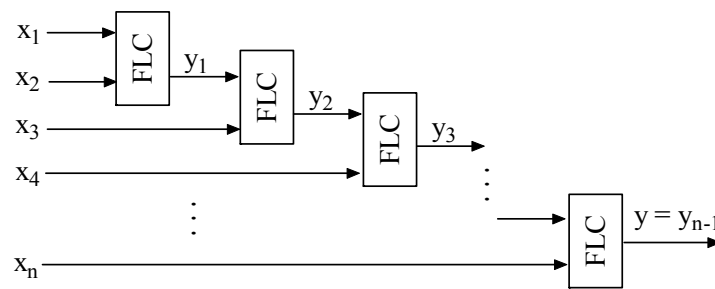
Lee vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada ise hiyerarşik fuzzy kontrol metodundaki kural sayısının azaltılması avantajına ilave olarak ölçekleme katsayılarının seçimi üzerine de çalışılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarıyla önerilen hiyerarşik fuzzy algoritmasının performansı test edilerek uygulanabilirliği kanıtlanmıştır. Dört giriş değişkeni ve beş kümeli üyelik fonksiyonu ile yapılan çalışmada kullanılan klasik fuzzy kontrolörde 625 olan kural sayısı, önerilen yöntemle 75'e düşürülmüştür.

Nürnberg (2003) tarafından yapılan çalışmada hiyerarşik yapı, sistem tanımlama için kullanılan yinelemeli neuro-fuzzy (bulanık-sinir ağı) yapısına uygulanmıştır. İki girişli ilaveten bu iki girişli fuzzy sistemin çıkışından gecikmeli olarak alınan ilave bir girişe sahip olan sistem hiyerarşik olarak bağlı iki altistemden oluşmaktadır.

Emara ve Elshafei (2004) tarafından yapılan robot kontrol uygulamasında da yine hiyerarşik fuzzy kontrol yöntemi önerilmiştir.

Hiyerarşik fuzzy kontrolör (HFK) 'ler 2 den fazla sayıda giriş değişkenine sahip olan fuzzy kontrolörlerdeki büyük kural tablosu problemini ortadan kaldırmak üzere Raju vd. (1991) tarafından önerilmiş kontrolörlerdir (Wang, 1999). Klasik fuzzy kontrolörlerdeki kural sayısının giriş değişken sayısı ile üstel artışı HFK 'ların kullanımıyla lineer artış haline getirilmiştir. Yani klasik fuzzy kontrolörlerde ' m^n ' olan kural sayısı, HFK 'larda $(n-1)m^2$ şeklinde olmaktadır. Burada ' n ' kontrolör giriş değişkeni ve ' m ' bu giriş değişkenlerine ait üyelik fonksiyonlarındaki fuzzy küme sayısını ifade etmektedir.

HFK 'lar, basit fuzzy altistemlerinden oluşan yapısıyla kural sayısını bu şekilde azaltabilmektedir. Bu altistemler birbirlerine hiyerarşik biçimde bağlanmışlardır. HFK yapısındaki tüm fuzzy altistemler yalnızca iki adet girişe sahiptir ve bir önceki fuzzy alt sistemin çıkışı, takip eden fuzzy alt sistemin iki girişinden birini oluşturmaktadır (Şekil 6.2). Yani ilk altküme dışındaki her fuzzy alt sistemde dışarıdan bir adet giriş değişkeni ilave edilmiştir olmaktadır. Seçilen bu hiyerarşik yapı sayesinde tüm sistemdeki kural sayısı giriş değişken sayısı ile üstel olarak değil, lineer olarak değişecektir.



Şekil 6.2 HFK 'nın yapısı (Wang, 1998)

x_1, x_2, \dots, x_n : kontrolör giriş değişkenleri

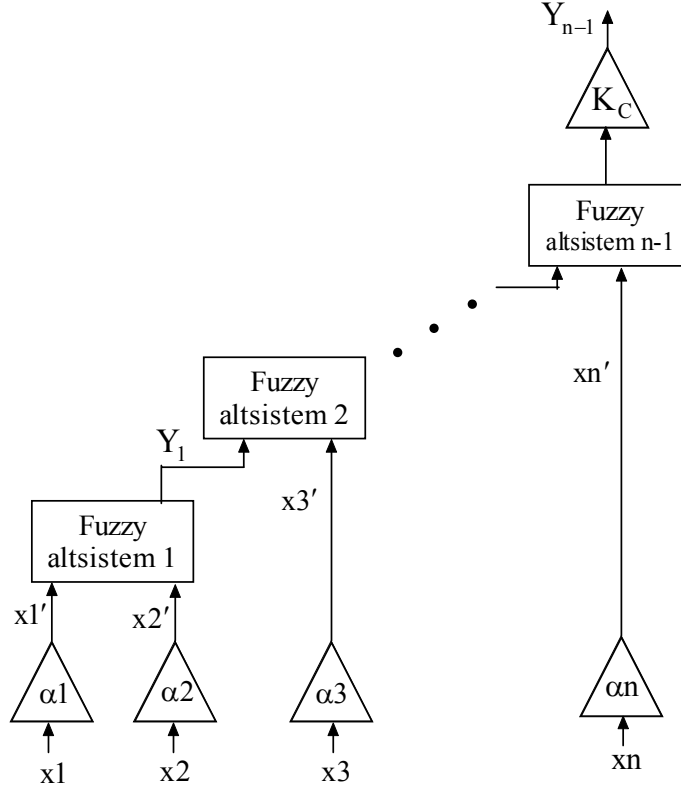
y_1, y_2, \dots, y_{n-2} : fuzzy altistemlere ait çıkış değişkenleri

$y = y_{n-1}$: kontrolör çıkış değişkeni

HFK 'ların tasarımında en önemli adım ilk fuzzy alt sisteminin çıkışı ile ikinci fuzzy alt sisteminin bağımsız giriş değişkeni arasında uygun bir kural tabanının oluşturulmasıdır.

Raju vd. (1991) tarafından önerilen hiyerarşik kontrol yapısında mamdani tipi fuzzy sistemi kullanılmıştır.

Şekil 6.3 'de n adet kontrolör girişi ' x_1, x_2, \dots, x_n ' şeklinde gösterilmiştir.

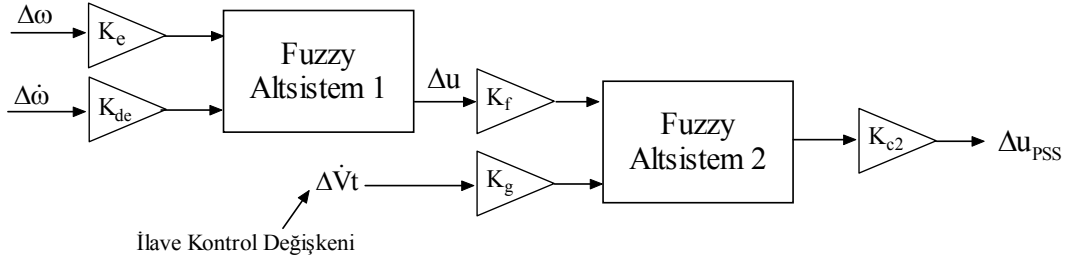


Şekil 6.3 'n-1' adet fuzzy alt sistemden oluşan "n" girişli hiyerarşik fuzzy sistemi (Emara ve Elshafei, 2004)

x_1' ve x_2' ilk fuzzy alt sistemin girişleridir. Bu alt sistem girişleri; kontrolör giriş değerleri (x_1 ve x_2) ve kazanç değerleri (α_1 ve α_2) 'nin çarpımıyla elde edilmiştir. Kazanç değerleri giriş değerlerinin bir bakıma ölçeklendirilmesini sağlamaktadır. İlk fuzzy altsistemin çıkışı ise 'Y₁' etiketi ile gösterilmiştir. Bu 'Y₁' çıkışı ikinci fuzzy alt sistemin birinci giriş değişkeni olarak kullanılır. x_3 giriş değişkeni ile α_3 kazanç değerinin çarpımıyla oluşan x_3' ise ikinci fuzzy alt sistemin ikinci giriş değişkeni olarak kullanılır. Hiyerarşik yapı bu şekilde devam ederek, en son ilave edilen giriş değişkeni de kullanıldığında son fuzzy altsistemin çıkışı K_c kazanç değeri ile yükseltilerek kontrol çıkışını oluşturur. Ayrıca burada her fuzzy altsistem çıkışı bir kazançla da çarpılırsa kontrol performansı olumlu etkilenebilir ancak ayarlanabilecek parametre sayısı artmış olur.

6.4 Uygulamada Kullanılan HFK (HFPSS) 'ün Tasarımı

PSS görevini yapacak şekilde tasarlanan HFPSS 'in yapısı şekil 6.4 'de görülmektedir.



Şekil 6.4 HFPSS ‘in giriş ve çıkış değişkenlerine ait ölçekleme katsayılarının gösterimi

HFPSS yapısında 3 adet giriş değişkeni kullanılmıştır. Bu değişkenlerin seçilmesi için öncelikle HFPSS ‘de giriş değişkeni olarak kullanılacak sistem değişkenleri saptanmıştır. Tespit edilen 9 değişken Çizelge 6.1 ‘de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Giriş değişkeni olarak kullanılacak 9 sinyal

1	dw	Hız
2	ddw	Hızın türevi
3	vt	Çıkış gerilimi
4	dvt	Çıkış geriliminin türevi
5	delta	Yük açısı
6	ddelta	Yük açısının türevi
7	Te	Elektriksel çıkış momenti
8	dTe	Elektriksel çıkış momentinin türevi
9	ddu	İlk fuzzy altsistem çıkışının türevi

Daha sonra bu değişkenlerden HFPSS‘de kullanılmak üzere 3 ‘erli kombinasyonları oluşturulmuştur. Oluşturulan kombinasyonların 17 tanesi sistem üzerinde simülasyon yapılarak performansları test edilmiştir. Seçilen bu kombinasyonların simülasyonunda her iki fuzzy altsistemde de kural tabanı olarak daha önce fuzzy kontrolörde kullanılan kural tabanı kullanılmıştır. Simülasyon sonucu elde edilen kontrol performanslarına göre HFPSS ‘için kullanılacak en iyi iki kombinasyon belirlenmiştir (Çizelge 6.2). Belirlenen bu iki kombinasyondan ise sistem çıkışında ağırlıklı olarak gerilim kontrolüne ağırlık verileceğinden dolayı hız, hızın türevi ve çıkış geriliminin türevini içeren 15 no‘lu kombinasyon HFPSS giriş değişkenleri olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.2 HFK tasarımından kullanılabilir giriş değişken kombinasyonları

S.No	Giriş Değişkenleri			Sonuç
	1	2	3	
1	1	2	3	
2	dw	ddw	vt	kötü
3	vt	dvt	dw	kötü
4	delta	ddelta	dw	iyi
5	dw	ddw	delta	kötü
6	vt	dvt	delta	kötü
7	delta	ddelta	vt	kötü
8	dw	ddw	Pe	kötü
9	Pe	dPe	dw	iyi
10	vt	dvt	Pe	orta
11	Pe	dPe	vt	kötü
12	delta	ddelta	Pe	kötü
13	Pe	dPe	delta	kötü
14	dw	ddw	ddelta	çok iyi
15	dw	ddw	dvt	çok iyi
16	delta	ddelta	ddu	kötü
17	Pe	dPe	ddu	kötü
18	vt	dvt	ddu	iyi
19	dw	ddw	ddu	iyi

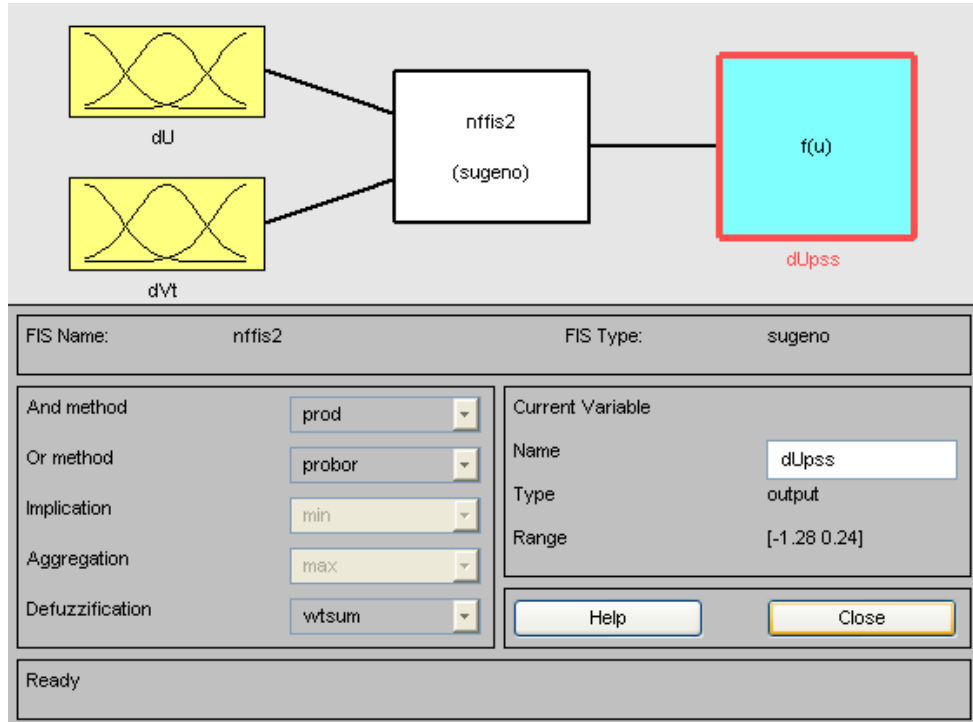
Bu şekilde seçilen HFPSS ‘giriş değişkenlerinden ikisi zaten önceki FPSS ‘te kullanılan $\Delta\omega$ ve $\Delta\dot{\omega}$ değişkenleridir. İlave olarak kullanılan üçüncü değişken ise SMIB sisteminde senkron generatörün çıkış geriliminin türevi ‘ $\Delta\dot{V}_t$ ’ dir.

