

ENERJİ SİSTEMLERİNDE BULANIK MANTIK
TEMELLİ GÜÇ SİSTEMİ KARARLILAŞTIRICISI
UYGULAMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seçil VARBAK NEŞE

DANIŞMAN

Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ocak 2008

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİNDE BULANIK MANTIK TEMELLİ GÜÇ SİSTEMİ
KARARLILAŞTIRICISI UYGULAMALARI

Seçil VARBAK NEŞE

DANIŞMAN
Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Ocak 2008

ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Hasan ÇİMEN danışmanlığında,
Seçil VARBAK NEŞE tarafından hazırlanan

ENERJİ SİSTEMLERİNDE BULANIK MANTIK TEMELLİ GÜÇ SİSTEMİ KARARLILAŞTIRICISI UYGULAMALARI

başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri
uyarınca

/ /2008

tarihinde aşağıdaki jüri tarafından

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında

Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

	Ünvanı, Adı, SOYADI	İmza
Başkan	Prof. Dr. Süleyman TAŞGETİREN	
Üye	Prof. Dr. Hasan ÇİMEN	
Üye	Yrd. Doç. Dr. Uçman ERGÜN	

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Zehra BOZKURT

Enstitü Müdürü

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİNDE BULANIK MANTIK TEMELLİ GÜÇ SİSTEMİ KARARLILAŞTIRCISI UYGULAMALARI

Seçil VARBAK NEŞE

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

Son zamanlarda artan güç talebinden ve kesintisiz güç ihtiyacından dolayı güç sistemlerinin enterkonnekte bağlantıları genişlemektedir. Yeni teknolojilerin kullanımından dolayı güç sistemlerinin karmaşıklıkları artmaktadır. Minimum maliyetle kaliteli enerji üretmek için güç sistemlerinin kararlılık sınırlarına yakın çalışmaları gerekmektedir.

Güç sistemlerinin enterkonnekte bağlantısında güç üretimi ve talebi arasındaki dengesizlikler generatörlerin senkronizasyonunu ve kararlılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Çeşitli sebeplerden dolayı açısız hızda ve rotor açısında salınımlar meydana gelmektedir. Düşük frekanslı salınımlar olarak tanımlanan bu salınımlar uygun sönüm elde edilemezse dakikalarca devam edebilmekte ve sistem ayrılmalarına neden olacak kadar artabilmektedir. Güç sisteminin dinamik kararlılığını iyileştirmek ve bozulmalardan kaynaklanan düşük frekanslı salınımları söndürmek için ek uyartım kontrolü sinyallerinin kullanımı üzerine birçok araştırma yapılmış ve yapılmaktadır.

Bu çalışmada bulanık mantık PID (BPID) kontrol yöntemi tek makinalı sonsuz baralı sistemde Güç Sistemi Kararlı Kılıcısına (GSKK) uygulanmıştır. Simülasyon çalışmalarıyla BPID kontrol performansı Klasik GSKK (KGSKK), PID denetleyici, Bulanık Mantık (BM) denetleyici ile karşılaştırılmıştır. BPID denetleyici ile en iyi performans elde edilmiştir.

2008, 125 sayfa

Anahtar kelimeler: Güç sistemi kararlı kılıcısı, Bulanık mantık kontrol, Bulanık PID kontrol, PID kontrol, Tek makineli sonsuz baralı sistem.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

APPLICATIONS OF FUZZY LOGIC BASED POWER SYSTEM STABILIZER IN POWER SYSTEMS

Seçil VARBAK NEŞE

Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric Education

Supervisor: Prof. Dr. Hasan ÇİMEN

Due to recently increasing power demand and necessity of uninterrupted power, interconnected structures of power systems have been enlarged. As a result of using new technologies, complexity of power systems is increased. In order to produce quality electrical energy with minimum cost, power systems must be operated close to their stability limits.

Unbalances between power generation and demand in interconnected power systems negatively affect synchronization and stability of generators. The oscillations in angular speed and rotor angle are occurred because of various reasons. If adequate damping can not be produced, these oscillations known as low frequency oscillations may be sustained for minutes and grow to cause system separation. For improving dynamic stability of power system and damping of low frequency oscillations because of breakdown, a number of studies on using of supplementary excitation control signal were performed and are performed.

In this study Fuzzy Logic PID (FPID) control method was applied to Power System Stabilizer (PSS) on one machine infinite bus system. FPID control performance was compared with Conventional PSS (CPSS), PID controller and Fuzzy Logic (FL) controller by simulation studies. The best performance was obtained with FPID controller.

2008, 125 pages

Keywords: Power system stabilizer, Fuzzy logic control, Fuzzy PID control, PID control, Single machine infinite bus system.

TEŞEKKÜR

Yapmıő olduğum yüksek lisans alıőmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hasan İMEN'e, bilgi ve gürüőlerini esirgemedi benimle paylaőan Sayın Yrd. Doç. Dr. Murat CANER'e ve burada adlarımı sayamadığım bilgi, kaynak ve gürüőleriyle her zaman yardımcı olmaya çalışan tüm hocalarıma ve arkadaőlarıma sonsuz sayđı ve teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarımda her zaman destek olan eőim İsmail NEŞE'ye, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Nermin VARBAK baőta olmak üzere tüm aileme en içten sayđı ve teőekkürlerimi sunarım.

Seçil VARBAK NEŞE

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XV
ÇİZELGELER DİZİNİ	XVIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Elektrik Güç Sistemlerinin Tarihi Gelişimi	11
2.2 Güç Sisteminin Yapısı	13
2.2.1 Türkiye'deki güç sisteminin yapısı	17
2.3 Senkron Generatörler	17
2.4 Uyartım Sistemleri	25
2.4.1 Uyartım sistemi çeşitleri	26
2.4.1.1 DC uyartım sistemleri	27
2.4.1.2 AC uyartım sistemleri	27
2.4.1.3 Statik uyartım sistemleri	29
2.5 Uyartım Kontrol Sistemi	31
2.5.1 Otomatik gerilim regülatörü (OGR)	33
2.5.2 Güç sistemi kararlı kılıcısı (GSKK)	34
2.6 Güç Sistemlerinde Kararlılık	35
2.6.1 Kararlılığın sınıflandırılması	37
2.6.1.1 Rotor açısı kararlılığı	38
2.6.1.2 Gerilim kararlılığı	43
2.6.1.3 Orta-süreli ve uzun-süreli kararlılık	45
2.7 Modelleme	46
2.7.1 Senkron makinanın dinamik modellenmesi	47
2.7.2 Salınım denklemi	63

2.7.3	Klasik model (salınım denklemleri modeli)	65
2.7.4	Geçici hal reaktansı (X'_d) arkasındaki değişken gerilim (E'_q) modeli- OGR'siz	69
2.7.5	Geçici hal reaktansı (X'_d) arkasındaki değişken gerilim (E'_q) modeli- OGR'li	71
2.8	Kontrol Yöntemleri	72
2.8.1	PID kontrol	72
2.8.2	Bulanık mantık (BM)	76
2.8.2.1	Bulanık kümeler	76
2.8.2.2	Üyelik fonksiyonları	77
2.8.3	Bulanık mantık kontrol (BMK)	78
2.8.3.1	Bulanıklaştırma	79
2.8.3.2	Bilgi tabanı	79
2.8.3.3	Karar verme birimi	80
2.8.3.4	Durulama	81
2.8.4	Bulanık modelleme çeşitleri	82
2.8.4.1	Mandani tipi bulanık modelleme	83
2.8.4.2	Sugeno tipi bulanık modelleme	83
2.8.4.3	Sugeno ve Mandani yöntemlerinin karşılaştırılması	85
2.8.5	Bulanık PID (BPID) kontrol	85
3.	MATERYAL VE METOT	87
3.1	Model ve Simülasyon Parametreleri	87
3.2	Klasik GSKK (KGSKK)	89
3.3	PID Denetleyicinin Tasarlanması	90
3.4	Bulanık Mantık Denetleyicinin (BMD) Tasarlanması	91
3.5	Bulanık PID (BPID) Denetleyicinin Tasarlanması	94
4.	BULGULAR	97
4.1	Ek Denetleyici İçermeyen SMIB Sistem Simülasyonu	97
4.2	KGSKK'lı SMIB Sistem Simülasyonu	99
4.3	PID Denetleyicili SMIB Sistem Simülasyonu	101

4.4	Bulanık Mantık Denetleyicili SMIB Sistem Simülasyonu	104
4.5	BPID Denetleyicili SMIB Sistem Simülasyonu	106
4.6	Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	111
5. TARTIŞMA VE SONUÇ		115
6. KAYNAKLAR		116
6.1	İnternet Kaynakları	125
7. ÖZGEÇMİŞ		126
8. EKLER		127
EK-1	Çalışmada kullanılan gskk adlı yazılım	127

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

M	Açısal momentum
i	Akım
E_I	Alan akımına (i_{fd}) orantılı gerilim
K_4	Alan halkalama akıları değişiklikleri için yük açısındaki değişmelerle ilgili katsayıdır
E_q'	Alan halkalama akılarına (ψ_{fd}) orantılı gerilim
P_f	Alan kutuplarının sayısı
J	Atalet momenti
J	Performans indeksi
H	Atalet sabiti
r	Bobin direnci
T_{d0}'	d eksenli geçici hal açık devre zaman sabiti
T_d'	d eksenli geçici hal kısa devre zaman sabiti
T_{d0}''	d eksenli geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti
L_d''	d eksenli geçici hal öncesi endüktansı
T_d''	d eksenli geçici hal öncesi kısa devre zaman sabiti
L_d	d eksenli senkron endüktansı
L_d'	d eksenli geçici hal endüktansı
K_D	D sönüm momenti katsayısıdır
E	Dönen kütlede depolanan kinetik enerji
$i_d, i_q, i_{fd}, i_{kd}, i_{kq1}$	dq düzlemi akımları
$R_a, v_q, R_{fd}, R_{kd}, R_{kq1}$	dq düzlemi dirençleri
$L_d, L_q, L_{ffd}, L_{kkd}, L_{kkq1}, L_{md}, L_{mq}$	dq düzlemi endüktansları
$V_d, V_q, V_{fd}, V_{kd}, V_{kq1}$	dq düzlemi gerilimleri

$\Psi_d, \Psi_q, \Psi_{fd}, \Psi_{kd}, \Psi_{kq1}$	dq düzlemi halkalama akıları
θ	Elektriksel açı
K_3	Empedans katsayısı
e_1	Endüklenen gerilim
L	Endüktans
e_i	Faraday kanununa göre endüklenen gerilim
f	Frekans
δ_g	Generatör iç açısı
E_g	Generatör iç EMK'sı
δ_h	Generatör ve motorun uç gerilimleri arasındaki açı farkı
P_e	Generatörden motora iletilen güç
v	Gerilim
Ψ	Halkalama akısı
e	Hata
n	Hız (dev/dk)
δ	İki makinanın rotorları arasındaki açısal fark
X_h	İletim hattı reaktansı
K_i	İntegral kontrol katsayısı
G	Makina gücü
ϕ	Manyetik akı
θ_m	Mekanik açı
E_m	Motor iç EMK'sı
δ_m	Motorun iç açısı
K_p	Oransal kontrol katsayısı
T_{q0}'	q eksenli geçici hal açık devre zaman sabiti
L_q'	q eksenli geçici hal endüktansı
T_q'	q eksenli geçici hal kısa devre zaman sabiti

T_{q0}''	q eksenli geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti
L_q''	q eksenli geçici hal öncesi endüktansı
T_q''	q eksenli geçici hal öncesi kısa devre zaman sabiti
L_q	q eksenli senkron reaktansı
i_f, i_{kd}, i_{kq1}	Rotor devresi akımları
r_f, r_{kd}, r_{kq1}	Rotor devresi dirençleri
v_f, v_{kd}, v_{kq1}	Rotor devresi gerilimleri
$\Psi_f, \Psi_{kd}, \Psi_{kq1}$	Rotor devresi halkalama akıları
w_0	Senkron hız
K_S	Senkronlama momenti katsayısı
K_1	Senkronlama momenti katsayısı
N	Sipir sayısı
K_2	Sonuç elektrik momentindeki değişiklikler için alan halkalama akılarında ilgili değişikliklerin katsayısı
i_a, i_b, i_c	Stator devresi akımları
r_a, r_b, r_c	Stator devresi dirençleri
v_a, v_b, v_c	Stator devresi gerilimleri
Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c	Stator devresi halkalama akıları
p	Türev işlemi (d/dt)
K_d	Türevsel kontrol katsayısı
E_0	Uygulanan alan gerilimine orantılı gerilim
T_3	Yükte alan zaman sabiti