Bu şekilde tasarlanan hiyerarşik yapı ile eklenen üçüncü giriş değişkeninin kural tablosunda üstel bir artış oluşturması önlenmiş olacaktır. Aynı zamanda bu değişkenin performans artırıcı etkisinden faydalanmak da amaçlanmıştır.

HFPSS 'in yapısı herbiri iki giriş ve bir çıkış değişkeni içeren iki fuzzy altsistemden oluşmaktadır. İlk fuzzy altsistemin giriş değişkenleri $\Delta\omega$ ve $\Delta\dot{\omega}$, bu altsistemin çıkışı ile ilave $\Delta\dot{V}_t$ değişkeni ise ikinci fuzzy altsistemin giriş değişkenleridir.

İlk altsistemde kural tablosu ve üyelik fonksiyonları için önceki bölümde FPSS tasarımında kullanılan yapı aynen kullanılmıştır. İlk alt sistemdeki fuzzy yapısında kullanılan tüm üyelik fonksiyonları, bunların sınır değerleri ve fuzzy kümelerinin konumları bölüm 5.8 'de anlatıldığı gibi optimum performans elde etmek üzere ayarlanmıştır.

İkinci altsistemde kullanılacak fuzzy yapısı ise giriş ve çıkış değişkenlerinin durumundan faydalanılarak tasarlanmıştır. FPSS 'in çıkış değişkeni Matlab Fuzzy Toolbox'ın Anfis özelliğiyle ikinci altsistem için gerekli olan fuzzy tasarımda kullanılmıştır. Anfis özelliğinin kullanılabilmesi için fuzzy sistemi Sugeno tipinde tasarlanmıştır. Bu şekilde kural tablosu, üyelik fonksiyonları, bunların sınır değerleri ve fuzzy kümelerin konumları otomatik olarak Matlab Fuzzy toolbox'ın Anfis özelliğiyle belirlenmiştir. Hiyerarşik Fuzzy kontrolörün ikinci fuzzy altsistem tasarımı için kullanılan kurallar şekil 6.5 'de toplu halde görülmektedir.

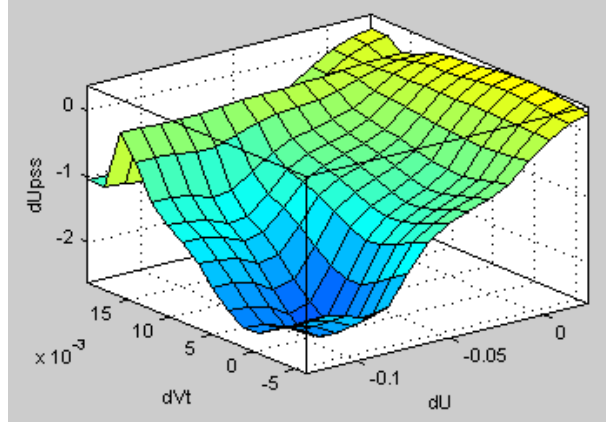


Şekil 6.5 Hiyerarşik Fuzzy kontrolörün ikinci fuzzy altsistem tasarımı için kullanılan kurallar

İkinci fuzzy altsisteme ait kural tablosu çizelge 6.3 'de, kontrol yüzeyi ise şekil 6.6 'da verilmiştir. Anfis kullanılarak elde edilen bu fuzzy yapısında her üyelik fonksiyonunda 3 fuzzy küme ve toplam 9 kural bulunmaktadır.

Çizelge 6.3 İkinci fuzzy altsisteme ait kural tablosu

		dU		
		N	Z	P
dVt	N	-1.301	-0.5248	0.1848
	Z	-1.075	-0.6036	0.2628
	P	-1.04	-0.5798	0.2179



Şekil 6.6 İkinci fuzzy altsisteme ait kontrol yüzeyi

Böylece tüm HFK 'nın kural sayısı (6.19) ifadesine göre $k_1^2 + k_2^2 = 49 + 9 = 58$ olmuştur. Bunun yerine üç girişli kontrol sistemi için klasik fuzzy kontrol sistemi kullanılmış olsaydı toplam kural sayısı (6.20) ifadesine göre $m_1 * m_2 * m_3 = 7 * 7 * 3 = 147$ olacaktı. Ve bu kuralların ayarlanması da kontrol sisteminin tasarımını oldukça zorlaştıracaktı.

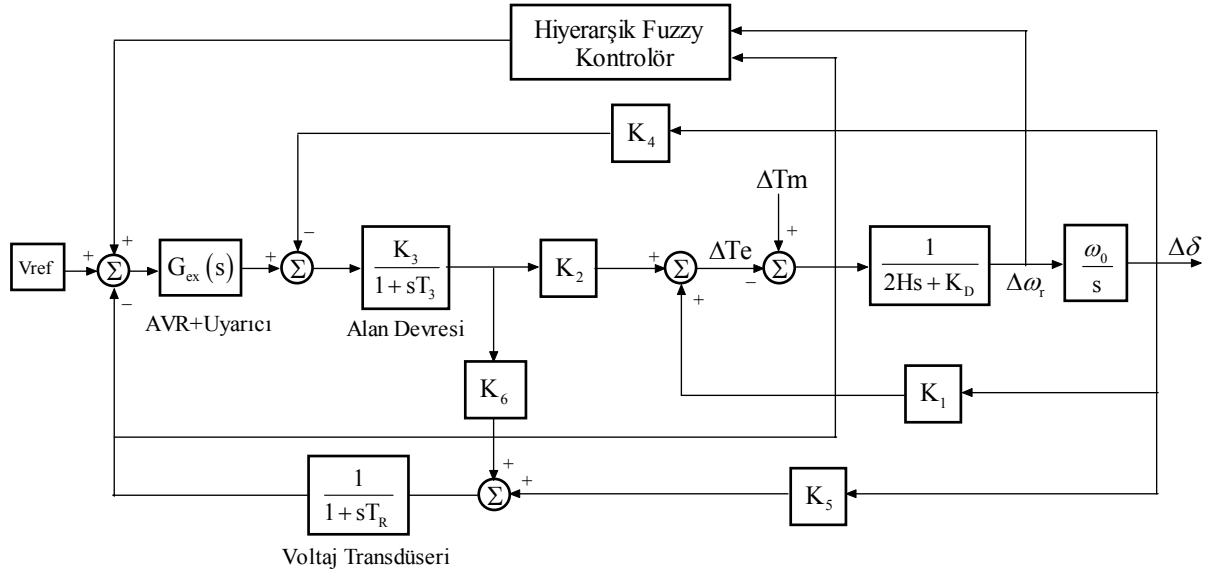
Bu tasarıma ilave olarak performansın artırılması için optimum ölçekleme katsayıları önceki fuzzy kontrolörde olduğu gibi yine deneme yanılma metodu kullanılarak çizelge 6.4 'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.

Çizelge 6.4 Hiyerarşik fuzzy yapısında kullanılan ölçekleme katsayıları

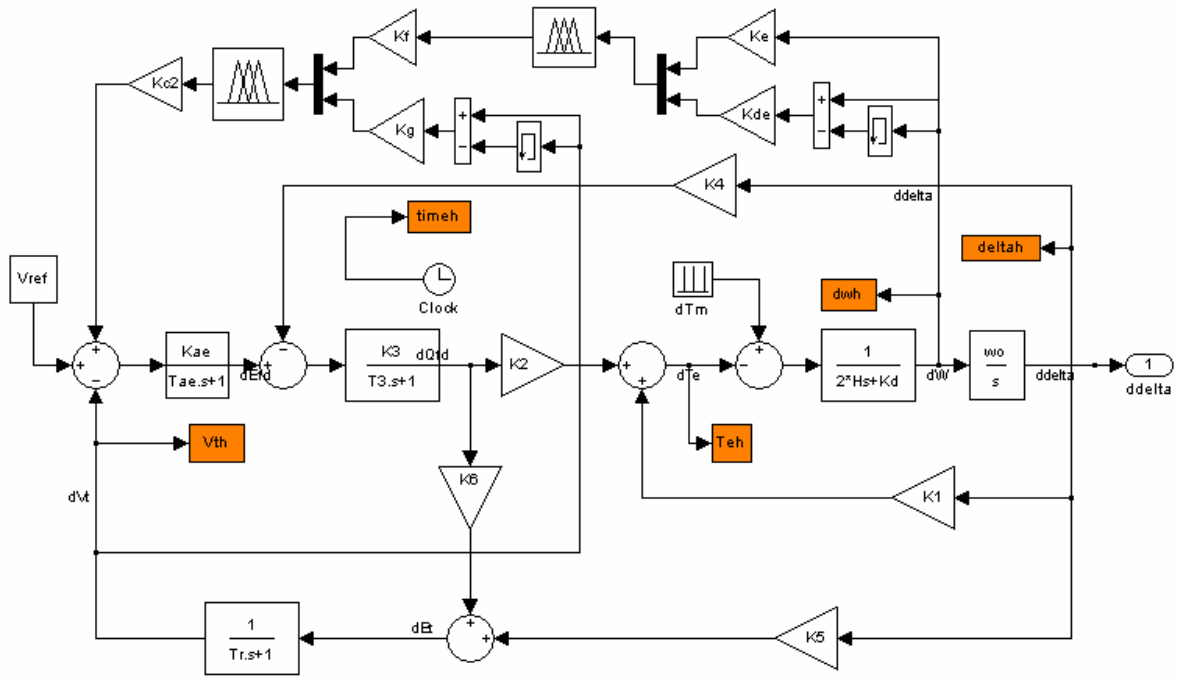
Seçilen Ölçekleme Katsayıları				
Ke	Kde	Kf	Kg	Kc2
1	0.8	0.4	0.3	2.5

6.5 SMIB Modeli Üzerinde Önerilen Hiyerarşik Fuzzy Kontrolörün İlave Kontrolör Olarak Kullanılması

SMIB sisteminde CPSS yerine klasik Hiyerarşik Fuzzy kontrolör konularak elde edilen sistem modeli şekil 6.7 ve 6.8 'de görülmektedir.



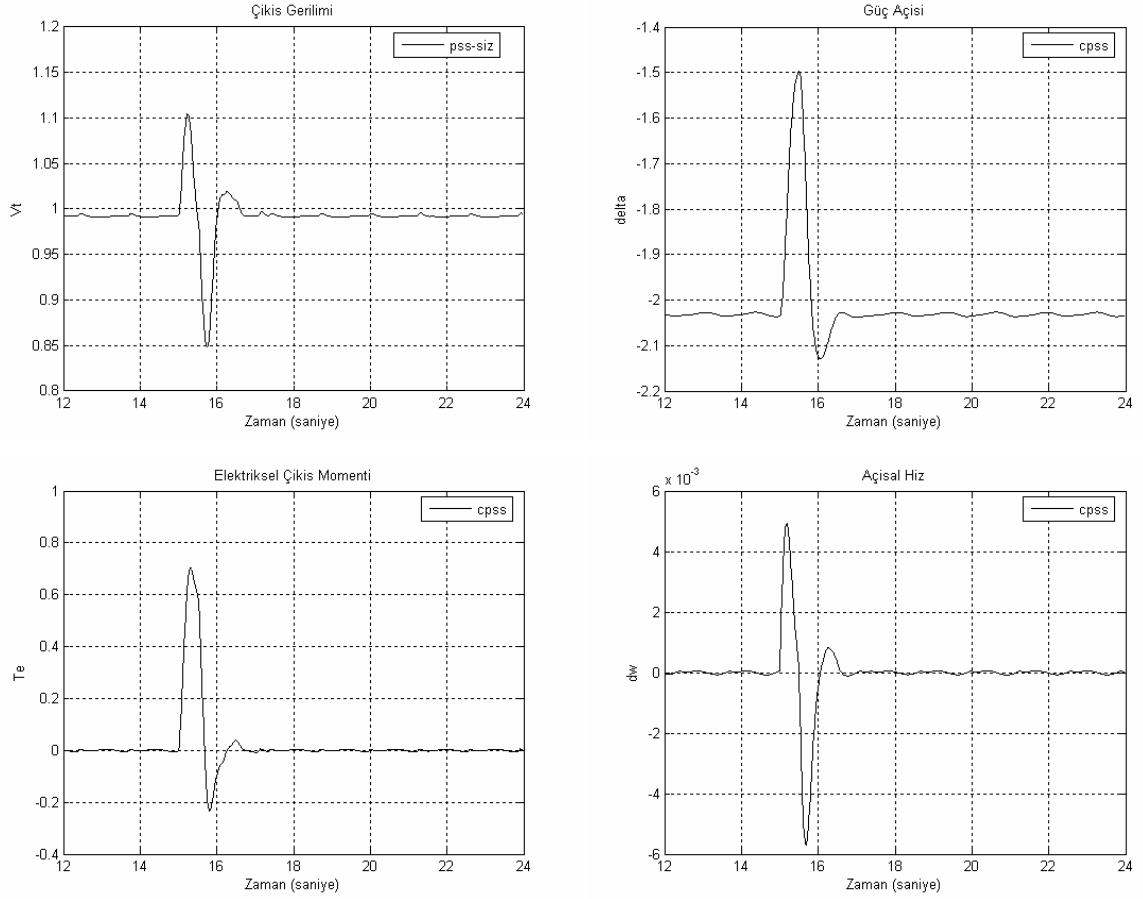
Şekil 6.7 Hiyerarşik Fuzzy kontrolör ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli



Şekil 6.8 Hiyerarşik Fuzzy kontrolör ilave edilmiş Heffron-Phillips modeli simulink gösterimi

Önceki uygulamalarda kullanılan bozucu etki yeri, zamanı ve şiddeti burada da kullanılmıştır. Gözlenen çıkış parametrelerine ait simulasyon sonuçları şekil 6.9 'da görülmektedir. Bu simulasyonda sistemin 4 nolu yükleme koşuluna ait parametreler kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre HFK reaktif yükleme şartlarını temsil eden 4 nolu çalışma durumunda bile oldukça iyi bir performans sergilemiştir. Gözlenen parametrelere ait simulasyon sonuçlarında sistem 2

saniye gibi kısa bir sürede bozucu etki nedeniyle oluşan osilasyonların sönümlenmesi sağlanarak sistem bozucu öncesi duruma gelmiştir. CPSS ve PID kontrolöre göre performansı oldukça üstündür. Klasik Fuzzy kontrolöre göre de performansın iyi olduğu gözlenmektedir.



Şekil 6.9 “4” nolu çalışma durumu için HFK ilave edilmiş sisteme ait simulasyon sonuçları

Çizelge 6.5 'de önerilen HFK 'nın çalışma durumlarının tümünde gösterdiği IAE performans değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.5 HFK içeren sistem modelinde (15-24s arası) IAE değerleri

Çalışma Durumları	IAE Performans İndeksi			
	ΔV_t	$\Delta \delta$	ΔT_e	$\Delta \omega$
1	4.8228	22.394	34.662	0.16743
2	2.0652	11.369	39.126	0.15606
3	2.0141	10.708	39.305	0.15607
4	8.9449	31.531	40.168	0.36690

HKF 'nın kullanıldığı sistem tüm çalışma durumlarında oldukça iyi bir performans göstermiştir. Bunun yanında en iyi performansın 2 ve 3 nolu çalışma durumu için sağlandığı görülmektedir.

7. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

7.1 Sonuçların Karşılaştırılması

Önceki bölümlerde SMIB sistemi üzerinde ilave kontrol yöntemi olarak kullanılan kontrolörlere ait simülasyon ve sayısal performans sonuçları verilmişti. Aynı ayrı verilen bu sonuçların toplu halde gösterilerek daha iyi karşılaştırılması sağlanmıştır.

7.1.1 Simülasyon Sonuçları

Geleneksel PSS, FPSS ve önerilen HFPSS 'in 4 nolu çalışma durumundaki gözlenen sistem parametreleri ΔV_t , $\Delta \delta$, ΔT_e ve $\Delta \omega$ için simülasyon sonuçları Şekil 7.1, 7.2, 7.3 ve 7.4 'de verilmiştir. Burada önerilen HFPSS 'in performansının genel olarak CPSS 'e göre oldukça iyi olduğu ve FPSS 'e göre de bir miktar iyi olduğu gözlenmektedir.

Daha ayrıntılı bir değerlendirme için zaman bölgesi değerlendirme kriterlerinden yerleşme (sönümleme) zamanı, en büyük aşım ve kalıcı hal hatası açısından değerlendirme yapılması gerekmektedir.

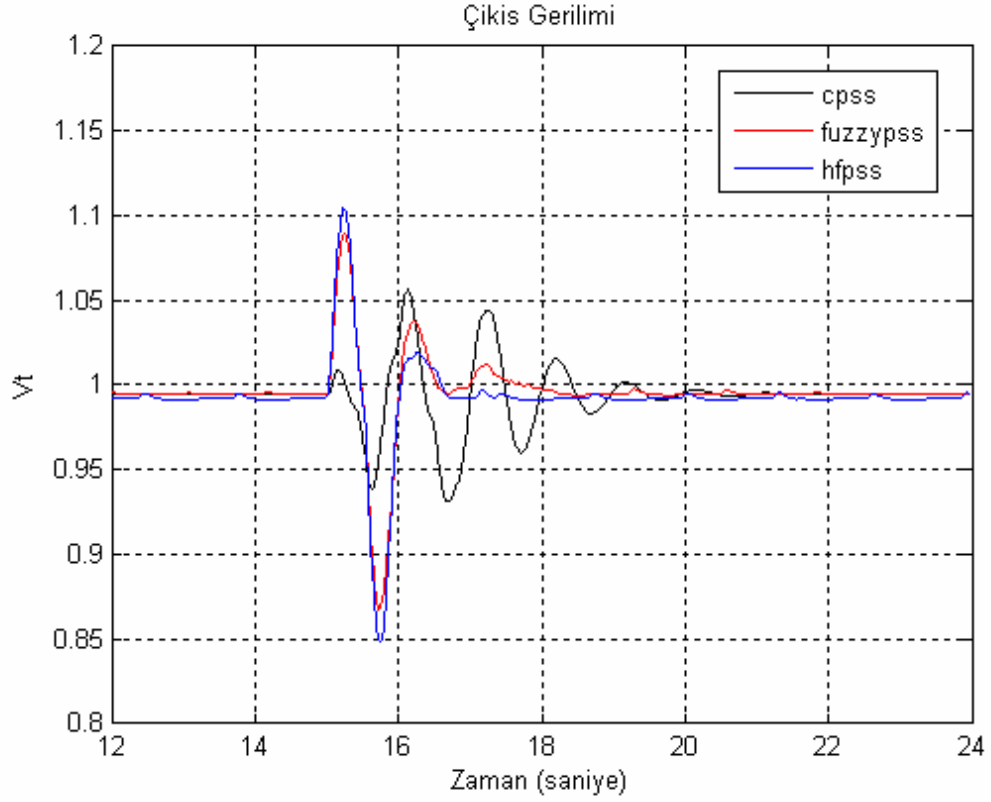
Buna göre yerleşme zamanı açısından tüm parametre simülasyonlarında önerilen kontrolörün FPSS ve CPSS 'e göre üstün olduğu görülmektedir. FPSS ise CPSS'e göre oldukça üstündür.

En büyük aşım açısından bakılırsa, HFPSS 'in çıkış gerilimi parametresinin simülasyonunda CPSS ve FPSS den daha kötü olduğu görülmüştür (Şekil 7.1). Ancak diğer parametre simülasyonlarında (Şekil 7.2, 7.3, ve 7.4) en iyi performansı yine önerilen kontrolör göstermiştir. Burada HFPSS 'in FPSS 'e göre en büyük aşım kriterini çok az bir miktar azalttığı söylenebilir.

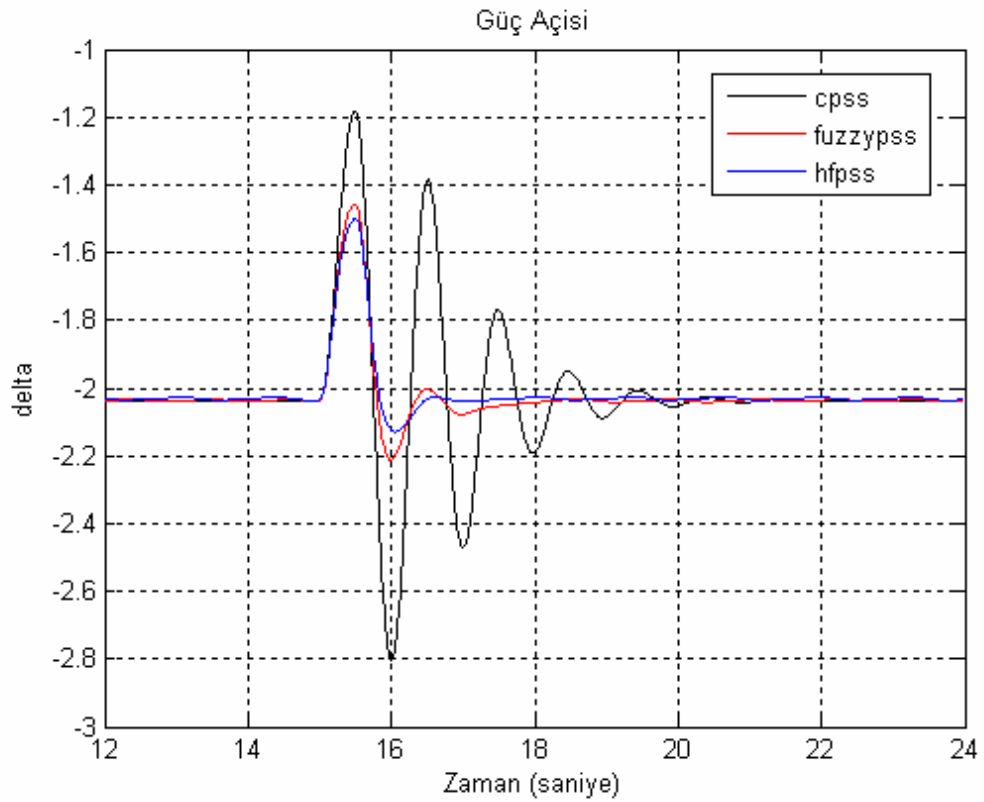
Kalıcı hal hatası açısından bakacak olursak, en iyi performansı CPSS 'in gösterdiği görülmektedir. Önerilen kontrolör ve FPSS 'in yerleşme tamamlandıktan sonra çok az bir miktar da olsa salınım yaptıkları sabit bir değere oturmakta zorlandıkları görülmüştür. Özellikle çıkış gerilimi simülasyonunda tüm kontrolörlerde kalıcı hal hatası gözlenmiştir. Burada önerilen kontrolörün CPSS ve FPSS 'den çok az bir miktar daha kötü bir performansı olduğu görülmektedir (Şekil 7.1).

7.1.2 Bozucu Etkinin Adım Fonksiyonu Şeklinde Uygulanması

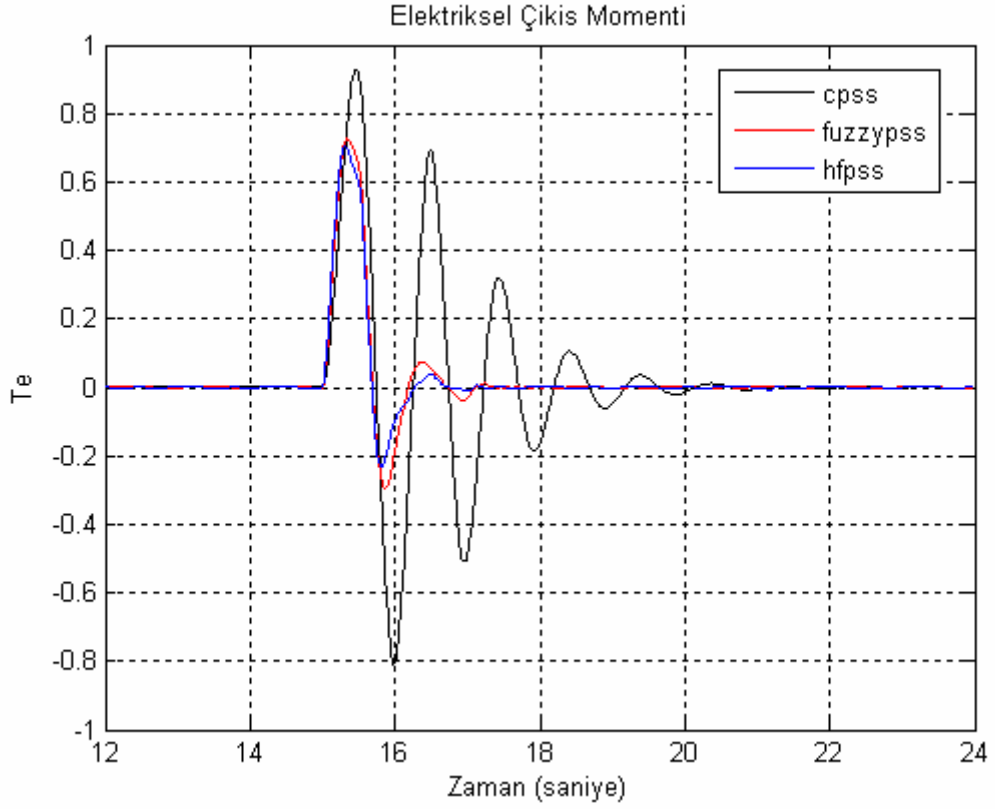
Şekil 7.5 'de bozucu etki tipi kare dalga şeklinden adım fonksiyonu şekline dönüştürülerek 4 nolu çalışma durumu için önerilen kontrol yönteminin performansı CPSS ve FPSS'li sistem performansıyla karşılaştırılmıştır.



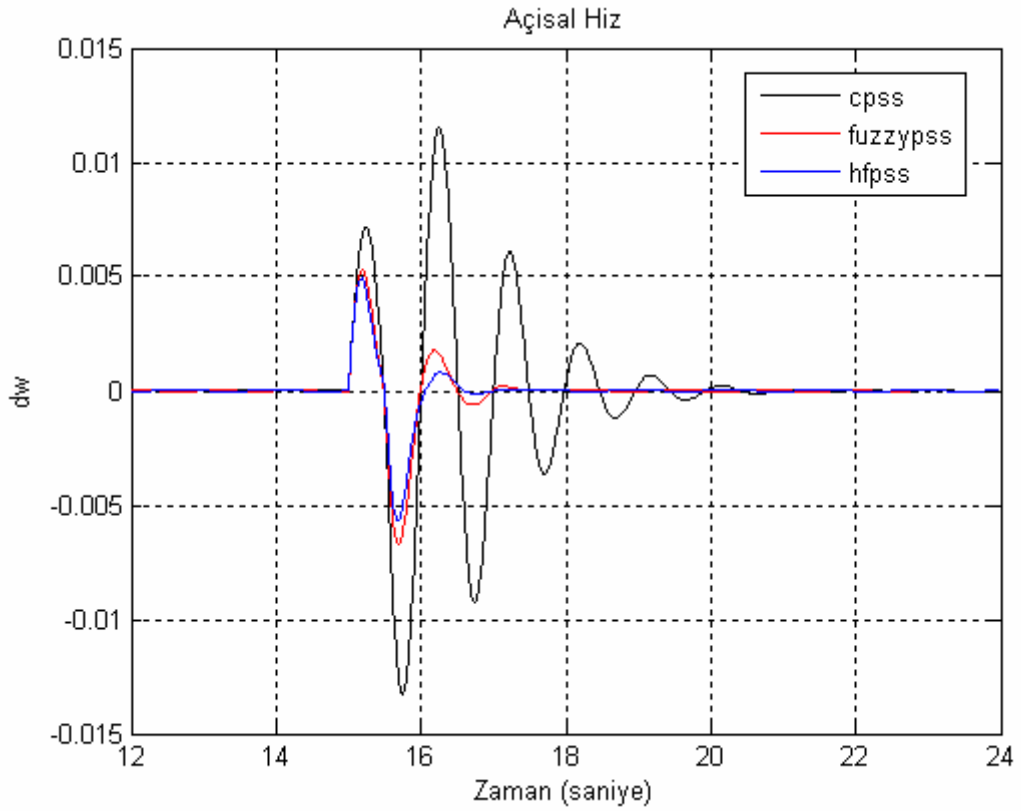
Şekil 7.1 'Vt' çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması



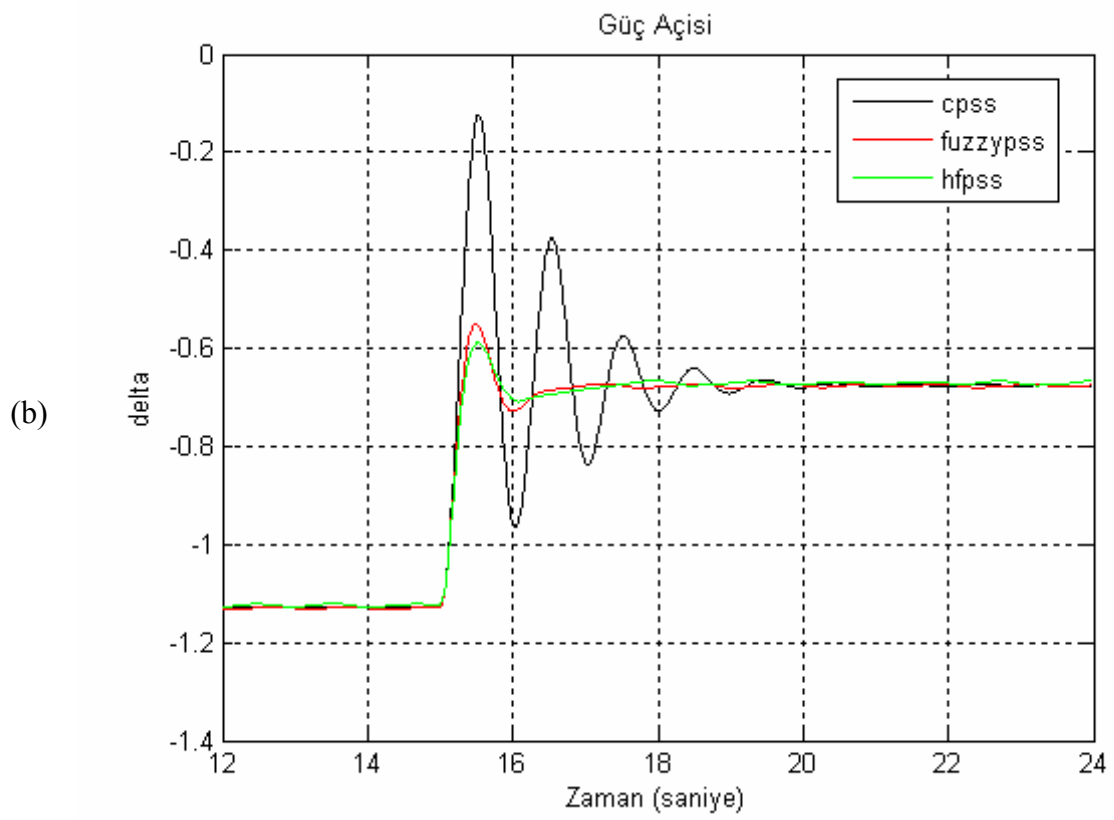
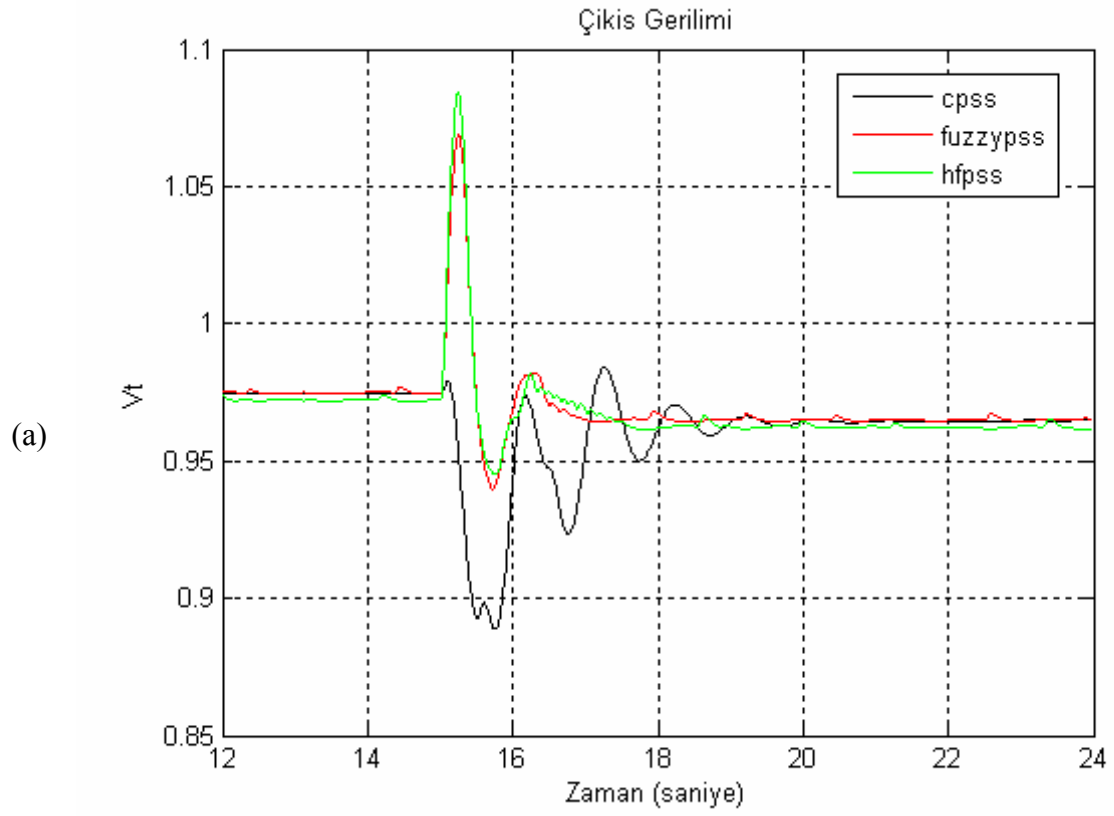
Şekil 7.2 'Delta' çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması

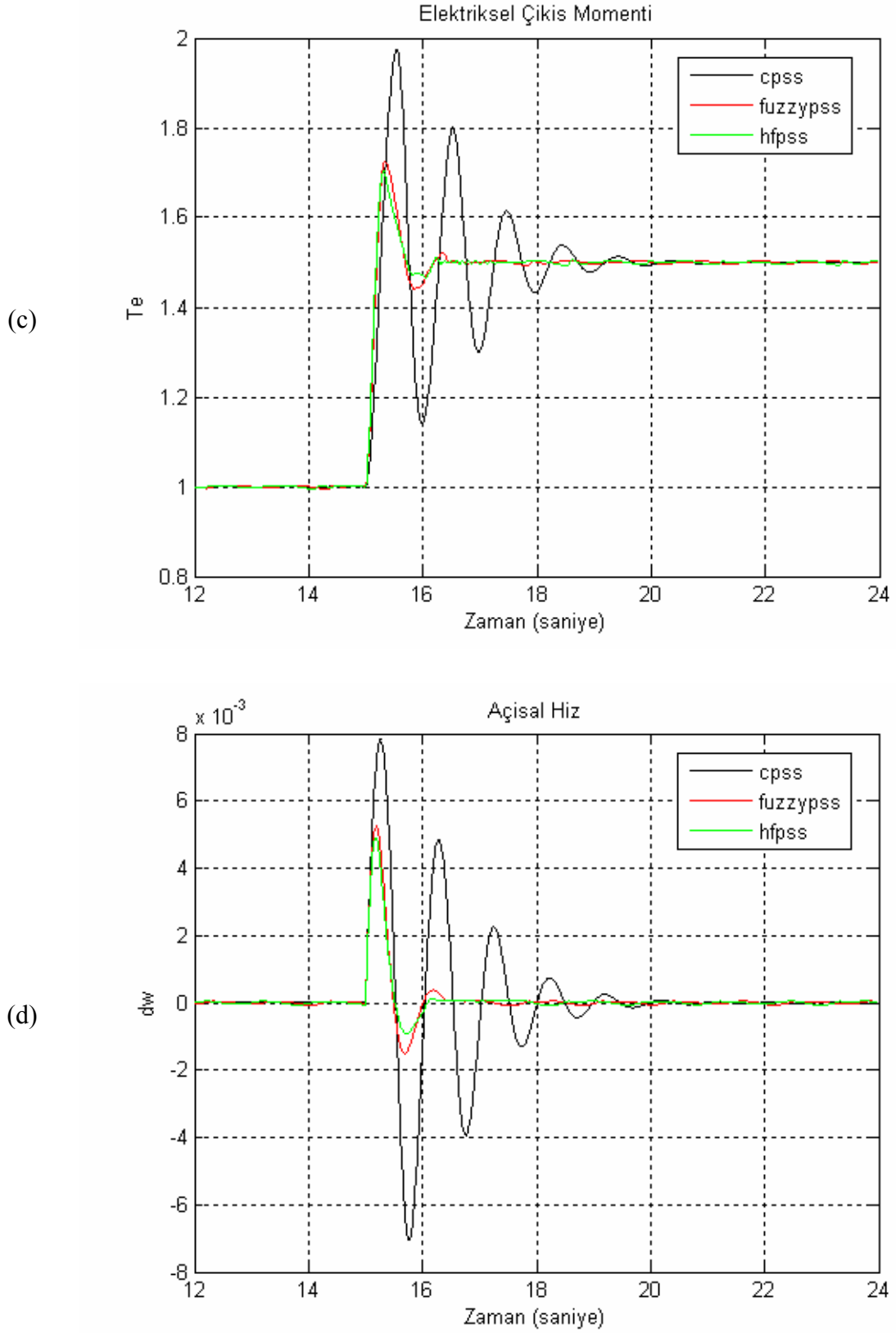


Şekil 7.3 'Te' çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması



Şekil 7.4 ' $\Delta\omega$ ' çıkışı üzerinde üç farklı kontrolör performansının karşılaştırılması





7.1.3 Sayısal Performans Sonuçları

Verilen çizelgelerde en iyi performans değeri üzeri koyulaştırılarak vurgulanmıştır.

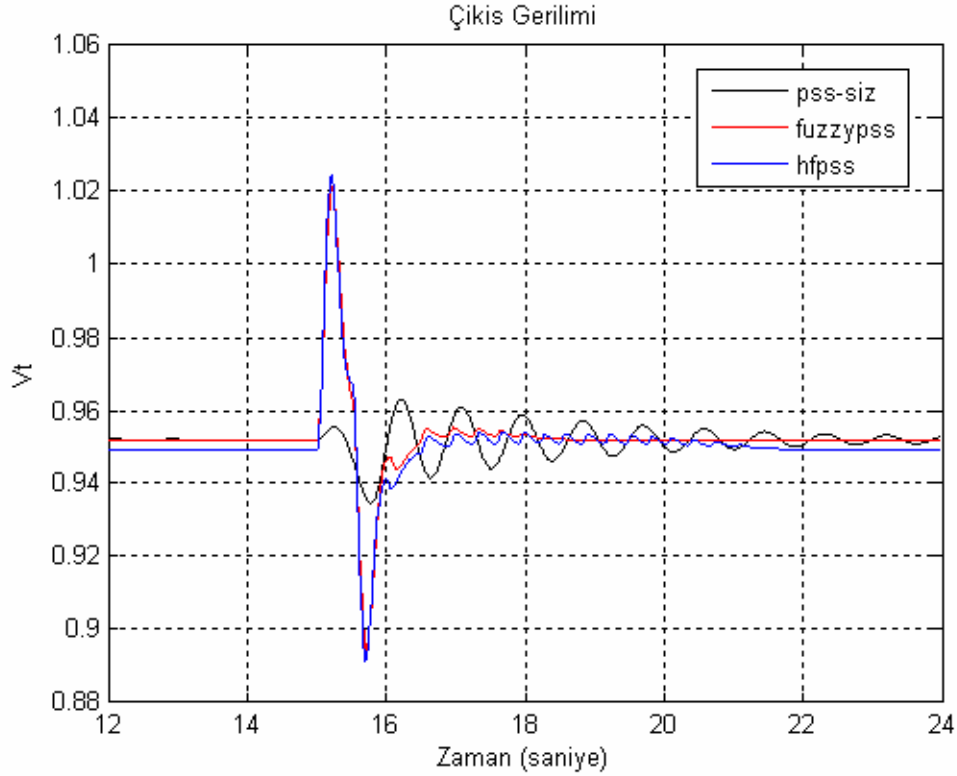
7.1.3.1 Çalışma Durumlarına Göre

Çizelge 7.1, 7.2, 7.3 ve 7.4 'de uygulanan kontrol yöntemlerinin IAE performans değerleri çalışma durumlarına göre gruplandırılarak gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 '1' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri

1	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
ΔV_t	3,01	14,574	12,247	3,8112	4,8228
$\Delta \delta$	147,9	80,991	73,69	19,563	22,394
ΔT_e	201,7	86,612	65,956	34,313	34,662
$\Delta \omega$	2,657	0,92453	0,77172	0,17466	0,16743

Çizelge 7.1 'deki hafif yük koşulunu temsil eden 1 nolu çalışma durumunda PSS'siz, CPSS'li PID PSS'li ve FPSS'li sistem sonuçlarında sırasıyla performans giderek artış göstermiştir. Yalnız PSS 'siz sistemde çıkış geriliminin performansı diğer tüm kontrolör performanslarından daha iyi çıkmıştır. Bunun nedeni sistem hafif yüklü durumda iken çıkış geriliminin bozucu etkiye karşın daha stabil kalması ve sisteme ilave edilen kontrolörün sistem performansına olumsuz etki yapmasıdır.



Şekil 7.6 '1' nolu çalışma durumunda üç farklı kontrolörün ΔV_t parametresi üzerindeki performansı

Ayrıca 1 nolu çalışma durumu için zamana göre simulasyon sonucuna bakıldığında PSS 'siz sistemin diğer kontrolör sonuçlarına göre küçük genlikli bir aşım değerine sahip olduğu yerleşme zamanının ise uzun olduğu görülmektedir (Şekil 7.6).