2. Kısaltmalar

ABGSKK	Ayarlamalı BGSKK
ANFIS	YSA ile On-line Ayarlanan BGSKK
GSKK	
AT	Akım Transformatörü
BGSKK	Bulanık Mantık GSKK
BM	Bulanık Mantık
BMK	Bulanık Mantık Kontrol
BPID	Bulanık Mantık PID
DKGSKK	Dijital Klasik GSKK
DSP	Dijital Sinyal İşleyici
EMK	Elektromotor Kuvvet
EYG	Ekstra Yüksek Gerilim
GA	Genetik Algoritmalar
GSKK	Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı
GT	Gerilim Transformatörü
GTK	Genelleştirilmiş Tahmin Edici Kontrol
HGSKK	Hibrit GSKK
KGSKK	Klasik GSKK
LME	Lineer Matris Eşitsizlikleri
MISO	İki Girişli Tek Çıkışlı
MMK	Manyetomotor Kuvvet
OGR	Otomatik Gerilim Regülatörü
OÜK	Otomatik Üretim Kontrolü
PI	Oransal-İntegral
PID	Oransal-İntegral-Türevsel
SBGSKK	YSA Ayarlamalı BGSKK
SMIB	Tek Makinalı Sonsuz Baralı
SOGSKK	Otomatik Örgütlemeli GSKK
UABGSKK	Uyarlamalı Ağ Temelli BGSKK
UBGSKK	Uyarlamalı BGSKK

UGSKK	Uyarlamalı GSKK
Üİ	Üretim İstasyonu
YG	Yüksek Gerilim
YGDA	Yüksek Gerilim Doğru Akım
YMA	Yerel Model Ağı
YSA	Yapay Sinir Ağları

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No	
Şekil 2.1	Güç sisteminin temel elemanları	14
Şekil 2.2	Alternatör ve türbin arasındaki bağlantı diyagramı	18
Şekil 2.3	Üç fazlı senkron makinanın şematik diyagramı	18
Şekil 2.4	Döner endüvili (a), duran endüvili (b) alternatörler	20
Şekil 2.5	Süreksiz söndürücülü (a) ve süreksiz söndürücülü (b) çıkıntılı kutuplu rotorun yapısı	21
Şekil 2.6	Silindirik rotor yapısı	22
Şekil 2.7	Silindirik rotorda akım yolları	23
Şekil 2.8	Bir bobin tarafından oluşturulan(a) ve birden fazla bobin tarafından oluşturulan (b) MMK dalga şekli	24
Şekil 2.9	DC uyartım sistemi	27
Şekil 2.10	Alan kontrollü alternatör doğrultuculu uyartım sistemi	28
Şekil 2.11	Alternatör kaynaklı kontrollü doğrultuculu uyartım sistemi	28
Şekil 2.12	Fırçasız uyartım sistemi	29
Şekil 2.13	Gerilim kaynaklı kontrollü doğrultuculu uyartım sistemi	30
Şekil 2.14	Bileşik kaynaklı doğrultuculu uyartım sistemi	30
Şekil 2.15	Generex bileşik kontrollü doğrultuculu uyartım sistemi	31
Şekil 2.16	Senkron generatör uyartım kontrolü sisteminin fonksiyonel blok diyagramı	32
Şekil 2.17	OGR sistemi için ek kontrol döngüsü blok diyagramı	34
Şekil 2.18	GSKK'nın temel elemanları	35
Şekil 2.19	Güç sistemi kararlılığının sınıflandırılması	38
Şekil 2.20	İki makinalı bir sistemin güç iletim modeli	39
Şekil 2.21	Küçük bozulma cevabının özelliği	42
Şekil 2.22	Senkron makinanın idealleştirilmiş gösterimi	48
Şekil 2.23	Tek uyartımlı manyetik devre	49
Şekil 2.24	dq koordinat düzleminde makina	52
Şekil 2.25	d eksen (a) ve q eksen (b) eşdeğer devreleri	54
Şekil 2.26	Hareket denklemi modeli	63
Şekil 2.27	Sonsuz baraya X_E reaktansı üzerinden bağlı senkron generatör	65

Şekil 2.28	Klasik generatör modeli ile SMIB sistemin blok diyagram modeli	67
Şekil 2.29	Klasik generatör modeli ile SMIB sistemin sadeleştirilmiş blok diyagram modeli	68
Şekil 2.30	E_{fd} sabiti ile SMIB sistemin blok diyagram modeli	69
Şekil 2.31	OGR'li ve uyarıcılı SMIB sistem blok diyagram modeli	71
Şekil 2.32	PID kontrol blok diyagramı	73
Şekil 2.33	Değişik üyelik fonksiyonları	77
Şekil 2.34	BM denetleyici prensip tasarımı	79
Şekil 2.35	BPID denetleyici modeli	86
Şekil 3.1	Lineerleştirilmiş SMIB sistem modeli	87
Şekil 3.2	KGSKK'lı SMIB sisteminin blok diyagram modeli	89
Şekil 3.3	KGSKK modeli	89
Şekil 3.4	PID denetleyicili SMIB sistemin blok diyagram modeli	91
Şekil 3.5	BM denetleyicili SMIB sistemin blok diyagram modeli	92
Şekil 3.6	$\Delta\omega$ giriş değişkeni(a), $p\Delta\omega$ giriş değişkeni (b), çıkış değişkenin(c) üyelik fonksiyonları	92
Şekil 3.7	BPID denetleyicili SMIB sistemin blok diyagram modeli	94
Şekil 4.1	1. çalışma durumuna göre ilave denetleyici içermeyen SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	97
Şekil 4.2	2. çalışma durumuna göre ilave denetleyici içermeyen SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	97
Şekil 4.3	3. çalışma durumuna göre ilave denetleyici içermeyen SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	98
Şekil 4.4	1. çalışma durumuna göre KGSKK'lı SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	99
Şekil 4.5	2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	99
Şekil 4.6	3. çalışma durumuna göre KGSKK'lı SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	100
Şekil 4.7	1. çalışma durumuna göre PID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	101

Şekil 4.8	2. çalışma durumuna göre PID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	101
Şekil 4.9	3. çalışma durumuna göre PID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	102
Şekil 4.10	2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve PID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	103
Şekil 4.11	1. çalışma durumuna göre BM denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	104
Şekil 4.12	2. çalışma durumuna göre BM denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	104
Şekil 4.13	3. çalışma durumuna göre BM denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	105
Şekil 4.14	2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve BM denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	106
Şekil 4.15	1. çalışma durumuna göre BPID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	107
Şekil 4.16	2. çalışma durumuna göre BPID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	107
Şekil 4.17	3. çalışma durumuna göre BPID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	108
Şekil 4.18	2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve BPID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	109
Şekil 4.19	2. çalışma durumuna göre Chung vd.(1999) tarafından gerçekleştirilen ve bu çalışmada gerçekleştirilen BPID denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	110
Şekil 4.20	1. çalışma durumuna göre 4 farklı denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	111
Şekil 4.21	2. çalışma durumuna göre 4 farklı denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	112
Şekil 4.22	3. çalışma durumuna göre 4 farklı denetleyicili SMIB sisteme ait simülasyon sonuçları	113

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa No
Çizelge 2.1	Kapalı çevrim sistemde K_p , K_i ve K_d denetleyicilerin etkisi	75
Çizelge 3.1	Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri	87
Çizelge 3.2	Simülasyonda kullanılan çalışma durumlarına ait parametreler	88
Çizelge 3.3	KGSKK parametreleri	89
Çizelge 3.4	Ziegler-Nichols kuralları(frekans cevabı metodu)	90
Çizelge 3.5	KGSKK'lı SMIB sistem simülasyonundan elde edilen değişim aralıkları	93
Çizelge 3.6	BM denetleyici kural tablosu	93
Çizelge 3.7	K_p kural tablosu	95
Çizelge 3.8	K_i kural tablosu	95
Çizelge 3.9	K_d kural tablosu	96
Çizelge 4.1	İlave denetleyici içermeyen SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	98
Çizelge 4.2	KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	100
Çizelge 4.3	PID denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	102
Çizelge 4.4	PID denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	103
Çizelge 4.5	BM denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	105
Çizelge 4.6	BM denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	106
Çizelge 4.7	BPID denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	108
Çizelge 4.8	BPID denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri	109

Çizelge 4.10 4 farklı denetleyicili SMIB sistem modeline ait
performans indeksleri

114

1. GİRİŞ

Enterkonnekte bağlantıların gelişmesinden ve yeni teknolojilerin kullanılmasından dolayı güç sistemlerinin karmaşıklığı sürekli artmaktadır. Mali ve düzenleyici sınırlamalar sistemlerin kararlılık sınırlarına yakın çalışmasını gerektirmektedir. İşte bu iki faktör yeni kararlılık problemleri meydana getirmektedir. Sistem güvenliğini geliştirmek, ekonomik tasarımı kolaylaştırmak ve daha esnek sistem çalışması sağlamak için özel kontrol yardımları kullanılmaktadır (Kundur 1993). Enterkonnekte güç sistemindeki tüm generatörler iki temel kontrol döngüsüyle kontrol edilmektedir. Bu döngüler Otomatik Üretim Kontrolü (OÜK) ve Otomatik Gerilim Regülatörleridir (OGR). OÜK güç dengelemesinden sorumludur, OGR ise uyarım kontrolü ile terminal gerilimini regüle etmektedir (Ramdan ve Smaili 1988).

Elektrik güç sistemlerinin enterkonnekte bağlantısının gelişmesinden dolayı düşük frekanslarda oluşan sistem salınımları vardır. Bu yavaş salınımlar sistem ayrılmasına neden olacak şekilde büyüebilmektedir. Bu salınımların sistemlerin yavaş mekanik modlarının yeterli sönümünün kaybolmasından kaynaklandığı bilinmektedir. İstenen ek sönüm Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK) olarak bilinen OGR döngüsüne ek kontrol döngüsüyle sağlanmaktadır (Radman ve Smaili 1988). Birçok durumda GSKK yük bozulmaları ya da kısa devre arızaları vb. ile oluşan salınımların azaltılması için gereklidir. GSKK'nın temel fonksiyonu güç açısı, zayıf iletim ve yük karakteristikleri gibi faktörlerin ve uyarım kontrolünün neden olduğu negatif sönüm momentinin etkisini yok etmek ya da azaltmak için sönüm momenti sağlamaktır (Caner 2006).

Ayrıca gelişen bilgisayar teknolojisi, sayısal analiz, kontrol teorisi ve cihaz modelleme analitik araçların iyileştirilmesine ve daha iyi sistem tasarım prosedürlerine katkıda bulunmuştur (Kundur 1993). Bir güç sistemi doğal olarak nonlineerdir. Böyle nonlineer sistemler için denetleyici tasarlanmanın en genel yöntemi güç sistemi denklemlerini çalışma noktası civarında lineerleştirmektir (Gu ve Bollinger 1989). GSKK tasarımı için belirli bir çalışma noktası civarında lineerize edilmiş sistem modeli kullanılmaktadır. Basit bir yapıya sahip Klasik GSKK (KGSKK)'da sabit parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler belirli bir çalışma noktası civarında ayarlandığından bu nokta civarında iyi

bir performansa sahiptirler. Bu çalışma durumu dışında optimum performansı garanti etmemektedirler. Bununla beraber hatanın ve türevinin lineer kombinasyonlarını kullanarak çalışan kararlı kılıcılar nonlinearlığı yüksek olan güç sistemlerinde çok iyi sonuç vermeyebilmektedirler (Caner 2006).