Önerilen HFPSS'li sistem ise FPSS'li sisteme göre çıkış gerilimi parametresinde kötü, yük açısı ve elektriksel çıkış momenti parametrelerinde ise bir miktar kötü olmakla birlikte FPSS'li sisteme yakın bir performans sergilemiştir. Önerilen kontrolörün açısal hız değişimi parametresindeki performansı ise diğer kontrolörlere göre alınan en iyi sonuçtur.

Genel olarak bakıldığında ise önerilen kontrol sistemi genel olarak PSS'siz, CPSS'li ve PID PSS'li sistem göre iyi olmakla birlikte en iyi kontrolör olan FPSS 'e yakın bir performans göstermiştir.

Çizelge 7.2 '2' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri

2	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
ΔV_t	257,32	2,4214	7,857	2,3451	2,0652
$\Delta \delta$	1599,3	26,281	42,34	14,029	11,369
ΔT_e	2489,7	67,284	56,763	37,069	39,126
$\Delta \omega$	32,658	0,55263	0,61206	0,17163	0,15606

Çizelge 7.2 'deki orta yük koşulunu temsil eden 2 nolu çalışma durumundaki performans sıralamasında PID PSS'li sistem genel olarak CPSS'li sistemden daha kötü bir performans sergilemiştir. PID PSS'li sistem CPSS'li sisteme göre yalnızca elektriksel çıkış momenti parametresi için iyidir. Bu durumda sıralama PSS 'siz, PID PSS 'li, CPSS 'li ve FPSS 'li sistem şeklinde olmuştur.

Önerilen HFPSS 'li sistem ise elektriksel çıkış momenti parametresi hariç diğer durumlarda en iyi performansı sağlayan kontrolör olarak gözükmemektedir.

Çizelge 7.3 '3' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri

3	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
ΔV_t	289,62	2,5701	9,146	1,9941	2,0141
$\Delta \delta$	1624,6	27,585	45,74	12,643	10,708
ΔT_e	2502,4	72,008	61,471	37,952	39,305
$\Delta \omega$	32,774	0,59881	0,68062	0,17917	0,15607

Çizelge 7.3 'deki ağır yük koşulunu temsil eden 3 nolu çalışma durumunda performans sıralaması 2 nolu durumuyla aynıdır ve PSS 'siz, PID PSS 'li, CPSS 'li ve FPSS 'li sistem şeklindedir. Yine PID PSS'li sistemde yalnızca elektriksel çıkış momenti parametresi üzerindeki performansı CPSS'li sisteme göre iyidir.

Önerilen HFPSS'li sistem ise çıkış gerilimi ve elektriksel çıkış momenti parametrelerinde FPSS'li sisteme göre çok az bir miktar kötü diğer parametrelerde ise en iyi kontrolör konumundadır.

Çizelge 7.4 '4' nolu çalışma durumu için IAE performans değerleri

4	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
ΔV_t	571,90	10,106	79,667	9,2278	8,9449
$\Delta \delta$	3183,3	114,45	428,35	36,935	31,531
ΔT_e	2320,4	122,42	309,580	44,942	40,168
$\Delta \omega$	43,977	1,7728	5,90480	0,45993	0,36690

Çizelge 7.4 'deki reaktif yük koşulunu temsil eden 4 nolu çalışma durumunda performans sıralaması yine 2 ve 3 nolu çalışma durumlarına benzer şeklindedir. Fakat burada PID PSS'li sistem performansı tüm parametler için CPSS'li sistemden kötüdür.

Önerilen HFPSS'in performansı ise bu çalışma durumunda tüm gözlenen çıkış parametreleri için FPSS ten üstün ve en iyi kontrolör konumundadır.

7.1.3.2 Gözlenen Çıkış Parametrelerine Göre

Çizelge 7.5, 7.6, 7.7 ve 7.8 'de ise uygulanan kontrol yöntemlerinin IAE performans değerleri gözlenen parametrelere göre gruplandırılarak gösterilmiştir. Burada ayrıca gözlenen parametre performanslarının kontrol yöntemlerine göre tüm çalışma durumlarındaki ortalamaları da alınarak bir karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 7.5 ΔV_t parametresi için IAE performans değerleri

ΔV_t	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
1	3,01	14,574	12,247	3,8112	4,8228
2	257,32	2,4214	7,857	2,3451	2,0652
3	289,62	2,5701	9,146	1,9941	2,0141
4	571,90	10,106	79,667	9,2278	8,9449
Ort.	280,46	7,4179	27,229	4,3446	4,4618

' ΔV_t ' çıkış gerilimi parametresi için elde edilen IAE performans tablosuna göre önerilen HFPSS'li sistem performansı tüm çalışma durumlarında CPSS'li ve PID PSS'li sistemden iyidir. PSS'siz sistemden ise 1 nolu çalışma durumu hiç iyi gözükmemektedir. FPSS'li sistemden ise sadece 2 ve 4 nolu çalışma durumlarında daha iyi bir performans göstermiştir. Ortalama değerlere göre önerilen kontrol yöntemi en iyi performansa sahip olan FPSS'e yakın bir sayısal performans değerine sahiptir.

Çizelge 7.6 $\Delta\delta$ parametresi için IAE performans değerleri

$\Delta\delta$	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
1	147,9	80,991	73,69	19,563	22,394
2	1599,3	26,281	42,34	14,029	11,369
3	1624,6	27,585	45,74	12,643	10,708
4	3183,3	114,45	428,35	36,935	31,531
Ort.	1638,78	62,327	147,53	20,793	19,001

' $\Delta\delta$ ' güç açısı değişimi parametresi için elde edilen IAE performans tablosuna göre önerilen HFPSS'li sistem performansı tüm çalışma durumlarında PSS'siz, CPSS'li ve PID PSS'li sistemden iyidir. FPSS'li sisteme göre ise 1 nolu çalışma durumu dışında performansı daha iyi durumdadır. Ortalama değerlere göre ise önerilen kontrol yöntemi en iyi performansa sahiptir.

Çizelge 7.7 ΔT_e parametresi için IAE performans değerleri

ΔT_e	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
1	201,7	86,612	65,956	34,313	34,662
2	2489,7	67,284	56,763	37,069	39,126
3	2502,4	72,008	61,471	37,952	39,305
4	2320,4	122,42	309,580	44,942	40,168
Ort.	1878,55	87,081	123,443	38,569	38,315

' ΔT_e ' elektriksel çıkış momenti parametresi için elde edilen IAE performans tablosuna göre önerilen HFPSS'li sistem performansı ' $\Delta\delta$ ' güç açısı değişimi parametresi tüm çalışma durumlarında PSS'siz, CPSS'li ve PID PSS'li sistemden iyidir. FPSS'li sisteme göre ise sadece 4 nolu çalışma durumu için daha iyi durumdadır. Ortalama değerlere göre ise önerilen kontrol yöntemi en iyi performansa sahiptir.

Çizelge 7.8 $\Delta\omega$ parametresi için IAE performans değerleri

$\Delta\omega$	PSS'siz	CPSS	PID PSS	FPSS	HFPSS
1	2,657	0,92453	0,77172	0,17466	0,16743
2	32,658	0,55263	0,61206	0,17163	0,15606
3	32,774	0,59881	0,68062	0,17917	0,15607
4	43,977	1,7728	5,90480	0,45993	0,36690
Ort.	28,017	0,96219	1,9923	0,24635	0,21161

' $\Delta\delta$ ' güç açısı değişimi parametresi için elde edilen IAE performans tablosuna göre önerilen HFPSS'li sistem performansı tüm çalışma durumlarında diğer tüm kontrol yöntemlerine göre daha üstün bir performans sağlamıştır. Ortalama değerlere göre ise önerilen kontrol yöntemi yine en iyi performansa sahiptir.

7.2 Değerlendirme

Senkron generatörlerin uyarım kontrolünün güç sistemlerinin dinamik performansı ve güç kalitesi üzerinde etkili bir rolü vardır. Günümüzde, enerji üretiminde kullanılan senkron generatörlerde etkili bir uyarım kontrolü ile sistemin kararlılığını ve dinamik performansını artırmak için çalışmalar yapılmaktadır. İyi bir uyarım kontrolü ancak generatörün çıkış parametrelerini geri besleme olarak kullanan ve uyarım regülatörüne yardımcı bir kontrol sinyali sağlayan bir güç sistem stabilizatörü vasıtasıyla mümkündür.

Güç sistemleri genellikle büyük nonlinear sistemlerdir ve sık sık elektriksel bozucu etkilerden kaynaklanan düşük frekanslı elektromekanik osilasyonlara maruz kalmaktadır. Genellikle bu tür osilasyonların sönümlenmesi için güç sistem stabilizatörleri tasarlanır. En ekonomik çözüm olan PSS bu tip osilasyonların sönümlenmesinde etkili olarak kullanılır. Sabit yapıya ve parametrelere sahip geleneksel stabilizatörler (CPSS) belirli bir çalışma durumu için ayarlanır ve bu çalışma durumu için optimum performansı sağlayabilir.

Son yıllarda özellikle mikrodenetleyici temelli sayısal kontrolörlerin ortaya çıkması sayesinde alternatif kontrol yöntemleri geliştirilmektedir. Güç sistem stabilizatörlerinin tasarımında kullanılan bu yöntemlerden biri de akıllı kontrol stratejisi içeren Fuzy tabanlı PSS 'lerdir. FPSS ler daha az hesaplama yükü, dayanıklılık ve nonlinearlik özelliğinden dolayı literatürde çoklukla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, FPSS 'lerin sağladığı sistem performansının iyileştirilmesi amacıyla literatürde kullanılan iki girişli FPSS 'lere bir giriş değişkeni daha ilave edilmiştir. Kullanılacak bu ilave giriş sinyalini tespit edilmesinde en iyi performans elde etmek amaçlanmıştır. Bunun için de sistemde kontrol giriş değişkeni olarak kullanılacak 9 giriş sinyali belirlenerek bunların üçlü kombinasyonlarından 19 farklı değişken grubu oluşturulmuştur. Bu gruplarla yapılan simülasyon çalışmalarında 2 grubun kullanılmasında en iyi performansın sağlandığı görülmüş ve bunlardan ilave değişken olarak çıkış geriliminin türevi kullanılan grup uygulamada kullanılmak üzere seçilmiştir.

Bu ilave giriş değişkeninin neden olacağı kural patlaması probleminden sakınmak için, hiyerarşik fuzzy kontrolör kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntem iki adet fuzzy altsistemin hiyerarşik olarak birbirine bağlanmasıyla oluşmaktadır. Bu iki fuzzy altsistemden birincisinin kural tablosu oluşturulmasında FPSS'li sistem için kullanılan kural tablosu aynen kullanılmıştır. Bunun nedeni giriş değişkenlerinin aynı olmasıdır. İkinci fuzzy altsistemin kural tablosu için de FPSS'li sistem simülasyonundan elde edilen kontrolör giriş ve çıkış değişken dataları kullanılarak Matlab Fuzzy Logic Toolbox Programı içerisindeki ANFIS

algoritması ile otomatik olarak ayarlanmıştır.

Daha önce bölüm 6.3 'de anlatılan klasik fuzzy kontrolör ve hiyerarşik fuzzy kontrolörde kural sayısı hesabını tanımlayan (6.20) ve (6.19) ifadelerine göre 148 kuralla yapılabilecek olan kontrol işlemi kullanılan yöntemle 58 kural ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde hem klasik fuzzy algoritmasındaki kural patlama probleminin önüne geçilmekte, hem de fuzzy kontrolöre ilave edilen giriş değişkeninin performans artırıcı etkisinden yararlanılmaktadır.

Böylelikle bu çalışmada kullanılan hiyerarşik fuzzy kontrol yöntemiyle tasarlanan PSS, senkron generatör uyarım kontrol çalışmalarında daha önce kullanılmamış ve performansı test edilmemiştir.

Önerilen kontrolörün performansı diğer kontrolör yöntemleriyle karşılaştırılarak test edilmiştir. SMIB sisteminin mekanik moment girişine kare dalga ve adım fonksiyonu şeklinde iki farklı bozucu etki uygulanarak yapılan 4 farklı çalışma durumu için simülasyonlar yapılmıştır. Bunlardan sadece reaktif yüklemeye koşulunu temsil eden 4 nolu çalışma durumu için simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Ayrıca simülasyonlarda önerilen kontrolörün karşılaştırılması için en iyi performansın elde edildiği CPSS'li ve FPSS'li sistem sonuçları kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlarda çıkış gerilimi, güç açısı, elektriksel çıkış momenti ve açısal hız olmak üzere 4 farklı sistem parametresinin zamana göre değişimleri gözlenmiştir. Daha sonra ise tüm yük koşullarında daha farklı bir değerlendirme yapabilmek için IAE değerlendirme kriteri kullanılarak sayısal açıdan değerlendirme yapılmıştır. Böylece kare dalga şeklinde uygulanan bozucu etki durumu için sayısal performans değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplanan sayısal değerlendirme kriterleri çalışma durumu ve gözlenen sistem parametrelerine göre gruplandırılarak çizelgeler halinde verilmiştir. Gözlenen parametrelere göre verilen çizelgelerde ayrıca sonuçların ortalama değerleri de verilmiştir.

Kare dalga tipi bozucu etki uygulanarak 4 farklı sistem parametresinin zamana göre değişimlerini incelendiğinde önerilen kontrolörün performansı yerleşme zamanı kriterine göre en iyi durumundadır. En büyük aşım kriterine göre ise çıkış voltajı parametresi hariç diğer üç parametre için yine önerilen kontrolör karşılaştırılan CPSS ve FPSS'li sisteme göre daha iyi bir performans sergilemiştir. Kararlı hal hatası kriteri açısından bakılacak olursa FPSS ve önerilen HFPSS'li sistemin CPSS'e göre az da olsa kötü bir performans gösterdiği görülmektedir. Bu durum özellikle çıkış gerilimi parametresinin simülasyonunda göze çarpmaktadır. Bu kritere göre önerilen kontrolör FPSS'li sisteme yakın olmakla birlikte bir miktar daha kötü bir performans sergilemiştir.

Çalışma durumlarına göre gruplandırılmış çizelgelerdeki sayısal performans sonuçlarına göre

orta yük ve reaktif yükleme koşullarını temsil eden 2 ve 4 nolu çalışma durumlarında önerilen HFPSS'li sistem en iyi performansı gösteren en fazla parametreye sahiptir. Hafif yükleme koşulunu temsil eden 1 nolu çalışma durumunda FPSS'li sistem en iyi performansı gösteren en fazla parametreye sahiptir. Ağır yükleme koşulunu temsil eden 3 nolu çalışma noktasında ise önerilen HFPSS'li ve FPSS'li sistemin en iyi performansı gösteren parametre sayısı eşittir.

Gözlenen parametrelere göre gruplandırılan çizelgelerdeki ortalama değer sonuçlarına göre önerilen kontrol yönteminin ortalama performansı sadece 'ΔVt' parametresi için Fuzzy kontrolörden biraz daha düşüktür. Bunun dışında önerilen kontrolör gözlenen parametrelere göre diğer kontrol yöntemlerinden daha iyi bir performans göstermiştir.

Sonuç olarak, önerilen Hiyerarşik Fuzzy kontrolörün, simülasyon çalışmaları sonucu, senkron generatörlerin uyarım kontrolünde karşılaştırılan kontrol yöntemlerine göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Klasik Fuzzy kontrolörle karşılaştırıldığında ise düşük kural sayısına sahip olması ve bunun sonucunda ayarlanacak parametrelerin daha az olması bu kontrolörü avantajlı hale getirmektedir.

7.3 Öneriler

Bu çalışmada önerilen kontrolör performans ve performans testi için uygulanan CPSS ve diğer kontrol yöntemlerinin simülasyonunda SMIB sistemi dışında farklı güç sistem modelleri kullanılarak da yapılabilir. Örneğin 3 makineli 9 baralı sistem modeli, 2 bölgesi 4 makineli 13 baralı sistem modeli, 10 makineli 39 baralı NETS modeli, 16 makineli 68 baralı sistem modeli veya (Ong, 1997) tarafından kullanılan 2 makineli Matlab Simulink modeli üzerinde önerilen kontrolörün performansı test edilebilir.

Hiyerarşik fuzzy kontrolörde tasarlanan kural tablolarının ve ölçkleme katsayılarının genetik algoritma yöntemi ile optimize edilerek yeniden ayarlanmasıyla daha iyi sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir.

Buna ilave olarak YSA kullanılarak gerçek zamanlı yük tahminine dayalı optimize edilmiş parametre kullanan HFPSS uygulaması yapılması da düşünülmektedir.

Bir de önerilen hiyerarşik fuzzy kontrol yönteminin ikiden çok giriş değişkeni gerektiren farklı sistemlere uygulama çalışmaları yapılması düşünülmektedir. Ayrıca Lee vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada geliştirilen indirgeme kuralı ile ilgili uygulamalar yapılabilir. Böylece çok girişli fuzzy kural tabanı ile yapılmış uygulamalarda kural tabanını hiyerarşik fuzzy formunda yazılarak aynı performansın daha az kural sayısı ile gerçekleştirilmesi mümkün hale gelecektir.

KAYNAKLAR

Abdel-Magid, Y.L., Abido, M.A., Al-Baiyet, S., ve Mantawy, A.H., (1999), "Simultaneous Stabilization of Multimachine Power Systems via Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.14, No.4, November.

Abido, M.A., ve Abdel-Magid Y.L., (2004), "Analysis of Power System Stability Enhancement via Excitation and Facts-Based Stabilizers", Taylor&Francis, Electric Power components and Systems, 32:75-91.

Abido, M.A., ve Abdel-Magid, Y.L., (1998), "A Hybrid Neuro-fuzzy Power System Stabilizer for Multimachine Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.13, No.4, November.

Abido, M.A., ve Abdel-Magid, Y.L., (1999a), "Adaptive tuning of power system stabilizers using radial basis function networks", Elsevier, Electric Power Systems Research, 49, 21–29.

Abido, M.A., ve Abdel-Magid, Y.L., (1999b), "A fuzzy basis function network based power system stabilizer for generator excitation control", Electric Pow. Sys. Research, 49, 11-19.

Abido, M.A., ve Abdel-Magid, Y.L., (1999c), "Hybridizing rule-based Power System Stabilizers with Genetic Algorithms", IEEE Transactions on Pow. Sys., Vol.14, No.2, May.

Abido, M.A., ve Abdel-Magid, Y.L., (2003), "Coordinated design of a PSS and an SVC based controller to enhance power system stability", Elsevier, Electrical Power and Energy Systems 25 (2003) 695–704.

Afzalian, A. ve Linkens, D.A., (2000), "Training of neurofuzzy power system stabilisers using genetic algorithms", Elsevier, Electrical Power and Energy Systems 22 (2000) 93–102.

Al-Osaimi, S.A., Abdennour, A, ve Al-Sulaiman, A.A., (2005), "Hardware implementation of a fuzzy logic stabilizer on a laboratory scale power system", Elsevier, Electric Power Systems Research 74 (2005) 9–15.

Anderson, P.M. ve Fouad, A.A., (1994), Power System Control and Stability, IEEE Press, New York.

Arnalte S., (2000), "Fuzzy Logic Based Voltage Control of A Synchronous Generator", International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.37, Issue 4, pp.333-343, October.

Atanasova, T., ve Zaprianov, J., (1999), "Performance of the RBF neural controller for transient stability enhancement of the power system", International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, 1999, Trieste, Italy.

Bojtor, L., Nagy, B., ve Rakovszky, Gy., (1993), "A novel excitation system for power plant generators", The European Power Electronics Association, Brighton, 13, 16.09.1993.

Borges, A., A.B.de R., do Valle, A.C.M., de Mores, A.J., de Azevedo, H.R., (2001), "A simple fuzzy excitation control system (AVR), in power system stability analysis", Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference, (AUPEC-2001),

23-26 September.

Bourles H., Peres S., Margotin T., ve Houry M.P., (1998), "Analysis and Design of A Robust Coordinated AVR/PSS", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.2, pp.568-573, May 1998.

Byerly, R.T., Sherman, D.E., ve Bennon, R.J., (1978), "Frequency domain analysis of low frequency oscillations in large electri power systems", Report EPRI EL-726, USA.

Cao, Y.J., Wu, Q.H., Jiang, L., ve Cheng, S.J., (1998), "Nonlinear control of power system multi-mode oscillations", Elsevier, Electrical Power & Energy Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 61-68.

Cao,Y., Jiang, L., Cheng, S.,Chen, D., Malik, O.P., ve Hope, G.S., (1994), "A Nonlinear Variable Structure Stabilizer for Power System Stability", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.9, No.3, September.

Chang, C.S., Quek, H.B., ve Devotta, J.B.X., (1999), "Power System Excitation Control Using Master-Slave Fuzzy Logic Power System Stabilizers", Elsevier, Fuzzy Set and Systems, 102, 85-94.

Chaturvedi, D.K., ve Malik, O.P., (2005), "Generalized neuron-based PSS and adaptive PSS", Elsevier, Control Engineering Practice 13 (2005) 1507–1514.

Chen, D-W., ve Zhang, J-P., (2005), "Time Series Prediction Based On Ensemble ANFIS", Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, 18-21 August 2005.

Chen, G.P., Malik, O.P., Hope, G.S., Qin, Y.H., ve Xu, G.Y., (1993), "An Adaptive Power System Stabilizer Based on the Self-Optimizing Pole Shifting Control Strategy", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.8, No.4, December.

Cheng, Y.J., ve Elangovan, S., (2003), "Enhanced power system stabilizer via integrated tabu-fuzzy knowledge based controller", Elsevier, Electrical Power and Energy Systems, vol.25, pp.543–550.

Chung, H., Lee, J., Joo, S., Chung, D., Kim, S., ve Chung, M., (1999), "Application of Fuzzy PID Controller for Stabilization of Power System", IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, August, 22-25, 1999, Seoul, Korea.

Coowar, F., Magdy, M., ve Grainger, W., (1992), "Decoupling negative damping signals in a power system through dynamic gain reduction measures", IEEE Transactions on Power Systems, 7, 1279-1284.

Dandeno, P.L., Karas, A.N., McClymont, K.R., ve Watson, W., (1968), "Effect of High-speed Rectifier Excitation Systems on Generator Stability Limits", IEEE Trans. PAS, Vol. 87, pp. 190-201, Jan. 1968.

Darus, I.Z.M., Tokhi, M.O., ve Hashim, S.Z.M., (2004), "Modelling and Control of a Flexible Structure using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Algorithm", Mechatronics, 2004. ICM '04. Proceedings of the IEEE International Conference on, 3-5 June 2004 Page(s):159 –

164.

Dash, P.K., Liew, A.C., ve Mishra, B.R., (1998), "An adaptive PID stabilizer for power systems using fuzzy logic", Elsevier, *Electric Power Systems Research* 44 (1998) 213–222.

Dechanupaprittha, S., ve Ngamroo, I., (2002), "A Tabu Search Algorithm to Optimal Weight Selection in Design of Robust Power System Stabilizer ", Proceedings of the 2002 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, (ITC-CSCC 2002), July 16-19, 2002, Phuket, Thailand, Vol. 1, pp.486-489.

Deckman, S.M., ve Costa, V.F.da, (1994), "A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994.

Djukanovic, M., Novicevic, M., Dobrijevic, Dj., Sobajic, D.J., ve Pao, Y-H., (1995), "Neural-net based coordinated stabilizing control for the exciter and governor loops of low head hydropower plants", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.10, No.4, December.

Djukanovic, M.B., Calovic, M.S., Vesovic, B.V., ve Sobajic, D.J., (1997), "Neuro-Fuzzy controller of low head hydropower plants using adaptive-network based fuzzy inference system", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.12, No.4, December.

Doraraju, P., ve Nondy, R.K., (2000), "An Adaptive Controller for Improving Dynamic Stability of Synchronous Power System", Taylor & Francis, *Electric Machines and Power Systems*, 28:1–11.

Elgerd, O.I., (1982), *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*, New York: McGraw-Hill; 2nd edition.

Elshafei, A.L., El-Metwally, K.A., ve Shaltout, A.A., (2005), "A variable-structure adaptive fuzzy-logic stabilizer for single and multi-machine power systems", Elsevier, *Control Engineering Practice* 13 (2005) 413–423.

El-Zonkoly, A.M., (2006), "Optimal tuning of power systems stabilizers and AVR gains using particle swarm optimization", Elsevier, *Expert Systems with Applications* 31 (2006) 551–557.

Emara, H., ve Elshafei, A.L., (2004), "Robust robot control enhanced by a hierarchical adaptive fuzzy algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, No.17, p.187–198.

Enel4ssh2, (2005), *Power System Stability Course Notes*. School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of KwaZulu-Natal King George V Avenue, Durban, South Africa. (<http://coursemain.ee.ukzn.ac.za/enel4ssh2/index.asp?Code=ENEL4SSH2>)

Evans, R.D., ve Bervall, R.C., (1924), "Experimental Analysis of Stability and Power Limitations", *AIEE Trans.*, pp. 39-58, 1924.

Evans, R.D., ve Wagner, C.F., (1926), "Further Studies of Transmission System Stability", *AIEE Trans.*, pp.51-80.

Fadlalmoula, Z., Robertson, S.S., O'Reilly, J., ve Leithead, W.E., (1998), "Individual channel

analysis of the turbogenerator with a power system stabilizer”, *Int. J. Control*, Vol. 69, No. 2, 175-202

Fetea, R., ve Petroianu, A., (1999), “How to check the reliability of a model in power systems?”, *Proceedings of PowerTech, Budapest '99*, Technical University of Budapest, 244.

Fregene, K., ve Kennedy, D., (2000), “Neural Stabilization/Excitation Control of a High-Order Power System by Adaptive Feedback Linearization”, *arXiv:math.OA/0007063 v1* 11 July.

Gan, D., Qu, Z., ve Cai, H., (2000), “Multi machine power system excitation control design via theories of feedback linearization control and nonlinear robust control”, *Taylor&Francis, International Journal of Systems Science*, 2000, volume 31, number 4, pages 519-527.

Gegov, A.E., ve Frank, P.M., (1995), “Hierarchical fuzzy control of multivariable systems”, *Fuzzy Sets and Systems*, vol.72, pp.299-310.

Gibbard, M.J., (1991), “Robust design of fixed-parameter power system stabilizers over a wide range of operating conditions”, *IEEE Trans PWRS* 1991;6(2):794–800.

Godhwani, A., ve Basler, M.J., (1996), “A digital excitation control system for use on brushless excited synchronous generators”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.11, No3, September.

Grondin, R., Kamwa, I., Soulieres, L., Potvin, J., ve Champagne, R., (1993), “An approach to PSS design for transient stability improvement through supplementary damping of the common low-frequency. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8, 954-963.

Gupta, D.P., Narahari, N.G., Boyd, I., ve Hogg, B., (1985), “An adaptive power system stabiliser which cancels the negative damping torque of a synchronous generator”, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 132, 109-117.

Gupta, R., Bandyopadhyay, B., ve Kulkarni A.M., (2003), “Design of pss for single machine system using robust fast output sampling feedback technique”, *Elsevier, Electric Power Systems Research* 65, 247_257.

Hasan, A.R., Martis, T.S., ve Ula, A.H.M.S., (1994), “Design and Implementation of a Fuzzy Controller Based Automatic Voltage Regulator for a Synchronous Generator”, *IEEE Transactions of Energy Conversion*, Vol.9, No.3, pp.550-557, September 1994.

Heffron, W.G., ve Phillips, R.A., (1952), "Effect of Modem Amplidyne Voltage Regulators on Underexcited Operation of Large Turbine Generators", *AIEE Trans. PAS*, Vol.71, pp. 692-697.

Hiyama T., (1994a), "Robustness of Fuzzy Logic Power System Stabilizers Applied to Multi Machine Power System", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.9, No.3, pp.451-459, September.

Hiyama T., (1994b), "Real time control of Micro Machine System Using Micro-Computer Based Fuzzy Logic Power System Stabilizer", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol 9., No.4, pp.724-731, December.

Hiyama T., Kugimiya M., ve Satoh H., (1994), "Advanced PID Type Fuzzy Logic Power System Satabilizer", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 9., No.3, pp.514-520, September.