Bu çalışmada enerji üretimi kontrollerinden uyartım kontrolünün performansını artırmak için kullanılan kontrol yöntemleri araştırılmıştır. Farklı kontrol yöntemleri ile Tek Makinalı Sonsuz Baralı (SMIB) sistemin matematiksel modelinin davranışı incelenmiştir. İlave denetleyici içermeyen, KGSKK, Oransal İntegral Türevsel (PID), Bulanık Mantık (BM) ve Bulanık Mantık PID (BPID) denetleyicileri içeren SMIB sistemin matematiksel modelinin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Farklı kontrol yöntemleri ile kontrol edilen SMIB sistemin yük açısı değişimi ve hız değişimi hem grafiklerle hemde sayısal verilerle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde çalışmanın amacı anlatılmıştır. İkinci bölümünde bu konu üzerine günümüze kadar yapılan çalışmalar, güç sistemlerinin gelişimi, yapısı, senkron generatörler, uyartım sistemleri, uyartım kontrol sistemleri, güç sistemlerinde kararlılık, matematiksel modelleme, kontrol yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde kullanılan model ve parametreleri, kontrol yöntemlerinin tasarlanması anlatılmıştır. Son bölümde ise elde edilen grafikler ve sayısal sonuçlara göre hangi kontrol yönteminin daha etkili olduğu gösterilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Güç sistemlerinin gelişmesi ve artan kaliteli elektrik talebi ile modern kontrol tekniklerinin kullanımı gerekli olmuştur (Zhang vd. 1993). GSKK'ların tasarımdan çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Salınımı kararlılaştırma sistem modları için ek uyarım denetleyicilerinin ayarlanması üzerine son 30-35 yıldır birçok araştırma yapılmıştır (Gupta vd. 2002).

Radman ve Smaili (1988) tarafından senkron generatörün uyarım kontrolü PID kontrolle gerçekleştirilmiştir. Bu PID denetleyicilerde farklı olarak hem generatör frekansını hem de gerilim değişimlerini kullanarak uyarım kontrolü için ek bir sinyal üretilmiştir. PID kazançları her iki giriş sinyali içinde tam kutup yerleşimi için hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen PID GSKK sonsuz baraya bağlı bir senkron makinanın simülasyonu ile KGSKK ile karşılaştırılmış ve PID kararlı kılıcının belirgin şekilde daha iyi sönüm gerçekleştirdiği görülmüştür.

Gu ve Bollinger (1989) tarafından otomatik ayarlamalı GSKK tanıtılmış ve verimliliğini göstermek için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Genelleşmiş minimum değişimli otomatik ayarlamalı regülatör ile GSKK gerçekleştirilmiş. Simülasyonlar çalışmaları bir çalışma kararlılığı için yapılmıştır. Tüm çalışma koşulları için otomatik ayarlamalı GSKK'nın etkin bir şekilde salınımları azalttığı görülmüştür.

Reza ve Choudhry (1990) tarafından kapalı çevrim hassasiyetini kullanarak AC güç sisteminin dinamik kararlılığını iyileştirmek için yeni bir GSKK tasarım yöntemi kullanılmıştır. Kararlı kılıcı sinyal olarak rotor hızı ve açısı kullanılmıştır. Sonsuz baraya bir iletim hattı üzerinden bağlı %50 statik ve %50 dinamik yüklü bir makina incelenmiştir. Statik yük baraya yük geriliminin nonlineer bir fonksiyonu olarak; dinamik yük eşdeğer asenkron motor yükü karakteristiklerine göre kapalı çevrim sistemin elektromekanik modunun özdeğer hassasiyetine dayanarak seçilmiştir. Generatör modeli için statik uyarıcı 5. dereceden model kullanılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçlarından gerçekleştirilen Oransal İntegral (PI) GSKK'nın yük karakteristiklerine hassas ve dayanıklı olduğu sonucu elde edilmiştir.

Mao vd. (1990) tarafından lineer optimum kontrole dayanan bir Uyarlamalı GSKK (UGSKK) uygulaması gerçekleştirilmiştir. 3 kVA, 210V'luk mikro alternatörün beslediği 500kV, 300 km.'lik bir iletim hattı devresinden oluşan laboratuvar modeli ile amaçlanan optimum denetleyicinin performansı deneysel çalışmalarla gözlenmiştir. Bu uygulama tanımlama, kontrol ve insan-makina ara yüzü için ayrı işlemciler kullanan çoklu bir işlemci kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan bu UGSKK'nın sistem salınımlarını söndürmede çok etkili olduğu görülmüştür.

Pahalawaththa ve Annakkage (1991) tarafından senkron generatörlerin nonlineer çalışmalarını kompanze etmek için bir optimum GSKK tasarlanmıştır. Denetleyicinin optimum durum geri besleme kazançları farklı model parametreleri için hesaplanmış ve çalışma durumuna göre listelenmiştir. Kazanç listelemeli denetleyicinin geçici hal ve dinamik koşullar için performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlardan özellikle küçük geri ve ileri güç katsayısı koşulları için kazanç listeleme kontrolü kullanılarak daha iyi performans elde edileceği görülmüştür.

Shi vd. (1992) tarafından geniş bir çalışma aralığında iyi bir dinamik performans elde etmek için Bulanık Mantık GSKK (BGSKK) gerçekleştirilmiştir. Çalışmada İki Girişli Tek Çıkışlı (MISO) bulanık kontrol kullanılmıştır. BGSKK giriş sinyalleri olarak hız ve hızın türevi kullanılmıştır. Bir taramalı tablo yerine sistem dinamik performansında iyi hassasiyet sağlayan iki taramalı tablo kullanılmıştır. Simülasyon çalışması için $0.02+j.0.4$ pu empedanslı iletim hattı üzerinden sonsuz baraya bağlanan tek makinalı sistem modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarından BGSKK'nın KGSKK'ya göre daha iyi dinamik cevap sağladığı görülmüştür.

Hiyama vd.(1993) tarafından gerçek zamanlı kontrolde verimini incelemek için 525 MVA'lık hidro-generatörde BGSKK gerçekleştirilmiştir. Generatörün hızını belirlemek için gerçek gücü örneklenmiştir. İstenen kararlı kılıcı sinyal basit Bulanık Mantık Kontrol (BMK) kuralları ile mikro-bilgisayarda hesaplanmıştır. Çeşitli bozulmalar için amaçlanan BGSKK ve Dijital Klasik GSKK (DKGSKK) karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarından BGSKK ve DKGSKK tarafından gerçekleştirilen sönümler

karşılaştırıldığında çeşitli bozulmalarda BGSKK'nın sistem sönümünü çok iyi gerçekleştirdiği görülmüştür.

Hiyama (1993) tarafından geniş bir çalışma alanında optimum performans sağlamak için gerçek zamanlı ayarlama amacıyla Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanan bir BGSKK gerçekleştirilmiştir. Nonlineer simülasyon çalışmalarında SMIB sistemin matematiksel modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarından çeşitli bozulmalar için amaçlanan denetleyicinin verimliliği görülmüştür. Deneysel çalışma için 7kW 710V'luk DC motor, 5kVA 220V 60Hz.'lik senkron generatör ve 220V 60Hz.'lik AC sisteme bağlantı için küçük boyutlu iletim hattı kullanılarak bir mikro-makina sistemi oluşturulmuştur. Mikro-makina seti için mikro-bilgisayarla BGSKK uygulaması gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları deneyler sonuçlarıyla teyit edilmiştir. Ayrıca çalışmalardan YSA ile gerçekleştirilen BGSKK'nın otomatik ayarlamalı kararlı kılıcılardan daha az hesaplama zamanı gerektirdiği görülmüştür.

Zhang vd. (1993) tarafından YSA'nın hızlı cevabını ve kendi kendini optimize eden kutup değiştirme ayarlamalı kontrol stratejisinin avantajlarını birleştiren bir GSKK gerçekleştirilmiştir. Popüler bir YSA çeşidi olan hata geri-yayımlı öğrenme metodu ile çok katlı algı kullanılmıştır. YSA UGSKK ile eğitilmiştir. Sonuçta YSA GSKK'dan UGSKK ile aynı cevap elde edilmiştir. Ancak daha hızlı cevap verdiği ve hesaplama zamanının ihmal edilebildiği gözlenmiştir. Simülasyon sonuçlarından YSA GSKK'nın özellikle birinci salınım için çok iyi sönüm üretebildiği gözlenmiştir.

Hassan ve Malik (1993) tarafından elektrik güç sisteminin kararlılığını iyileştirmek için BM temelli otomatik denetleyici uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kararlı kılıcı sinyal generatör hızından ve onun türevinden hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen kararlı kılıcının performansı kişisel bilgisyara monte edilen Dijital Sinyal İşleyici (DSP) ile gerçekleştirilmiştir. Güç sisteminin fiziksel modelinde çeşitli gerçek zamanlı testler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen GSKK, KGSKK'yla karşılaştırılmış ve sönüm salınımlarında güçlü etkiye sahip olduğu, gerçek zamanda parametre tanımlaması gerektirmediği, çok daha basit algoritmaya sahip olduğu ve dayanıklı olduğu görülmüştür.

Chen vd. (1993) tarafından otomatik optimizasyonlu kutup değiştirmeli kontrol stratejisini kullanan UGSKK gerçekleştirilmiş ve güç sistemine uygulanmıştır. Sistemin tanımlanmış modeline dayanan kontrol verileri performans kriterini minimize etmek için z-domenindeki birim daire içerisinde bazı optimum yerleştirmeler için sistemin kapalı çevrim kutuplarının yerini değiştiren bir algoritmayla hesaplanmıştır. Test sonuçlarından gerçekleştirilen UGSKK'nın geniş bir frekans aralığında iyi bir sönüm sağladığı ve g sisteminin dinamik performansını iyileştirdiği görülmüştür. Ayrıca dinamik ve geçici hal kararlılık sınırı arttırılmıştır.

Hiyama vd. (1994) tarafından generatör hızının PID bilgisini kullanan bir ileri BMK gerçekleştirilmiştir. Deneyler için 5kVA'lık mikro-makina, gerçek 5MVA'lık hidro-makina kullanılmıştır. Ayrıca SMIB sistemde çeşitli büyük bozulmalar için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen Uyarlamalı BGSKK (UBGSKK), BGSKK ve analog tip KGSKK ile karşılaştırılmıştır. Sabit parametrelerle gerçekleştirilen UBGSKK ile kararlı kılınabilecek bölge fiziksel olarak kararlı kılınabilecek sınıra kadar arttırılmıştır. Ayrıca hız sinyalinin kullanan UBGSKK için optimum parametre ayarlamasının gerçek güç sinyali kullanan UBGSKK içinde uygun olduğu görülmüştür.

Hiyama (1994) tarafından mikro-makina sistemine mikro-bilgisayarla BGSKK uygulanmıştır. BGSKK'nın giriş sinyalleri olarak hız ve gerçek güç sinyalleri kullanılmıştır. BMK kuralları mikro bilgisayarda ağır hesaplamaları önlemek için basitleştirilmiştir. Gerçekleştirilen BGSKK tipik analog-tip KGSKK ile eşdeğer DKGSKK ile karşılaştırılmıştır. BGSKK'nın verimliliğini deneysel çalışmalarla göstermek için 5kVA'lık mikro-makina sistemi kullanılmıştır. BGSKK A/D ve D/A dönüştürme zamanını içeren 2ms'den daha az hesaplama zamanı gerektirmiştir. Çeşitli bozulmalar için sistem sönümünü etkin şekilde iyileştirilmiştir.

Park ve Lee (1996) tarafından bulanık oto regresif hareketli ortalama modeli kullanan Otomatik rgtlemeli GSKK (SOGSKK) gerçekleştirilmiştir. şebeke modeli kullanılmadan BM denetleyicinin üyelik fonksiyonları ve kontrol kuralları üretilmiştir. Bu kurallar BM kural alanında depolanmış ve otomatik örgütleme prosedürü ile on-line

güncellenmiştir. Kurallar giriş-çıkış çiftlerinin geçmişi kullanılarak üretilmiş ve yeni arayüz ve durulaştırma yöntemleri geliştirilmiştir. Kuralların oluşturulması böylece uzman bilgisi gerektirmemiştir. SMIB sistem için KGSKK'yla karşılaştırılmıştır. Senkron generatör için farklı atalet sabitleriyle, iletim hattı yalıtımı, normal ve ağır yüklerle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. SOGSKK KGSKK'ya göre daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir. Ancak KGSKK ve SOGSKK ile benzer kararlılık sınırı elde edilmiştir.

Hariri ve Malik (1996) tarafından BMK ve YSA avantajlarını içeren Uyarlamalı Ağ Temelli BGSKK (UAB GSKK) gerçekleştirilmiştir. Öğrenme yeteneğine sahip BGSKK üretim biriminin giriş ve çıkış verilerinden eğitilmiştir. Gerçekleştirilen UAB GSKK ile basitlik, uygulanabilirlik, hızlılık ve dayanıklılık kazanılmıştır. Tasarım zamanı klasik BMK'ye göre azaltılmıştır. Klasik YSA ile karşılaştırıldığında eğitim zamanı önemli ölçüde azaltılmıştır. Ayrıca geniş bir çalışma aralığında iyi sönüm sağlanmış ve sistemin dinamik performansı iyileştirilmiştir.

Abido ve Abdel-Magid (1997) tarafından BGSKK için optimum ayarlamaları araştırmak amacıyla Genetik Algoritmaları (GA) kullanan Hibrit GSKK (HGSKK) gerçekleştirilmiştir. Böylece tasarım işleminin süresi azaltılmıştır. Farklı bozulma ve yük koşulları için gerçekleştirilen HGSKK performansı gözlenmiştir ve KGSKK'ya göre üstünlüğü ve sağlamlığı görülmüştür. HGSKK'nın geçici hal koşulları süresince iyi sönüm karakteristiği gösterdiği görülmüştür.

Hosseinzadeh ve Kalam (1998) tarafından giriş sinyali olarak hız değişimini ve hızlandırıcı gücü kullanan BGSKK uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu BGSKK'nın parametreleri çalışma durumlarına göre değişebilmesi için başka bir BM sistemi tarafından ayarlanacak şekilde düzenlenmiştir. Ayarlamalı BGSKK (ABGSKK) iki farklı çalışma durumu için sabit parametrelili BGSKK ve KGSKK ile karşılaştırılmıştır. ABGSKK ile geniş bir çalışma aralığı için optimum sistem cevabı elde edilmiştir.

Oonsivilai ve El-Hawary (1998) tarafından diğer metotlardan farklı olarak kural tabanını güncellemek için öğrenme algoritmasına sahip bir otomatik ayarlamalı BGSKK

gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen GSKK bulanık kural tablosunu yapmak için taramalı tablodan oluşturulmuş ve öğrenme algoritması kaydırma modu prensibine dayandırılmıştır. Gerçekleştirilen GSKK hesaplama zamanını, kararlı hal hatasını azaltmış; elektromekanik salınımların verimli sönümünü ve güç sisteminin senkron kararlılığını sağlamıştır. Ayrıca simülasyon sonuçlarından KGSKK'ya göre daha iyi performansa sahip olduğu ve kolayca uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Hosseinzadeh ve Kalam (1999) tarafından parametreleri YSA ile ayarlanan çalışma koşullarına göre kendini ayarlayan kural temelli bir BGSKK uygulaması gerçekleştirilmiştir. Giriş sinyalleri olarak hız ve aktif güç değişimi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen YSA Ayarlamalı BGSKK (SBGSKK) senkron makinanın matematiksel modeline uygulanmış ve sabit parametrelili BGSKK ve KGSKK ile karşılaştırılmıştır. SBGSKK'nın KGSKK ve BGSKK'ya göre optimum cevap verdiği görülmüştür.

Elshafei vd. (2000) tarafından kural tabanını online uyarlama yeteneğine sahip UBGSKK gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta öğrenme kademesi süresince kabul edilebilir performans sağlamak için standart BGSKK kural tabanı kullanılmıştır. Sonra kural tabanı farklı çalışma koşullarına kendini uydurabilen online ayarlamalı hale getirilmiştir. UBGSKK'nın uyarlamalı yapısı kural tabanı boyutunu azaltmış ve performansını iyileştirmiştir. Böylece UBGSKK ile BM tekniklerinin dezavantajlarını giderilmiştir. Standart BGSKK ile karşılaştırılan simülasyon sonuçlarından UBGSKK'nın üstünlüğü görülmüştür.

Costa Jr. vd. (2001) tarafından BM denetleyiciye dayanan otomatik ayarlamalı uyarlanabilir kontrol yapısına sahip bir GSKK gerçekleştirilmiştir. Model parametreleri Yerel Model Ağından (YMA) BM denetleyiciden belirlenmiştir. Çalışma süresince denetleyici çalışma noktası akımını tanımlayacak ve Takagi ve Sugeno yöntemi kullanan akım parametrik modelini belirleyecek şekilde tasarlanmıştır. GSKK için kontrol kuralları Genelleştirilmiş Tahmin Edici Kontrol (GTK) yöntemine göre tasarlanmıştır. BM kurallarına dayanana denetleyici GSKK ile KGSKK'dan daha iyi performans elde edilmiştir. Ayrıca uyarlamalı planlara göre hesap yükünün daha basit olduğu görülmüştür.

Majid vd. (2002) tarafından hız ve hızın türevini giriş sinyali olarak kullanan bir BGSKK gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Simulink Block Design ve Matlab 5.3 kullanılmıştır. Simülasyonlar kararlı hal çalışma, üç faz toprak arızası, mekanik güç giriş değişimleri, generatör yüklenmesi ve referans gerilim değişimi için gerçekleştirilmiştir. KGSKK'dan daha iyi dinamik cevap elde edilmiştir. BGSKK'nın terminal gerilimlerinin ve hız değişiminin hem maksimum aşımını hem de hız değişimini azaltabildiği görülmüştür.

You vd. (2003) tarafından parametreleri YSA ile on-line ayarlanan bir BGSKK (ANFIS GSKK) gerçekleştirilmiştir. Giriş sinyali olarak elektriksel gücün bozulmadan sonraki değeri ve hız değişimi kullanılmıştır. ANFIS GSKK sıfır dereceli Sugeno-tipi BM denetleyici kullanılmıştır. Üretim sistemi modelinin katsayı vektörünü elde etmek için değişken unutma katsayısı ile tekrarlanan en küçük kare yöntemi kullanılmıştır. KGSKK ile karşılaştırıldığında düşük frekanslı salınımların söndürülmesinde etkili olduğu görülmüştür.

Abdelazim ve Malik (2003) tarafından otomatik öğrenen BGSKK gerçekleştirilmiştir. BM denetleyicinin otomatik öğrenme özelliği en dik düşüş algoritmasına dayandırılmıştır. Çalışma iki iletim hattıyla sonsuz baraya bağlı üretim biriminin ayrıntılı modeliyle gerçekleştirilmiştir. UBGSKK için generatör hız değişim sinyali ve bu sinyalin türevi giriş sinyalleri olarak kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonu olarak 7 adet üçgen fonksiyon kullanılmıştır. Klasik YSA ile karşılaştırıldığında öğrenme zamanının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. UBGSKK direk üretim birimi performansından eğitilmiştir. Simülasyondan geniş bir çalışma aralığında iyi sönüm sağladığı ve sistemin dinamik performansını iyileştirdiği görülmüştür.

Rashidi vd. (2003) tarafından BM ve kayma modlu denetleyici temelli GSKK gerçekleştirilmiştir. Makina sonsuz bara sistem modeli için küçük bozulma transfer fonksiyonu blok diyagramı kullanılmıştır. BM ara yüz mekanizması birleştirilmiş belirsizliklerin üst sınırını belirlemek için kullanılmıştır. İntegral çalışma anahtarlama ara yüzü kayma modlu denetleyici tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarından gerçekleştirilen GSKK'in çok dayanıklı esnek olduğu görülmüştür.

Arrifano vd.(2004) tarafından rasgele yük değişimleri için BGSKK uygulaması gerçekleştirilmiştir. BMK için normal çalışma koşulları ve elektrik güç sistemi parametrelerinde Markovian sıçrayışları olarak tanımlanan yerel yük değişimlerinin dalgalanmaya neden olduğu rasgele ani değişimlerin olma olasılığı bilgileri kullanılmıştır. Güç sisteminin kararlılaştırma için sönüm ve kontrol giriş sınırlılıklarıyla Lineer Matris Eşitsizliklerine (LME) dayanılarak geliştirilen teknikler kullanan bulanık model temelli kontrol tasarımı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen kontrol tasarım metodunun verimliliğini göstermek için SMIB sistem modelinde elde edilen sonuçlar KGSKK sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. BGSKK'nın elektromekanik salınımları azaltmak için çok etkili olduğu ispatlanmıştır. LME bulanık model temelli kontrol tasarımının daha iyi regülasyon gerçekleştirdiği görülmüştür.

Dobrescu ve Kamwa (2004) tarafından generatör hız değişimini ve hızlandırıcı gücü giriş sinyali olarak kullanan PID tipi BGSKK gerçekleştirilmiştir. BM denetleyicinin giriş değişkenlerini normalleştirmek ve PID fonksiyonunu gerçekleştirmek için kazançlar BMK'ya dışardan eklenmiştir. BMK giriş değişkenleri için 7 adet ikizkenar yamuk üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Çıkış değişkeni için ise 8 adet üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarından BM temelli GSKK'nın iyi dayanıklılığa ve iyi sönüm performansına sahip olduğu görülmüştür.

Bera vd. (2004) tarafından çok makinalı güç sistemi için PID GSKK gerçekleştirilmiştir. PID GSKK parametreleri GA kullanılarak optimize edilmiştir. GA amaç fonksiyonu minimize etme ve böylece ileri-geri denetleyicinin ve PID denetleyicinin kazançlarını ve parametrelerini ayarlamak için kullanılmıştır. PID GSKK klasik ileri-geri GSKK ile karşılaştırılmıştır. PID GSKK'nın daha iyi dinamik performans gösterdiği ve arıza temizlendikten sonra geçici hal kararlılığını olumsuz etkilemediği görülmüştür.

Bandal vd.(2005) tarafından BM ve çıkış geri beslemeli kayma modlu denetleyici temelli GSKK gerçekleştirilmiştir. Kontrol kuralları çıkış geri beslemeli kontrol kavramına ve bulanık kümelere göre belirlenmiştir. Kontrol sisteminin kararlılığını garantilemek için erişim kontrolü geliştirilmiştir. Erişim kontrolü sezgisel kontrol

kurallarıyla düzeltilmiştir. Simülasyonlarda SMIB sistem modeli kullanılmıştır. Kayma sinyali çıkış olarak alınmış ve çıkış geri besleme bulanık kayma modlu kontrol uygun örnekleme aralığında uygulanmıştır. KGSKK ile karşılaştırıldığında gerçekleştirilen GSKK dinamik değildir ve tüm modeller için salınımları söndürebilmiştir.

Sumina vd. (2006) tarafından senkron generatörün tahmin edilen yük açısını giriş sinyali olarak kullanan BGSKK gerçekleştirilmiştir. Yük açısının tahmini gerilim-akım vektör diyagramından gerçek parametrelere dayanılarak yapılmıştır. Gerçekleştirilen BMK gerçek laboratuvar modelinde test edilmiştir. Gerçek laboratuvar modeli dijital uyarım içeren senkron generatörün AC sisteme transformatör üzerinden iki paralel hatla bağlanarak oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen BGSKK, PI gerilim denetleyicisi ve KGSKK ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarından BGSKK'nın senkron generatörün kararlılığını iyileştirdiği görülmüştür.

2.1 Elektrik Güç Sistemlerinin Tarihi Gelişimi

1878'de Thomas A. Edison elektrik lambası üzerine çalışmaya başlamış ve güç istasyonu kavramını merkezi olarak kurulmuş çevresindeki alanı aydınlatan merkez olarak tanımlamıştır. Ekim 1879'da çalışmalarını geliştirmiş ve 4 Eylül 1882'de New York'ta tarihi Pearl Caddesi istasyonunu açarak elektrik şirketi sanayisini başlatmıştır. Sonradan dinamo denen DC generatörler, Pearl caddesinde 1 milikarelik alandaki 59 tüketiciye 110V akkor aydınlatma sağlamak amacıyla 30kW'lık ilk yüklerini beslemek için buhar türbinleri tarafından sürülmüştür (Glover ve Sarma 1986).

1884'te Frank Sprague'nun motorları geliştirilmesi ile güç sistemlerine motor yükleri de eklenmiştir. 1886'da DC sistemlerin sınırlılıkları iyice ortaya çıkmıştır. L. Gaulard ve J.D. Gibbs tarafından AC iletimin ve transformatörün geliştirilmesi, AC güç sistemlerini ortaya çıkarmıştır. George Westinghouse Amerika'da bu gelişmeleri tamamen sağlamlaştırmıştır. 1886'da Westinghouse'ın ortağı Willian Stanley Massachusetts Great Barrington'da 150 lamba için AC dağıtım sistemi ve transformatör uygulaması gerçekleştirmiştir (Kundur 1993). 1888'de Tesla AC motorlarda, generatörlerde,

transformatörlerde ve iletim sistemlerinde çeşitli patentler almıştır(Glover ve Sarma 1986). Transformatörlerle daha düşük akım ve daha düşük hat gerilim düşümleri ile yüksek gerilimde güç iletimi yeteneği AC'yi DC'den daha çekici yapmıştır. İlk tek fazlı AC hat Amerika Birleşik Devletleri'nde Oregon şehri ve Portland arasında 4kV 21km olarak 1889'da çalıştırılmıştır (Glover ve Sarma 1986).