Hiyama T., ve Sameshima, T., (1991), "Fuzzy logic control scheme for on-line stabilization of multimachine power system", Fuzzy Sets and Systems, vol.39, 1991, pp.181-194.

Hiyama, T., Miyazaki, K., ve Satoh H., (1996), "A Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power Systems with Multi-mode Oscillations", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.11, No.2, pp.449-454, June.

Hosseinzadeh, N., ve Kalam, A., (1999), "A Direct Adaptive Fuzzy Power System Stabilizer", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No.4, December.

Hsu, Y-Y., ve Cheng, C-H., (1990), "Design of fuzzy power system stabilisers for multimachine power systems, IEE Proceedings, Vol. 137, Pt. C, No. 3, May 1990

Hsu, Y-Y., ve Cheng, C-H., (1993), "A Fuzzy Controller for Generator Excitation Control", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.23, No.2, March/April.

Hu, W., Mei, S., Lu, Q., Shen, T., ve Yokoyama, A., (2002), "Nonlinear adaptive decentralized stabilizing control of multimachine systems", Elsevier, Applied Mathematics and Computation 133 (2002) 519–532.

IEEE Committee Report, (1968), "Computer Representation of Excitation Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol.PAS-87, No.6, pp.1460-1464, June 1968.

IEEE Committee Report, (1981), "Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp.494-509, February.

IEEE Standart 421.5-1992, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies.

Ivanescu, D., Snyder, A.F., Dion, J-M., Dugard, L., ve Georges, D., (2002), "Control of interconnected power system: a time delay approach", IMA Journal of Mathematical Control and Information, 19, 115-131.

Jadric, I., (1998), "Modelling and control of a synchronous generatör with electronic load, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Master of Science in Electrical Engineering, January 5, 1998, Blacksburg, Virginia.

Jang, J.-S.R., (1996), "Input selection for ANFIS learning", Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Volume 2, 8-11 Sept. 1996 pp.1493-499 vol.2.

Jang, J-S.R., (1993), "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics, Vol.23, No.3, pp.665-685, May/June 1993.

Jang, J-S.R., ve Sun, C.-T., (1995), "Neuro-fuzzy modeling and control", The Proceedings of the IEEE, 83(3):378-406, Mar. 1995.

Joo, M.G., ve Lee, J.S., (2002), "Universal approximation by hierarchical fuzzy system with

constraints on the fuzzy rule”, *Fuzzy Sets and Systems* Vol.130, pp.175-188.

Karnavas, Y.L., ve Papadopoulos, D.P., (2000), “Excitation Control of Power-Generating System Based on Fuzzy Logic and Neural Networks”, *ETEP*, Vol.10, No.4, July/August 2000.

Kumar, B.K, Singh, S.N., ve Srivastava, S.C., (2006), “A decentralized nonlinear feedback controller with prescribed degree of stability for damping power system oscillations”, Elsevier, Article in press, *Electric Power Systems Research* xxx (2006) xxx–xxx.

Kundur, P., (1994), *Power System Stability and Control*, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, Inc., New York.

Kundur, P., Klein, M., Rogers, G. J., ve Zywno, M. S., (1989), “Application of power system stabilisers for enhancement of overall system stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 4, 614-626.

Kundur, P., Lee, D.C., ve Zeineldin, H.M., (1981), “Power system stabiliser for thermal units: analytical techniques and on-site validations”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100, 81-95.

Kuo, B.C., (1999), *Otomatik Kontrol Sistemleri*, Literatür Yayıncılık, 1999.

Larsen, E.V., ve Swann, D.A., (1981), “Applying power system stabilisers, Pts I, II ve III.”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100, 3017-3046.

Lee, M-L., Chung, H-Y., ve Yu, F-M., (2003), “Modeling of hierarchical fuzzy systems”, Elsevier *Fuzzy Sets and Systems*, *Fuzzy Sets and Systems* 138 (2003) 343–361.

Li, H-X., ve Tso, S.K., (2000), “Quantitative design and analysis of fuzzy proportional-integral-derivative control -a step towards autotuning”, Taylor&Francis, *International Journal of Systems Science*, volume 31, number 5, pages 545-553.

Lu, J., Nahrir, M.H., ve Pierre, D.A., (2001a), “A fuzzy logic-based adaptive power system stabilizer for multi-machine systems”, *Electric Power Systems Research* 60 (2001), 77–83

Lu, J., Nahrir, M.H., ve Pierre, D.A., (2001b), “A fuzzy logic-based self tuning power system stabilizer optimized with a genetic algorithm”, Elsevier *Electric Power Systems Research* 60: 115–121.

Machowski J., Bialek J., ve Bumby J.R., (1997), *Power Systems Dynamics and Stability*, John Wiley & Sons; 1 edition (September 2, 1997).

Malik, O.P., (2004), “Amalgamation of adaptive control and AI techniques applications to generator excitation control”, Pergamon, *Annual Reviews in Control* 28 (2004) 97–106.

Mamdani, E.H., (1974), “Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant” *Proceedings of the Institute of Electrical Engineers*, 121, 1585-1588.

Mello F.P.de, Hanneit, L.N., ve Undrill, J.M., (1978), “Practical approach to supplementary stabilizing from accelerating power”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*,

PAS-97(6):1515–1522.

Mello, F.P.de, ve Concordia, C., (1969), "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. PAS, Vol. 88, pp.316-329, April 1969.

Nürnbergger, A., (2003), "A hierarchical recurrent neuro-fuzzy model for system identification", Elsevier, International Journal of Approximate Reasoning, Vol.32, pp.153–170.

Ong, Chee-Mun, (1997), Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink, Prentice Hall PTR (September 19, 1997).

Özçalık, H.R., ve Uygur, A.F., (2003), "Dinamik Sistemlerin Uyumlu Sinirsel-Bulanık Ağ Yapısına Dayalı Modellenmesi, KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi 6 (1) 2003.

Padiyar K.R., (1999), Power System Dynamics Stability and Control John Wiley & Sons; Bk&Disk edition (April 5, 1999)

Pai, M.A., (1989), Energy Function Analysis for Power System Stability, (Boston, Massachusetts: Kluwer).

Paulus, M., ve Murgas, J., (2002), "Fuzzy System PSS", Control of Power& Heating Systems 2002, 5th International Conference, Zlín, Czech Republic, May 21-22, 2002.

Pierre, D.A., (1987), "A perspective on adaptive control of power systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol..PWRS-2, No.2, pp.387-396.

Power System Toolbox for MATLAB, (1997), Cherry Tree Scientific Software, Colborne, ON, Canada, 1997.

PSEC, (1987), IEEE Working Group on Special Stability Controls, Power System Engineering Committee, "Bibliography on the application of discrete supplementary controls to improve power system stability", IEEE Trans. on Power System, Vol .PWRS-100 No.9, pp.474-485.

Raju, G.V.S., ve Zhou, J., (1993), "Adaptive Hierarchical Fuzzy Controller", IEEE Transactions On Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 4, July/August.

Raju, G.V.S., Zhou, J., ve Kisner, R.A., (1991), "Hierarchical fuzzy control", International Journal of Control, Vol.54, No.5, pp.1201–1216.

Rizzoni, G., (1993), Principles and Applications of Electrical Engineering, Richard D. Irwin Inc.

Rogers, G., (1999), Power System Oscillations, Kluwer Academic Publishers, Springer; 1 edition (December 1, 1999).

Ryff, P.F., (1988), Electric Machinery (Second Edition), Prentice Hall College Div (January 1, 1988).

Sanaye-Pasand, M., ve Malik, O.P., (1999), "A Fuzzy Logic PSS Using a Standardized Rule

Table”, Taylor&Francis, Electric Machines and Power Systems, 27:295-310.

Schaefer, R.C., Kim, K., ve Basler, M.J., (2002), "Voltage Regulator with Dual PID Controllers Enhances Power System Stability”, presented at the HydroVision Conf., Portland, OR, Jul./Aug. 2002.

Schleif, F.R., Hunkins, H.D., Martin, G.E., ve Hattan, E.E., (1968), "Excitation Control to Improve Powerline Stability”, Trans. PAS, Vol. 87, pp. 1426-1434, June 1968.

Segal, R., Sharma, A., ve Kothari, M.L., (2004), “A self-tuning power system stabilizer based on artificial neural network”, Elsevier, Electrical Power and Energy Systems 26 (2004) 423–430.

Snyder, A.F., (1997), Inter-Area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements , Matesr’s Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.

Steinmetz, C.P., (1920), “Power Control and Stability of Electric Generating Stations”, AIEE Trans., Vol. XXXIX, Part II, pp. 1215, July-December.

Stot, B., (1979), “Power System dynamic Response Calculations”, Proc. IEEE, 67, pp.219-241.

Tacer, E., (1990), Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi.

Wang Y., Hill D.J., Middleton R.H., ve Gao L., (1993), "Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems" IEEE Trans. on Power Systems, Vol 8., no.2, pp.620-627, May 1993.

Wang, H.F., Swift, F.J., Hogg, B. W., Chen, H., ve Tang, G., (1995), “Rule-based variable-gain power system stabiliser”, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Pt D, 142, 29-32.

Wang, L-X, (1998), “Universal approximation by hierarchical fuzzy systems”, Fuzzy Sets and Systems vol.93, pp.223-230.

Wang, L-X, (1999), “Analysis and Design of Hierarchical Fuzzy Systems”, IEEE Transactions On Fuzzy Systems, Vol. 7, No. 5, October.

Weedy, B.M., ve Cory, B.J., (1998), Electric Power Systems, John Wiley & Sons; 4 edition (June 4, 1998)

Wilkins, R., (1926), “Practical Aspects of System Stability”, AIEE Trans., pp. 41-50.

Yılmaz M., Çomaklı Ö., ve Haşiloğlu, A.S., (2002), “Kanallarda zamana bağlı zorlanmış ısı taşınımının bulanık-sinir ağı (neuro-fuzzy) ile tahmini”, GAP IV. Mühendislik Kongresi Bildiriler Kitabı, 06-08 Haziran 2002, Şanlıurfa, Turkey.

Yılmaz, M., ve Arslan, E., (2005), “Bulanık Mantığın Jeodezik Problemlerin Çözümünde Kullanılması”, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 23-25 Kasım 2005, İTÜ, İstanbul.

You, R., Eghbali, H.J., ve Nehrir, M.H., (2003), "An Online Adaptive Neuro-Fuzzy Power System Stabilizer for Multimachine Systems", IEEE Trans. on Power Sys., Vol. 18, No. 1, February.

Yu, Y-N., (1983), Electric Power System Dynamics, Academic Press, New York.

Zadeh L.A., (1965), "Fuzzy Sets", Information and control, 8, 338-353.

Zadeh, L.A., (1973), "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes" IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 3, 28-44.

EKLER**Ek 1 Matlab m_file ana programı ve kontrol yöntemlerinin uygulanarak sayısal ve grafiksel sonuçların elde edildiği alt programlar**

```
%***ANA PROGRAM***
```

```
% Bellekteki değişkenlerin ve ekranın temizlenmesi ve program çalıştırmaya  
% başlangıç bölümü
```

```
clear all
```

```
close all
```

```
bdclose all; set_param(0, 'CharacterEncoding', 'ISO-8859-1');
```

```
clc
```

```
%-----
```

```
% Sistem ve PSS parametrelerinin girilmesi
```

```
pd=1;
```

```
%.....pss=[ Kd f H Tr Tdo xe Kae Tae Vref Tw T1 T2 Kstab ]
```

```
guptapss=pd*[0 60 5 0.02 6 0.2 100 0.02 1 2 0.08 0.027 16 ];
```

```
xe=guptapss(6);
```

```
%-----
```

```
% Çalışma durumları parametrelerinin girilmesi
```

```
durum =[
```

```
% P Q xe K1 K2 K3 K4 K5 K6
```

```
1 0.6 0.0361 xe 1.4336 1.5855 0.2889 2.0294 0.0194 0.2628;
```

```
2 1.5 0.2303 xe 1.6117 1.8883 0.2889 2.4170 -0.1524 0.1898;
```

```
3 1.8 0.3352 xe 1.5911 1.8987 0.2889 2.4303 -0.1717 0.1866;
```

```
4 1.0 0.3333 3*xe 0.7430 1.0776 0.4180 1.3794 -0.1739 0.4561];
```

```
%hesaplanan K3=(xd'+xe)/(xd+xe) den xd'=0.32, xd=1.6 bulunmuştur
```

```
%-----
```

```
% Hangi çalışma durumunun seçileceğini belirleyen bölüm
```

```
ddegeri=input('What is your case number :')
```

```
durum=durum(ddegeri,:);
```

```
%-----
```

```
%Simulasyon süresi ve bozucu etkinin genliği ve süresinin girildiği bölüm
```

```
tstop = 24;%simulasyon bitiş süresi
```

```
dt1=15;%bozucu etki başlangıç zamanı
```

```
dt2=15.5;%bozucu etki bitiş zamanı
```

```
time_Dtmech=[0 dt1-7 dt1-5 dt1-3 dt1-1 dt1 dt2 dt2 dt2+1 dt2+3 dt2+5 dt2+7 tstop];
```

```
T = 0.5; % bozucu etkinin genliği
```

```
tmech_Dtmech=[0 0 0 0 0 0 T T 0 0 0 0 0];
```

```
% Çıkış parametrelerinin grafiklerinin çizdirilmesi için tip seçimi
```

```
dplot=2;
```

```
%-----
```

```
% ALT PROGRAMLARIN ÇALIŞTIRILDIĞI BÖLÜM
```

```
% Kstab=0 ise PSS'siz sistem Kstab=16 ise CPSS'li sistem simulasyonu yapan alt program
```

```

case2p

% PID kontrolörlü sistem simülasyonu yapan alt program
case_PID

% Klasik Fuzzy kontrolörlü sistem simülasyonu yapan alt program
case7p

% Hiyerarşik Fuzzy kontrolörlü sistem simülasyonu yapan alt program
case8p
%-----

% ***Kstab=0 ise PSS'siz sistem Kstab=16 ise CPSS'li sistem simülasyonu
% yapan alt program***
% Ana programdan sistem datalarının okunması
K1=durum(1,5);
K2=durum(1,6);
K3=durum(1,7);
K4=durum(1,8);
K5=durum(1,9);
K6=durum(1,10);
Kd=guptapss(1);
f=guptapss(2);
H=guptapss(3);
Tr=guptapss(4);
T3=K3*guptapss(5);%T3=K3*Tdo
Kae=guptapss(7);
Tae=guptapss(8);
Vref=guptapss(9);
wo=2*pi*f;

% PSS parametrelerinin okunması
pk=1;Tw=pk*guptapss(10);T1=pk*guptapss(11);T2=pk*guptapss(12);
pkk=1;Kstab=pkk*guptapss(13);

% Sistemin PSS li ve ya PSS siz olduğunu belirten bölüm
if Kstab==0
disp('Sistem PSS 'siz çalışıyor')
else disp('Sistem PSS 'li çalışıyor')
end

% Sistem simülasyonunun gerçekleştirilmesi
sim('kundurm1p')

% Sayısal performans değerlendirmesi için dataların hesaplandığı bölüm
fss=(length(Vt)-1)/tstop; %birim zaman başına düşen sayısal data sayısı
df=dt1*fss; %bozucu etki başlangıcına kadar okunan sayısal data
gf=(dt1-3)*fss; %grafiklerin çizdirilmeye başlanacağı sayısal data
tf=tstop*fss; %simülasyon süresi boyunca okunan toplam sayısal data

refVt=[ 0.952 0.9832 0.98587 0.9945 ];