Nikola Tesla tarafından çok fazlı sistemlerin geliştirilmesi ile AC sistemler daha çekici olmuştur. 1890larda elektrik şirketi sanayisinde DC ve AC sistemler arasında önemli bir çekişme oluşmuştur. Edison'un DC sistemleri, Westinghouse'un AC sistemleri tavsiye etmesi aralarında münakaşalara neden olmuştur. Yüzyılın sonunda aşağıdaki sebeplerden dolayı AC sistemler DC sistemlerden üstün gelmiştir.

- AC sistemlerde gerilim seviyeleri kolayca dönüştürülebilir, bu da üretim, iletim ve tüketimde farklı gerilim seviyelerinin kullanımı için esneklik sağlar.
- AC generatörler DC generatörlerden daha basittir.
- AC motorlar DC motorlardan basit ve ucuzdur.

Almanya'da ilk üç fazlı hat 179 km'ye 12kV güç iletmek için 1891'de kurulmuştur. Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk üç fazlı hat 12km'ye 2.3kV iletmek için 1893'te kurulmuştur (Glover ve Sarma 1986). Aynı dönemlerde Niagara Falls'ta AC sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu karar AC ve DC çekişmesini sonlandırmış ve AC sistemler kazanmıştır (Kundur 1999). Edison'un buharla sürülen generatörleri çalıştırılmış, suyla sürülen generatör Appleton'da kurulmuştur. O günden sonra elektrik enerjisinin çoğu buhar güçlü ve su güçlü türbin şebekelerinde üretilmiştir.

Buhar şebekeleri başlangıçta kömür, gaz, yağ ve uranyum ile beslenmiştir. Kömür beslemeli şebekeler 1970lerin başında yağa dönüştürülmelerine rağmen, 1973/74 yağ ambargosundan dolayı bu eğilim tersine dönmüştür. 1957'de uranyumla beslenen 90 MW buhar türbini kapasiteli nükleer birimler açılmıştır. Fakat nükleer kapasitenin gelişimi artan yapı maliyetleri, lisanslama gecikmeleri ve kamuoyu tepkisinden dolayı yavaşlamıştır (Glover ve Sarma 1986).

Başlangıçta AC iletimde frekans standartlaştırılmadığı için 25, 50, 60, 125 ve 133 Hz gibi birçok farklı frekans kullanılmıştır. Bu enterkonnekte bağlantı için büyük bir sorun oluşturmuştur. Sonra birçok ülkede 50Hz standart olarak kabul edilmiş fakat Kuzey Amerika'da 60Hz kabul edilmiştir.

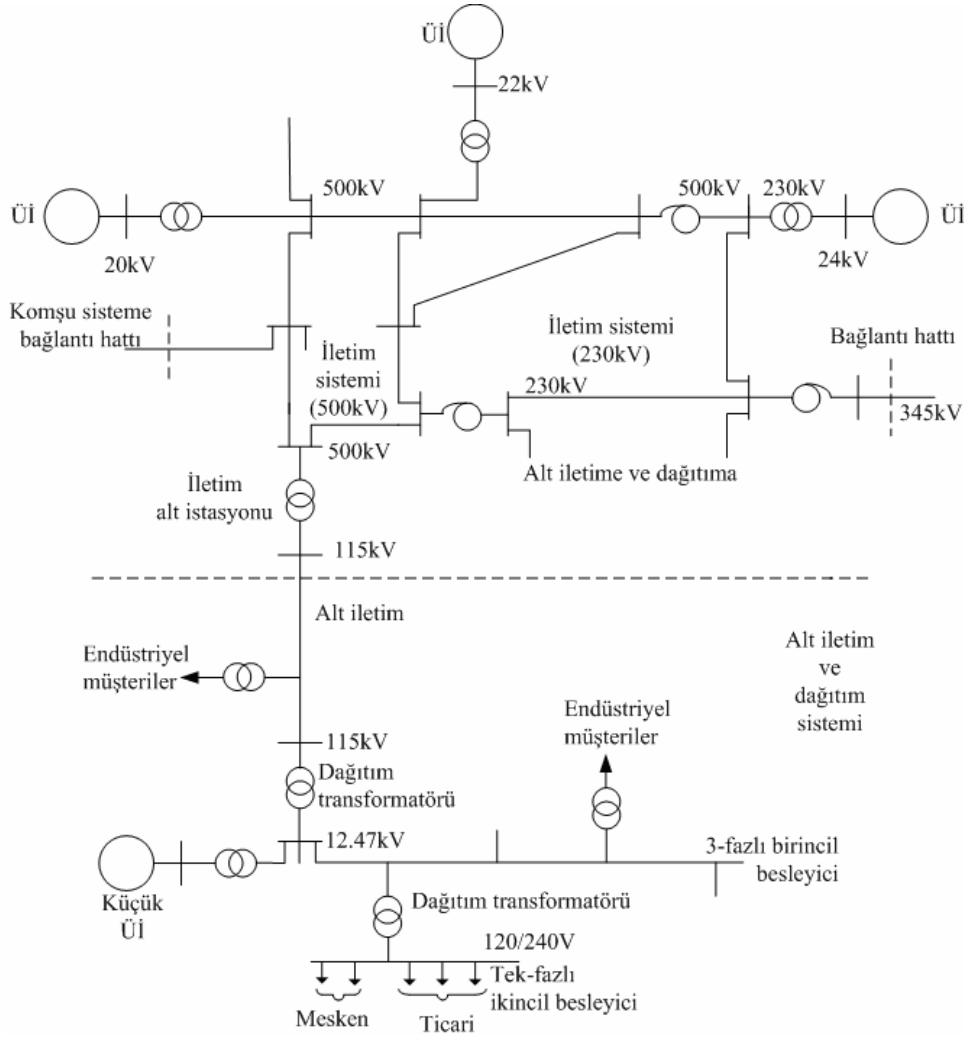
Daha uzak mesafelere daha büyük miktarlarda güç iletimi ihtiyacının artması daha yüksek gerilim seviyeleri kullanma isteği oluşturmuştur. İlk AC sistemlerde 12, 44 ve 60kV (faz-faz RMS) kullanılmıştır. Bu 1922'de 165kV'a, 1923'te 220kV'a, 1935'te 287 kV'a, 1953'te 330 kV'a ve 1965'te 500kV'a çıkmıştır. Sınırsız gerilim seviyesi sayısından kurtulmak için, gerilim seviyeleri standartlaştırılmıştır. Yüksek Gerilim (YG) sınıfı için standartlar 115, 138, 161 ve 230 kV ve Ekstra Yüksek Gerilim (EYG) sınıfı için 345, 500 ve 765 kV'tur.

1950lerin başında civalı ark vanalarının gelişmesi ile özel durumlarda Yüksek Gerilim Doğru Akım (YGDA) iletim sistemleri ekonomik olmuştur. YGDA iletim uzak mesafelere büyük enerji iletimi için tercih edilmiştir. YGDA iletim, sistemlerin nominal frekansının farklı olduğu, AC enterkonnekte bağlantının uygulanamayacağı durumlarda sistemler arasında asenkron bağlantı sağlamaktadır. YGDA iletimin ilk ticari uygulaması 1954'te İsveç ana karası ve Gotland adası arasında 96km'lik denizaltı kablo ile enterkonnekte bağlanması ile gerçekleştirilmiştir. Tristör valf konvertörlerinin kullanılması ile YGDA iletim daha çekici olmuştur. Tristör valfleri kullanan ilk YGDA sisteminin uygulaması 1972'de Eel Nehri'nde Quebec ve New Brunswick güç sistemleri arasında asenkron bağlantı sağlamak için gerçekleştirilmiştir. Dönüştürme cihazlarını azaltan boyut ve tutarı, artan güvenilirliğinden dolayı YGDA iletimin kullanımında kararlı bir artış olmuştur (Kundur 1993).

2.2 Güç Sisteminin Yapısı

Güç sistemlerinin boyutu ve yapısı değişmesine rağmen hepsi aynı temel karakteristiklere sahiptir (Kundur 1993). Bir elektrik güç sistemi birbirine göre hareketli elemanların birleşiminden oluşmaktadır (Tacer 1990). Sabit gerilimde çalışan üç fazlı

AC sistemlerden oluşmakta ve üretimde, iletimde üç fazlı cihazlar kullanılmaktadır. Endüstriyel yükler her zaman üç fazlıdır; tek fazlı olan mesken ve ticari yükler ise fazlar arasında eşit dağıtılarak dengeli üç fazlı sistem oluşturulmaktadır (Kundur 1993). 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 tolerans içinde kalmalıdır (Tacer 1990).



Şekil 2.1 Güç sisteminin temel elemanları (Kundur 1993).

Güç sistemini oluşturan elemanlar özelliklerine göre güç ve denetleme elemanları olarak iki grupta toplanabilmektedir. Güç Elemanları; mekanik enerji sağlayan tahrik sistemleri 'prime movers' (ör; türbinler), üreteçler (senkron generatörler), transformatörler, enerji

iletim ve dağıtım hatları ve elektriksel yüklerdir. Denetleme elemanları; tahrik sistemlerine ilişkin mekanik regülatörler (hız regülatörleri), senkron generatörlere ilişkin uyartım sistemleri, röleler ve açma-kapama elemanları gibi elemanlardır. Bu ayırımdan da anlaşılacağı gibi enerji sistemi elektromekanik bir sistemdir (Tacer 1990). Şekil 2.1’de modern güç sisteminin temel elemanları gösterilmektedir. Üretim biriminde elektrik, makina çıkış şaftına genellikle türbinden sağlanan mekanik enerjinin dönüştürülmesi ile üretilmektedir (Machowski vd. 1997). Elektrik enerjisi Üretim İstasyonlarında (Üİ) üretildikten sonra iletim hatları, transformatörler ve anahtarlama aygıtlarından oluşan karmaşık şebekelerle tüketicilere iletilmektedir (Kundur 1993).

Modern güç sistemlerinin çoğunda mekanik enerji ya termal enerjiden ya da doğrudan su akışından elde edilmektedir. Temel termal enerji kaynağı olarak kömür, doğalgaz, nükleer yakıt ve yağ kullanılmaktadır. Ayrıca rüzgar, gelgit, jeotermal ve biyogaz da elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bazı rüzgarlı üretim sistemleri asenkron generatör kullanabilmesine rağmen mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü senkron generatörün kullanımı ile gerçekleştirilmektedir (Machowski vd. 1997). Güvenilirlik ve kalite, bir güç sisteminden istenilen en önemli özellikler olduğundan senkron generatörler bu yüzden 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 oluşmakta ve sonucunda enerji iletim hattı otomatik olarak röleler vasıtasıyla devre dışı kalmaktadır. Böyle bir durumda bu generatör devreden çıkartılıp tekrar senkron çalışma haline dönüştürüldükten sonra devreye alınıp yeniden yüklenmektedir. Yüklenme gereği bir senkron makina hızlanmaya ya da yavaşlamaya başlarsa, makinada oluşan senkronlayıcı kuvvetler makinayı senkronizmada tutmaktadır (Tacer 1990).

Elektrik enerjisinin önemli bir özelliği temel enerji kaynağına ya da barajlara yakın yerlerde üretilebilmesi ve sonra uzak mesafelerdeki yük merkezlerine iletilebilmesidir (Machowski vd. 1997). İletim sistemi, sistemdeki tüm temel üretim istasyonlarını ve temel yük merkezlerini enterkonnekte bağladığından birleştirilmiş enerji sisteminin omurgasını oluşturmakta ve en yüksek gerilim seviyelerinde çalışmaktadır (Kundur

1993). Çünkü iletim hattındaki enerji kaybı akımın karesi ile orantılıdır. Gerilimi üretim seviyesinden iletim seviyesine yükseltmek için iletim sistemi yükseltici transformatörler aracılığıyla beslenmektedir. Elektrik şebekesi tüm güç istasyonlarını bir sisteme bağlamakta ve gücü yük merkezlerine en uygun yolla iletmekte ve dağıtmaktadır. Generatörlerden elektriksel tüketicilere güç akışını sağlamada birçok yol olasılığı sunmak; böylece sistem esnekliğini ve güvenilirliğini sağlamak için genellikle iletim şebekesi gözlü yapıda bağlanmaktadır (Machowski vd. 1997). İletim şebekesi genel olarak iletim sistemi, alt iletim sistemi ve dağıtım sistemi olarak sınıflandırılmaktadır (Kundur 1993). İletim şebekelerinde kullanılan ekstra yüksek gerilimler ise 300kV'un üzerindedir (Machowski vd. 1997).

Yüksek gerilim alt istasyonunu düşürücü transformatörlerle dağıtım alt istasyonuna bağlayan iletim sistemi kısmına alt iletim şebekesi denir (Saadat 2002). Alt iletim şebekelerinde kullanılan yüksek gerilimler 100kV ve 300kV aralığındadır (Machowski vd. 1997). Bazı büyük endüstriyel tüketiciler alt iletim sistemine bağlanabilmektedir. Kapasitör ve reaktör grupları iletim hattı gerilimini sürdürmek için genellikle alt istasyonlarda kurulmaktadır (Saadat 2002). Bazı sistemlerde, alt iletim ve iletim devreleri arasında açık bir ayırım yoktur. Sistem genişlediğinden ve iletim için daha yüksek gerilim seviyesi gerektiğinden, eski iletim hatları genellikle alt iletim görevine indirilmektedir (Kundur 1993).

Elektik enerjisinin çoğu, tüketiciye doğrudan enerji götürmek için iletim ya da alt iletim şebekesinden dağıtım yüksek gerilim ya da orta gerilim şebekelerine iletilmektedir. Dağıtım sistemlerinde kullanılan orta gerilimler 1kV ve 100kV arasındadır. İletim sisteminde kullanılan gözlü yapının tersine dağıtım şebekesi genellikle radyal yapıdadır (Machowski vd. 1997). Temel dağıtım gerilimi genellikle 40 kV ve 34,5kV'tur. Küçük endüstriyel tüketiciler temel besleyicilerle bu gerilim seviyesinde beslenmektedir. İkincil dağıtım besleyicileri konut ve ticari tüketicileri 120/240V'da beslemektedir. Yük yakınına yerleştirilen küçük üretim şebekeleri genellikle alt iletim ve dağıtım sistemine doğrudan bağlanmaktadır (Kundur 1993). Güç sisteminin farklı kısımları farklı gerilimlerde çalışmaktadır. Genellikle 1kV'un altındaki gerilimler düşük gerilim olarak incelenebilmektedir. Düşük gerilim, orta gerilim, yüksek gerilim ve ekstra yüksek

gerilim sınıflandırması kesin sınırları olan bir sınıflandırma değildir (Machowski vd. 1997).

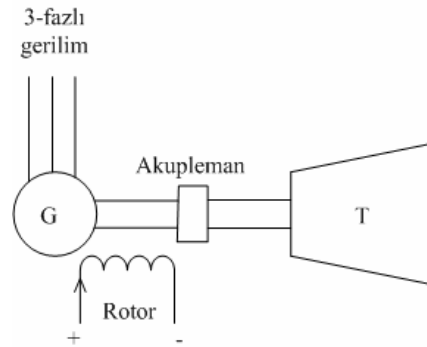
2.2.1 Türkiye'deki güç sisteminin yapısı

Enerji üretiminde 3 fazlı senkron generatörler kullanılmaktadır. Gerilim değeri pratikteyalıtım koşulları ile sınırlıdır. İletim hatlarındaki gerilim değeri yüz bin voltlar seviyesinden 760 kV'a kadar değişim göstermektedir. Ülkemizde 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 sağlanmaktadır. Son varış noktasında ise tekrar güç transformatörleri ile yüksek gerilim seviyesi daha düşük seviyelere indirilerek dağıtımı yapılmaktadır. 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 vermektedir. 380 kV'luk Türkiye enterkonnekte sistemi 28 makina, 95 bara ve 123 hat içeren bir model ile temsil edilebilmektedir (Caner 2006).

2.3 Senkron Generatörler

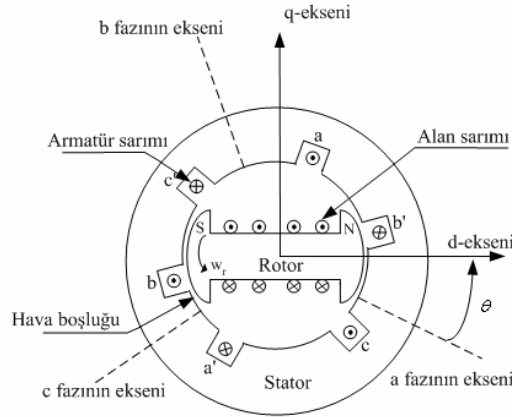
Senkron makinalar dış DC kaynaktan beslenen bir alan devresine sahip AC makinalardır (Chapman 2002). Senkron makinaların önemli bir kullanım amacı üç fazlı AC güç üretimidir. Generatör modunda çalışan senkron makina genellikle alternatör olarak adlandırılmaktadır (Cathey 2001). Bu makinalar dünyadaki en büyük enerji dönüştürücüleridir. 1500 MW'a kadar değişen güçlerde, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedirler (Wildi 2002). Senkron generatörler güç sistemlerinde ana enerji kaynağıdır (Kundur 1993) ve yapıları asenkron generatörlerinkinden daha pahalı olmasına rağmen yüksek güç oranlarında yüksek verimleri bir avantajdır (Ong 1997).

Bir senkron generatör bir yükü beslediğinde, stator akımı hava boşluğunda senkron hızda dönen bir manyetik akı oluşturmaktadır. Bu akı alan akımı tarafından oluşturulan akıya tepki göstermekte ve bu iki manyetik alanın etkileşiminden elektromekanik moment oluşmaktadır. Generatörde bu moment dönmenin tersi yönündedir ve dönmeyi sürdürmek için hareketlendiriciden mekanik moment uygulanmalıdır (Fitzgerald vd. 2003). Bu mekanik enerjiyi sağlamak için senkron generatörün şaftı bir türbin ile birleştirilmektedir. Şekil 2.2’de mekanik türbinle alternatörün bağlantısı gösterilmektedir (Salam 2005).



Şekil 2.2 Alternatör ve türbin arasındaki bağlantı diyagramı (Salam 2005).

Şekil 2.3 alan kutuplarının biri ile üç fazlı bir senkron makinanın kesitini şematik olarak göstermektedir. Silisli saç paketlerinden yapılmış olan statorun iç kısmına sargıların yerleştirilmesi için oluklar açılmıştır (Peşint 2004). Endüklenen gerilimde harmonik meydana gelmemesi için stator olukları üçün katı olan sayılarda olmalıdır.



Şekil 2.3 Üç fazlı senkron makinanın şematik diyagramı (Kundur 1993).

Üç fazlı senkron makinelerin statorlarında üç fazlı sargılar vardır. Statordaki üç ayrı sargı arasında uzayda elektriksel olarak 120^0 faz farkı vardır. Stator sargı gerilimleri ve akımları arasında da zamana göre 120^0 'lik faz farkı vardır (Sarioğlu 1987).

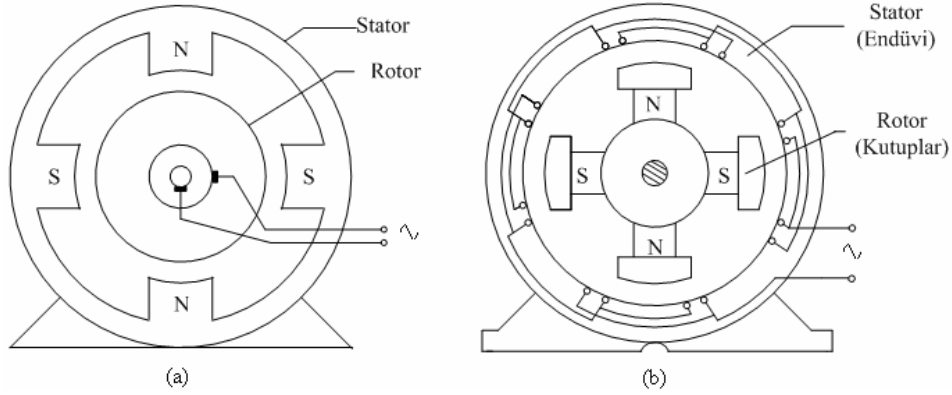
Makinadaki sarımları anlatmak için genellikle alan sarımları ve armatür sarımları olmak üzere iki terim kullanılmaktadır. Genelde alan sarımları terimi makinada temel manyetik alanı üreten sarımlar için kullanılırken armatür sarımları terimi temel gerilimin endüklendiği sarımlar için kullanılmaktadır (Chapman 2002). Armatür sarımları genellikle alan sarımlarından daha yüksek bir gerilimle çalışmakta ve bu yüzden yalıtım için daha fazla alan gerektirmektedir. Yüksek geçici akımlara neden olmakta ve mekanik olarak dayanıklı olmalıdır. Bu sebeplerden dolayı armatürün statorda olması daha uygundur (Kundur 1993). Bu yüzden stator sarımları ve armatür sarımları terimleri birbiri yerine kullanılabilir. Benzer şekilde rotor sarımları ve alan sarımları terimleri birbiri yerine kullanılabilir (Chapman 2002).

Küçük güçlü alternatörlerde endüvinin dönen kısımda bulunmasına karşılık büyük güçlü alternatörlerde stator duran kısımdadır. Döner endüviden fırçalar ve bilezikler yardımıyla büyük akım ve gerilimlerin alınması çok zor ve pahalı olduğundan döner endüvili alternatörler büyük güçlü olarak yapılamamaktadır.

Endüvinin duran kısımda yapılmasının birçok faydaları vardır. Bunlar:

- 1- Endüvi sargılarında endüklenen gerilim dış devreye fırça ve bilezikler olmaksızın alınabilmektedir.
- 2- Duran kısımdaki sargıların sarılması ve izole edilmesi daha kolaydır.
- 3- Duran kısımda sargıların merkezkaç kuvvet etkisi ile yerlerinden fırlamaları söz konusu değildir.
- 4- Sargıların soğutulması daha kolay yapılabilmektedir (Peşint 2004).

Şekil 2.4(a)'da döner endüvili (b)'de ise duran endüvili alternatör gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Döner endüvili (a), duran endüvili (b) alternatörler (Peşint 2004).

Dengeli üç fazlı akımlar taşınırken stator hava boşluğunda senkron hızda dönen bir manyetik alan üretileceğinden ve rotor sarımındaki doğru akım tarafından üretilen alan rotorla birlikte döneceğinden sabit bir moment üretimi için, rotor ve stator alanları aynı hızda dönmelidir. Bu yüzden, rotor tam olarak senkron hızda dönmelidir. Rotorun mekanik hızı, alan kutuplarının sayısı ve stator akımlarının frekansı ile (2.1) belirlenmektedir (Kundur 1993).

$$n = \frac{120 \cdot f}{P_f} \quad (2.1)$$

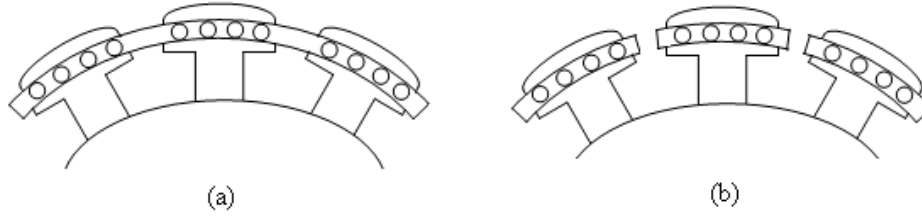
n: hız (dev/dk).

f: frekans (Hz.).

P_f : alan kutuplarının sayısı.

Senkron generatörler genellikle ya buhar ya da gazla sürülen (turbo generatörler olarak bilinen) yüksek hızlı generatörler ve su türbinleri ile sürülen düşük hızlı generatörler olarak sınıflandırılmaktadır (Machowski vd. 1997). Hıza bağlı olarak iki temel rotor yapısı vardır (Kundur 1993). Senkron makinaların çıkık kutuplu veya yuvarlak rotorlu olarak yapılmaları bazı yapısal nedenlere dayanmaktadır. Senkron generatörlerle elde edilen gerilimin frekansı belirli değerlerde saptanmış olup, Türkiye ve Avrupa ülkelerinde bu değer 50 Hz., ABD, İngiltere ve diğer bazı ülkelerde 60 Hz.dir. Bu esastan hareketle senkron generatörü çeviren mekanik yapıdaki çevirici makinaların devir sayısına bağlı olarak senkron generatörün devir ve kutup sayısı saptanmaktadır.

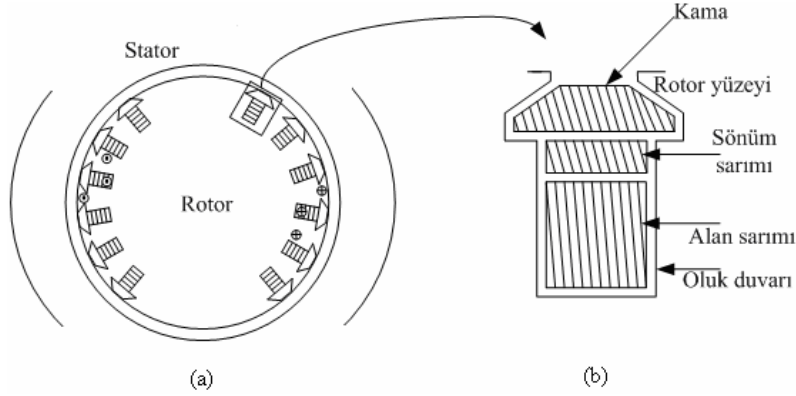
Hidrolik türbinlerde genellikle devir sayısı düşük olduğundan, bu tür makinalarla çevrilen senkron generatörün devir sayıları düşük ve dolayısıyla kutup sayıları çok olacağından, hidroelektrik santrallerde genellikle çıkık kutuplu senkron generatör kullanılmaktadır. Buhar türbinlerinde devir sayısı yüksek ve genellikle 3000d/dk olarak seçildiğinden, buhar türbinleri ile çevrilen senkron generatörler iki kutuplu ve yuvarlak rotorlu olarak yapılmaktadır (Ateş ve Peşint 1990). Düşük hızlı rotorlar, kutuplar için gerekli boşluğu sağlamak amacıyla büyük çapa sahiptir (Wildi 2002). Rotorları dolu bir silindrsel yapıda olmayan çıkık kutuplu makinalarda uyarma sargıları kutuplar üzerine toplu olarak yerleştirilmektedir. Rotorları silisyum saclardan yapılmaktadır (Tacer 1990).



Şekil 2.5 Süreksiz söndürücülü (a) ve süreksiz söndürücülü (b) çıkıntılı kutuplu rotorun yapısı (Kundur 1993).

Genellikle çıkıntılı kutuplu rotorların kutup yüzlerine yerleştirilmiş bakır ya da pirinç çubuklar şeklinde sönüm sarımları ya da amortisörler vardır. Bu çubuklar Şekil 2.5(a)'da gösterildiği gibi sincap kafesli motorlara benzer şekilde kısa devreli sarımları oluşturmak için bileziklerin uçlarına bağlanmaktadır. Sönüm sarımları sürekli değil, Şekil 2.5(b)'de gösterildiği gibi kutup parçalarında tek tek olabilmektedir. Stator Manyeto Motor Kuvvetinin (MMK) boşluk harmonikleri yüzey eddy akım kayıplarına yardım etmektedir; bu yüzden çıkıntılı kutuplu makinaların kutup yüzeyleri genellikle ince levhalıdır (Kundur 1993). Bazı sebeplerden dolayı rotor hızı senkron hızdan saparsa akı rotora göre sabit olmayacaktır ve akımlar sönüm sarımlarında endüklenecektir. Lenz kanununa göre bu akımlar kendilerini üreten akı değişimine karşı koyacak ve böylece senkron hızı düzeltmeye ve rotor salınımlarını söndürmeye yardım edecektir (Machowski vd. 1997). Yuvarlak rotorlu senkron generatörlerin özel sönüm sarımları yoktur, fakat çelik rotor amortisör akımlarına eşdeğer etkiye sahip eddy akımlarına yollar sağlamaktadır. Bazı üreticiler kamaların altında ayrı bakır çubukların

sağlanması ile ya da bir sönüm kafesi oluşturmak için bunları birbirine bağlayan ve sönüm çubukları olarak alan sarımları oluklarında metal kamalar kullanılması ile ek sönüm etkileri ve negatif sıra akım kapasitesi sağlamaktadır (Kundur 1993).



Şekil 2.6 Silindirik rotor yapısı

a) Rotor yapısı; b) Rotor oluğu ve sarımları (Kundur 1993).

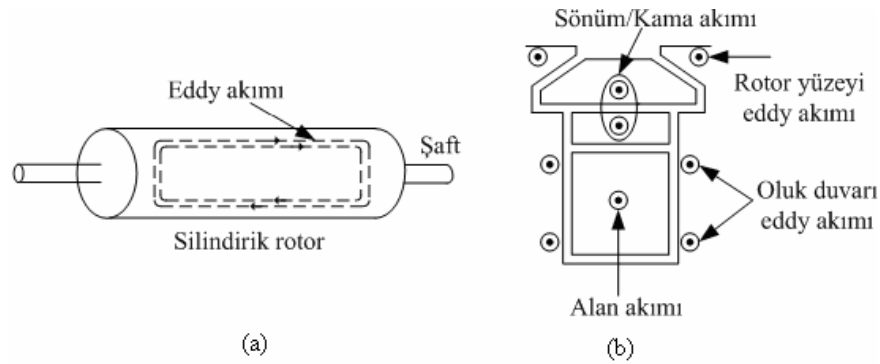
Yüksek hızlı buhar türbinleri düşük hızlı türbinlerden daha küçük ve daha verimlidir. Aynısı yüksek hızlı senkron generatörler içinde doğrudur. Ayrıca gerekli frekansı üretmek için 2 kutuptan daha az olamazlar ve bu en yüksek hız olasılığını sabitlemektedir. 60 Hz.'lik sistemde bu 3600 d/dk'dır. 4 kutuplu makinaya uyan daha düşük hız 1800 d/dk'dır. Sonuç olarak buhar türbinli generatörler ya 2 ya da 4 kutba sahiptir. Rotor uzun, silindirik kütlenin boyuna seri işlenmiş oluklar içeren katı çelik silindiridir. Eş merkezli alan bobinleri, hareket etmeyecek şekilde oluklara sıkıştırılmakta ve yüksek dayanımlı uç bilezikleri tarafından tutulmakta, N ve S kutuplarını oluşturmaya hizmet etmektedir (Wildi 2002). Yuvarlak kutuplu ya da turbo makinaların statoru ile rotoru arasında radyal doğrultuda kalan hava aralığının boyu sabittir. Bu hava aralığının radyal boyu 45mm.'den 65mm.'ye kadar olabilmektedir (Sarioğlu 1987). Şekil 2.6 silindirik rotor yapısını göstermektedir.

Yüksek dönme hızı rotor çapının üst sınırını zorlayan güçlü merkezkaç kuvvetleri üretmektedir. 3600 d/dk hızda dönen rotor durumunda, çeliğin esnek sınırı 1.2m maksimum çapı sınırlamak için gerekmektedir. Diğer taraftan 1000MVA-1500MVA

güçlü generatörler üretmek için rotorların hacmi büyük olmalıdır. Yüksek güçlü, yüksek hızlı rotorlar çok uzun olmalıdır (Wildi 2002). Büyük senkron generatörlerin yaklaşık %70'i 150-1500MVA aralığında silindirik rotor tiplidir (Saadat 2002).

Kısaca senkron makinanın bu iki türü arasında elektriksel olarak iki temel ayrıcalık vardır. Birincisi, senkron hız civarında olabilecek salınımların, yuvarlak kutuplu makinalarda rotor hızının yüksek ve rotorun dökme çelikten yapılması nedeniyle rotorda meydana gelen eddy akımları ile söndürülmesi, çıkık kutuplu makinalarda ise bu işlevin amortisör sargıları tarafından yapılmasıdır. İkinci fark, yuvarlak kutuplu makinalarda hava aralığının sabit olmasına karşılık çıkık kutuplularda sabit olmayışıdır. Bu nedenle iki tür makinanın eşdeğer devre ve fazör diyagramları birbirinden farklıdır (Tacer 1990).

Kararlı hal durumunda var olan rotor akımı sadece alan sarımındaki doğru akımdır. Bununla birlikte, dinamik koşullarda rotor yüzeyinde ve oluk duvarlarında ve oluk kamalarında ya da sönüm sarımlarında (ek sönüm üretimi için kullanılırsa) eddy akımları endüklenmektedir (Kundur 1993). Şekil 2.7'de bir buhar türbini generatörünün rotor akım yolları gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Silindirik rotorda akım yolları

a) Akım yolları

b)Ayrı rotor olukları ile ilgili akımların bileşenleri (Kundur 1993).

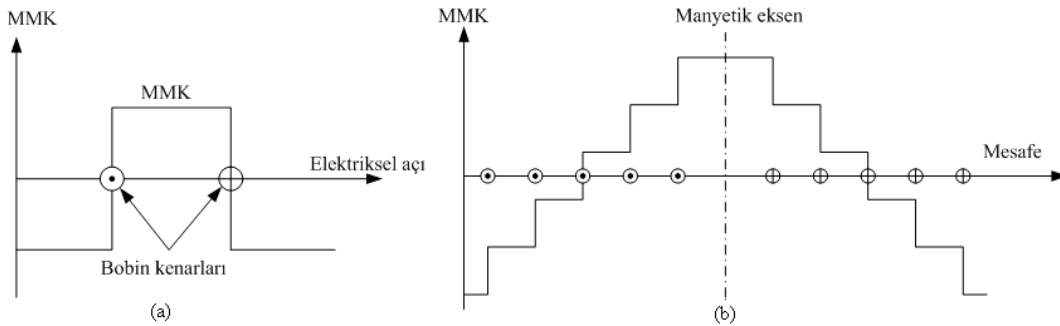
Bir kutup çiftinden fazla kutuplu makinalarda uygun çoklukta bobin gruplarından yapılan stator sarımları vardır. Analiz amacı için sadece bir kutup çiftini incelemek

uygundur ve diğer kutuplarla ilgili durumlar incelenen kutup çiftininkiyle aynıdır. Bu yüzden, açılar elektriksel radyan ya da derece ile ölçülmektedir. Bir kutup çifti tarafından kaplanan açı 2π radyan ya da 360° 'dir. Elektriksel açı θ ile mekanik açı θ_m arasındaki ilişki (2.2) ile ifade edilmektedir.

$$\theta = \frac{P_f}{2} \cdot \theta_m \quad (2.2)$$

Pratikte, stator sarımları ve silindirik rotorlu makinanın alan sarımları birçok oluğa dağıtılmıştır. Böylece oluşan MMK ve akı dalga şekilleri yaklaşık olarak sinüsoidaldir. Alan sarımları kutuplarda olan çıkıntılı kutuplu makinalarda kutup yüzeylerinin şekli üretilen akıdaki harmonikleri minimize etmek için kullanılmaktadır.

Şekil 2.8(a)'da stator kesitinde a fazındaki sadece bir bobinden geçen akım ile üretilen MMK gösterilmektedir (Kundur 1993). Daha fazla bobin ekleyerek Şekil 2.8(b)'de gösterilen MMK dalga dağılımı elde edilebilmektedir. Görüldüğü gibi (Şekil 2.8(b)) MMK dalga şekli bobinler eklendikçe kare dalgadan sinüs dalgasına yaklaşmaktadır. Kesirli havle sarımlarının kullanımı sayesinde harmonikler küçültülebilmektedir.



Şekil 2.8 Bir bobin tarafından oluşturulan(a) ve birden fazla bobin tarafından oluşturulan (b) MMK dalga şekli (Kundur 1993).

Makina tasarımı, harmonikleri minimize etmeyi amaçlamakta ve makina performansı analizlerinin çoğu için her faz sarımının sinüsoidal olarak dağılmış MMK dalgası ürettiğinin kabul edilmesini sağlamaktadır. Sarımlar sinüsoidal dağıtılmış denebilmektedir (Kundur 1993). Yuvarlak rotorlu senkron generatörlerde endüklenen

Elektromotor Kuvvet (EMK) şekli alan şekline eşit olduğundan, gerilim sinüs formuna yakın olması için alan şeklinin sinüs formuna yakın yapılmasına çalışılmaktadır. Rotorda doğru akımla beslenen uyarım döner alanını oluşturan sargı, bir kutup altındaki 2/3 oranındaki oluklara yerleştirilip, bir kutup altındaki olukların 1/3'ü boş bırakılarak alandaki 3 ve 3 katı harmonikler yok edilmektedir (Güzelbeyoğlu 1998). Harmonikler makina performansı açısından ikincil olarak hesaba katılabilmektedir. Rotor yüzeyi eddy akım kayıplarına neden olduğunun yanı sıra harmonikler stator kaçak reaktanslarına yardım etmektedir (Kundur 1993).

2.4 Uyarım Sistemleri

Uyarım sisteminin temel fonksiyonu senkron makinanın alan sarımına DC akım sağlamaktır. Ayrıca uyarım sistemi alan gerilimi ve böylece alan akımı kontrolü ile güç sisteminin memnun edici performansı için önemli kontrol ve koruma fonksiyonlarını gerçekleştirmektedir (Kundur 1993). Generatöre göre uyarım sistemi; terminal gerilimini generatörün sürekli kapasitesi (V eğrileri) içerisinde değişen çıkış olarak sürdürmek için alan akımını sağlayabilmeli; ayarlayabilmeli ve generatörün anlık ve kısa süreli kapasitelerine uygun alan zorlaması ile geçici bozulmaları karşılayabilmelidir. Güç sistemine göre uyarım sistemi; sistem geriliminin etkin kontrolüne ve sistem kararlılığının düzeltilmesine katkı sağlamalıdır. Bu rolleri gerçekleştirmek için, belirlenen cevap kriterlerini karşılamalı, Kendinin, generatörün ve diğer cihazların zarar görmesini önlemek için sınırlama ve koruma sağlamalı, esnek, güvenli ve elde edilebilir çalışma için belirlenen ihtiyaçları karşılamalıdır (İnt.Kyn.1).

Eski makinalarda uyarım genellikle uyarıcı olarak adlandırılan ve senkron makinayla aynı şafta yerleştirilen DC makinadan sağlanmıştır. Daha modern sistemlerde uyarım AC uyarıcılardan ve transistörlü doğrultuculardan (ya basit köprü diyotlar ya da faz kontrollü doğrultucular) sağlanmaktadır. Bazı durumlarda doğrultma sabit düzlemde meydana gelmekte ve doğrultulan uyarımla rotor bilezikler yoluyla beslenmektedir. Fırçasız uyarım sistemlerinde ise AC uyarıcının alternatörü rotordadır ve akım bilezikler gereksiz alan sarımına doğrudan verilmektedir.

Soğutma ve bakım problemleri bilezikler, komütatörler ve fırçalarla ilgilidir. Birçok modern sistem bu problemleri fırça ve bileziklerin kullanımını azaltarak gidermiştir. Sonuç olarak bazı uyartım sistemleri kiminin alan sarımı sabit olan, kiminin alan sarımı dönen şafttan sürülen AC alternatörler kullanmaktadır. Dönen doğrultucuların kullanılması ile DC uyartım bilezikler kullanılmaksızın generatörün alan sarımına doğrudan uygulanabilmektedir.

Modern uyartım sistemleri dönen uyartıcı-alternatör kısmı olmaksızın kurulmaktadır. Bu sistemlerde uyartım gücü yerel güç sisteminden beslenen özel yardımcı transformatörden elde edilmektedir. Ayrıca doğrudan ana generatör terminallerinden de elde edilebilmektedir; böyle bir sistemde ana generatör uyartım gücü sağlamak için özel armatür sarımına sahiptir (Fitzgerald vd. 2003). Uyartıcının güç oranı senkron generatörün kapasitesine dayanmaktadır. Genellikle 1000kVA'lık alternatörü uyarmak için 25kW'lık uyartıcı gerekirken 2500kW'lık uyartıcı 500MW'lık alternatör için yeterli olmaktadır (Wildi 2002).

Uyartım hızı bir saniye içerisindeki uyartım gerilimi artmasının nominal uyartım gerilimine oranıdır. Kendi kendini uyartan uyartım makinasında bu uyartım hızı çok düşük olup, yaklaşık olarak 0.1-0.4 arasındadır. Şebekeleri besleyen büyük güçlü generatörlerde en düşük uyartım hızı olarak 0.5 istenmektedir (Boduroğlu 1988). Senkron makinalara ilişkin uyartım düzenlerinin, elektrik sistemleri içerisinde oluşan geçici olaylar üzerinde belirgin etkileri vardır. Bu nedenle literatürde güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesinde uyartım sistemlerine büyük önem verilmiştir (Tacer 1990).

2.4.1 Uyartım sistemi çeşitleri

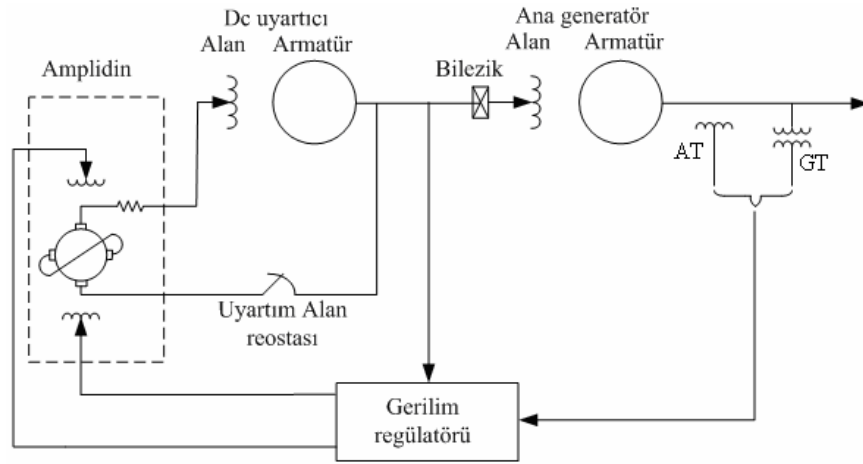
Uyartım güç kaynağına bağlı olarak üç farklı uyartım sistemi tanımlanmaktadır.

- 1- DC uyartım sistemleri; uyartım güç kaynağı olarak komütatörlü bir doğru akım generatörü kullanmaktadır.

- 2- AC uyartım sistemleri; senkron makinanın alan sargısı için gerekli olan DC akımın üretilmesinde dönen ya da duran doğrultuculu alternatörler kullanılmaktadır.
- 3- Statik uyartım sistemleri; uyartım güç kaynağı olarak transformatörleri veya yardımcı generatör sargıları ve doğrultucuları kullanılmaktadır (IEEE std. 421.5-1992).

2.4.1.1 DC uyartım sistemleri

Güç kaynağı olarak ana generatör şaftından ya da ayrı motor tarafından sürülen, ayrı ya da kendinden uyartımlı DC generatörler kullanılmaktadır. Eski sistemlerdendir ve 1960lardan beri yavaşça ortadan kalkmıştır; ancak hala vardır ve kararlılık çalışmalarında modellenmesi gerekmektedir, genellikle modern gerilim regülatörleri ile donatılmıştır. Şekil 2.9 DC uyartım sistemini göstermektedir (İnt.Kyn.1).

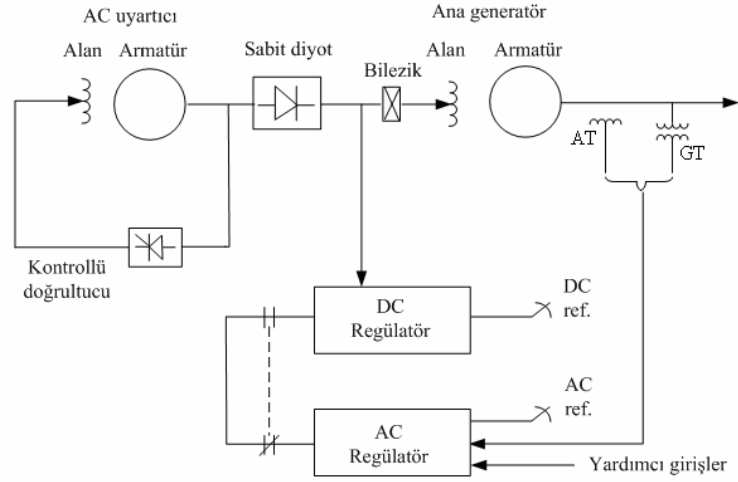


Şekil 2.9 DC uyartım sistemi (İnt.Kyn.1).

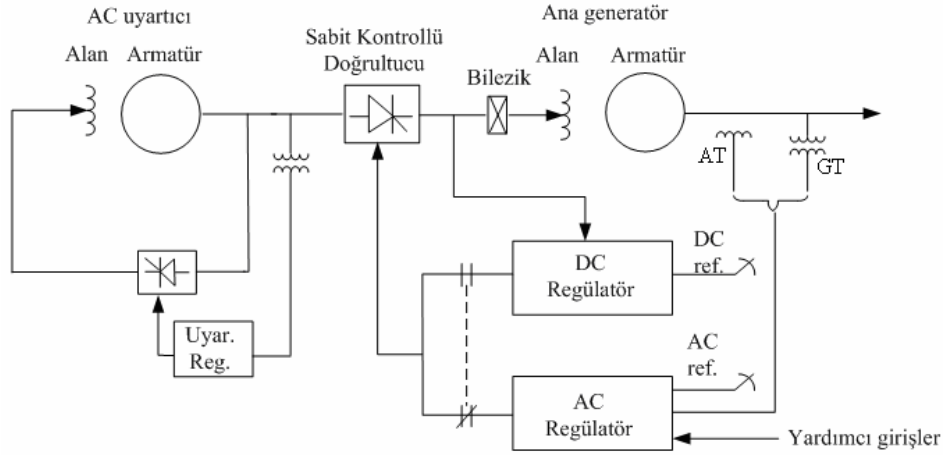
2.4.1.2 AC uyartım sistemleri

Güç kaynağı olarak genellikle türbin-generatörle aynı şaftta olan uyartıcı ile AC makinalar (alternatörler) kullanılmaktadır. Uyartıcının AC çıkışı dönen ya da sabit

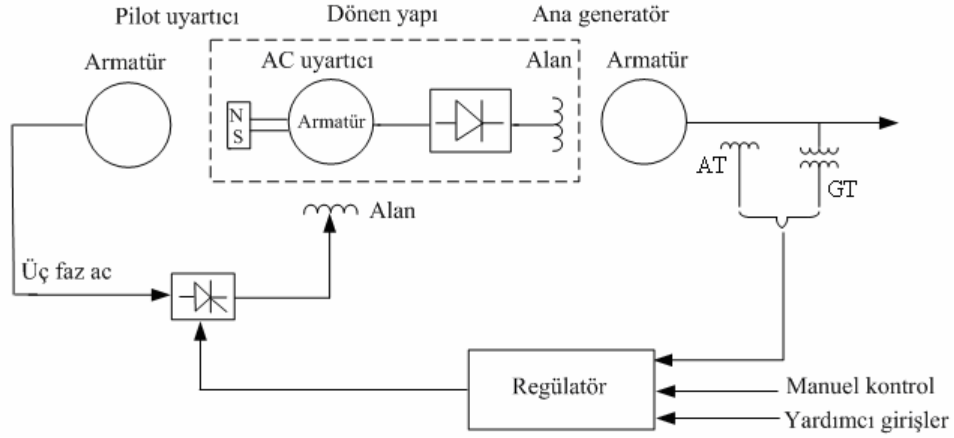
olabilen (fırçasız uyarım sistemleri) kontrollü ya da kontrolsüz doğrultucular ile doğrultulmaktadır. Eski sistemler regülatör olarak manyetik ve dönen yükselticilerin kombinasyonunu kullanmaktaydı; yeni sistemler elektronik yükseltici regülatörler kullanılmaktadır. Şekil 2.10'da alan kontrollü alternatör doğrultuculu uyarım sistemi, Şekil 2.11'de alternatör kaynaklı kontrollü doğrultuculu uyarım sistemi ve Şekil 2.12'de fırçasız uyarım sistemi gösterilmektedir (İnt.Kyn.1).



Şekil 2.10 Alan kontrollü alternatör doğrultuculu uyarım sistemi (Kundur 1993).



Şekil 2.11 Alternatör kaynaklı kontrollü doğrultuculu uyarım sistemi (Kundur 1993).



Şekil 2.12 Fırçasız uyarım sistemi (İnt.Kyn.1).