```

```

refdelta=[ -4.3625  -3.1272  -3.0051  -2.0363 ];

refVt=refVt(1,ddegeri);
refdelta=refdelta(1,ddegeri);
refTe=0;
refdw=0;

ITp1(21)=sum(abs(Vt(df+1:tf)-refVt));
ITp1(22)=sum(abs(delta(df+1:tf)-refdelta));
ITp1(23)=sum(abs(Te(df+1:tf)-refTe));
ITp1(24)=sum(abs(dw(df+1:tf)-refdw));
ITAp1=[ITp1(21:24)]

% Çıkış parametrelerinin grafiklerinin çizdirildiği bölüm
figure(1)
switch dplot
case 1
plot(time,Vt,'k')
case 2
plot(time(gf+1:tf),Vt(gf+1:tf),'k')
case 3
plot(time,Vt,'k')%,'k --'
case 4
plot(time(gf+1:tf),Vt(gf+1:tf),'k')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('Vt')
title('Çıkis Gerilimi')
grid on
hold on

figure(2)
switch dplot
case 1
plot(time,delta,'k')
case 2
plot(time(gf+1:tf),delta(gf+1:tf),'k')
case 3
plot(time,delta,'k')%,'k --'
case 4
plot(time(gf+1:tf),delta(gf+1:tf),'k')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('delta')
title('Güç Açisi Degisimi')
grid on
hold on

figure(3)
switch dplot
case 1

```

```

plot(time,Te,'k')
    case 2
plot(time(gf+1:tf),Te(gf+1:tf),'k')
    case 3
plot(time,Te,'k')%,'k --'
    case 4
plot(time(gf+1:tf),Te(gf+1:tf),'k')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('Te')
title('Elektriksel Moment Degisimi')
grid on
hold on

```

```

figure(4)
switch dplot
case 1
plot(time,dw,'k')
    case 2
plot(time(gf+1:tf),dw(gf+1:tf),'k')
    case 3
plot(time,dw,'k')%,'k --'
    case 4
plot(time(gf+1:tf),dw(gf+1:tf),'k')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('dw')
title('Açısal Hiz Degisimi')
grid on
hold on

```

% *PID kontrolörlü sistem simulasyonu yapan alt program*****

% Ana programdan sistem datalarının okunması

```

K1=durum(1,5);
K2=durum(1,6);
K3=durum(1,7);
K4=durum(1,8);
K5=durum(1,9);
K6=durum(1,10);
Kd=guptapss(1);
f=guptapss(2);
H=guptapss(3);
Tr=guptapss(4);
T3=K3*guptapss(5);%T3=K3*Tdo
Kae=guptapss(7);
Tae=guptapss(8);
Vref=guptapss(9);
wo=2*pi*f;

```

%PID parametrelerinin girilmesi

Kp=0.6;Kde=2.5;Ki=0.1;%ziegler nichols yöntemiyle bulunan değer

% Sistem simulasyonunun gerçekleştirilmesi
sim('kundurm1pid')

% Sayısal performans değerlendirmesi için dataların hesaplandığı bölüm

fss=(length(Vt)-1)/tstop;

df=dt1*fss;

gf=(dt1-3)*fss;

tf=tstop*fss;

refVt=[0.952 0.9832 0.98587 0.9945];

refdelta=[-4.3625 -3.1272 -3.0051 -2.0363];

refVt=refVt(1,ddegeri);

refdelta=refdelta(1,ddegeri);

refTe=0;

refdw=0;

ITpid1(21)=sum(abs(Vt(df+1:tf)-refVt));

ITpid1(22)=sum(abs(delta(df+1:tf)-refdelta));

ITpid1(23)=sum(abs(Te(df+1:tf)-refTe));

ITpid1(24)=sum(abs(dw(df+1:tf)-refdw));

ITApid1=[ITpid1(21:24)]

% Çıkış parametrelerinin grafiklerinin çizdirildiği bölüm

figure(1)

switch dplot

case 1

plot(time,Vt,'b')

case 2

plot(time(gf+1:tf),Vt(gf+1:tf),'b')

case 3

plot(time,Vt,'b')%,'k --'

case 4

plot(time(gf+1:tf),Vt(gf+1:tf),'b')

end

xlabel('Zaman (saniye)')

ylabel('Vt')

title('Çıkis Gerilimi')

grid on

hold on

figure(2)

switch dplot

case 1

plot(time,delta,'b')

case 2

plot(time(gf+1:tf),delta(gf+1:tf),'b')

case 3

plot(time,delta,'b')%,'k --'

```

    case 4
    plot(time(gf+1:tf),delta(gf+1:tf),'b')
    end
    xlabel('Zaman (saniye)')
    ylabel('delta')
    title('Güç Açısı Degisimi')
    grid on
    hold on

```

```

figure(3)
switch dplot
case 1
plot(time,Te,'b')
    case 2
plot(time(gf+1:tf),Te(gf+1:tf),'b')
    case 3
plot(time,Te,'b')%,'k --'
    case 4
plot(time(gf+1:tf),Te(gf+1:tf),'b')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('Te')
title('Elektriksel Moment Degisimi')
grid on
hold on

```

```

figure(4)
switch dplot
case 1
plot(time,dw,'b')
    case 2
plot(time(gf+1:tf),dw(gf+1:tf),'b')
    case 3
plot(time,dw,'b')%,'k --'
    case 4
plot(time(gf+1:tf),dw(gf+1:tf),'b')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('dw')
title('Açısal Hiz Degisimi')
grid on
hold on

```

```

% ***Klasik Fuzzy kontrolörlü sistem simülasyonu yapan alt program***
% Ana programdan sistem datalarının okunması
K1=durum(1,5);
K2=durum(1,6);
K3=durum(1,7);
K4=durum(1,8);
K5=durum(1,9);

```

```

K6=durum(1,10);
Kd=guptapss(1);
f=guptapss(2);
H=guptapss(3);
Tr=guptapss(4);
T3=K3*guptapss(5);%T3=K3*Tdo
Kae=guptapss(7);
Tae=guptapss(8);
Vref=guptapss(9);
wo=2*pi*f;

% FPSS parametrelerinin okunması
fis1=readfis('m3');
Ke=1;Kde=0.8;Kc1=5;

% Sistem simulasyonunun gerçekleştirilmesi
sim('kundurm1fpss3')

% Sayısal performans değerlendirmesi için dataların hesaplandığı bölüm
fss=(length(Vtf)-1)/tstop;
df=dt1*fss;
gf=(dt1-3)*fss;
tf=tstop*fss;

refVtf=[ 0.952 0.98352 0.98741 0.99475 ];
refdeltaf=[ -4.3625 -3.1275 -3.0117 -2.0364 ];

refVtf=refVtf(1,ddegeri);
%refVt=1
refdeltaf=refdeltaf(1,ddegeri);
refTef=0;
refdwf=0;

IT(71)=sum(abs(Vtf(df+1:tf)-refVtf));
IT(72)=sum(abs(deltaf(df+1:tf)-refdeltaf));
IT(73)=sum(abs(Tef(df+1:tf)-refTef));
IT(74)=sum(abs(dwf(df+1:tf)-refdwf));
ITAf=[IT(71:74)]

% Çıkış parametrelerinin grafiklerinin çizdirildiği bölüm
figure(1)
switch dplot
case 1
plot(timef,Vtf,'r')
case 2
plot(timef(gf+1:tf),Vtf(gf+1:tf),'r')
case 3
plot(timef,Vtf,'r')%,'k --'
case 4
plot(timef(gf+1:tf),Vtf(gf+1:tf),'r')
end

```

```

xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('Vt')
title('Çikis Gerilimi')
grid on
hold on

figure(2)
switch dplot
case 1
plot(timef,deltaf,'r')
case 2
plot(timef(gf+1:tf),deltaf(gf+1:tf),'r')
case 3
plot(timef,deltaf,'r')%,'k --'
case 4
plot(timef(gf+1:tf),deltaf(gf+1:tf),'r')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('delta')
title('Güç Açisi Degisimi')
grid on
hold on

figure(3)
switch dplot
case 1
plot(timef,Tef,'r')
case 2
plot(timef(gf+1:tf),Tef(gf+1:tf),'r')
case 3
plot(timef,Tef,'r')%,'k --'
case 4
plot(timef(gf+1:tf),Tef(gf+1:tf),'r')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('Te')
title('Elektriksel Moment Degisimi')
grid on
hold on

figure(4)
switch dplot
case 1
plot(timef,dwf,'r')
case 2
plot(timef(gf+1:tf),dwf(gf+1:tf),'r')
case 3
plot(timef,dwf,'r')%,'k --'
case 4
plot(timef(gf+1:tf),dwf(gf+1:tf),'r')
end

```

```
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('dw')
title('Açısal Hiz Degisimi')
grid on
hold on
```

```
% ***Hiyerarşik Fuzzy kontrolörlü sistem simulasyonu yapan alt program***
```

```
% Ana programdan sistem datalarının okunması
```

```
K1=durum(1,5);
K2=durum(1,6);
K3=durum(1,7);
K4=durum(1,8);
K5=durum(1,9);
K6=durum(1,10);
Kd=guptapss(1);
f=guptapss(2);
H=guptapss(3);
Tr=guptapss(4);
T3=K3*guptapss(5);%T3=K3*Tdo
Kae=guptapss(7);
Tae=guptapss(8);
Vref=guptapss(9);
wo=2*pi*f;
```

```
% Hiyerarşik FPSS parametrelerinin okunması
```

```
fis1=readfis('m31');
Ke=1;Kde=0.8;
fis2=readfis('nffis2');
Kf=0.4;Kg=0.3;Kc2=2.5;
```

```
% Sistem simulasyonunun gerçekleştirilmesi
```

```
sim('hfpssvt')
```

```
% Sayısal performans değerlendirmesi için dataların hesaplandığı bölüm
```

```
fss=(length(Vth)-1)/tstop;
df=dt1*fss;
gf=(dt1-3)*fss;
tf=tstop*fss;
```

```
refVth=[ 0.94941 0.98386 0.98792 0.99209 ];
refdeltah=[ -4.3507 -3.1325 -3.008 -2.0299 ];
```

```
refVth=refVth(1,ddegeri);
```

```
%refVt=1
```

```
refdeltah=refdeltah(1,ddegeri);
```

```
refTeh=0;
```

```
refdwh=0;
```

```
ITh(81)=sum(abs(Vth(df+1:tf)-refVth));
```

```
ITh(82)=sum(abs(deltah(df+1:tf)-refdeltah));
```

```
ITh(83)=sum(abs(Teh(df+1:tf)-refTeh));
```

```
ITh(84)=sum(abs(dwh(df+1:tf)-refdwh));
ITA3=[ITh(81:84)]
```

% Çıkış parametrelerinin grafiklerinin çizdirildiği bölüm

```
figure(1)
switch dplot
case 1
plot(timeh,Vth,'g')
    case 2
plot(timeh(gf+1:tf),Vth(gf+1:tf),'g')
    case 3
plot(timeh,Vth,'g')%,'k --'
    case 4
plot(timeh(gf+1:tf),Vth(gf+1:tf),'g')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('Vt')
title('Çıkış Gerilimi')
legend('cpss','fuzzypss','hfpss',0)
grid on
hold on
```

```
figure(2)
switch dplot
case 1
plot(timeh,deltah,'g')
    case 2
plot(timeh(gf+1:tf),deltah(gf+1:tf),'g')
    case 3
plot(timeh,deltah,'g')%,'k --'
    case 4
plot(timeh(gf+1:tf),deltah(gf+1:tf),'g')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('delta')
title('Güç Açısı Değişimi')
legend('cpss','fuzzypss','hfpss',0)
grid on
hold on
```

```
figure(3)
switch dplot
case 1
plot(timeh,Teh,'g')
    case 2
plot(timeh(gf+1:tf),Teh(gf+1:tf),'g')
    case 3
plot(timeh,Teh,'g')%,'k --'
    case 4
plot(timeh(gf+1:tf),Teh(gf+1:tf),'g')
end
```

```
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('Te')
title('Elektriksel Moment Degisimi')
legend('cpss','fuzzypss','hfpss',0)
grid on
hold on

figure(4)
switch dplot
case 1
plot(timeh,dwh,'g')
case 2
plot(timeh(gf+1:tf),dwh(gf+1:tf),'g')
case 3
plot(timeh,dwh,'g')%,'k --'
case 4
plot(timeh(gf+1:tf),dwh(gf+1:tf),'g')
end
xlabel('Zaman (saniye)')
ylabel('dw')
title('Açısal Hiz Degisimi')
legend('cpss','fuzzypss','hfpss',0)
grid on
hold on
```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 20.05.1972

Doğum yeri Afyon

Lise 1986-1989 Afyon Lisesi

Lisans 1989-1994 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1995-1997 Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Anabilim Dalı

Doktora 1999-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı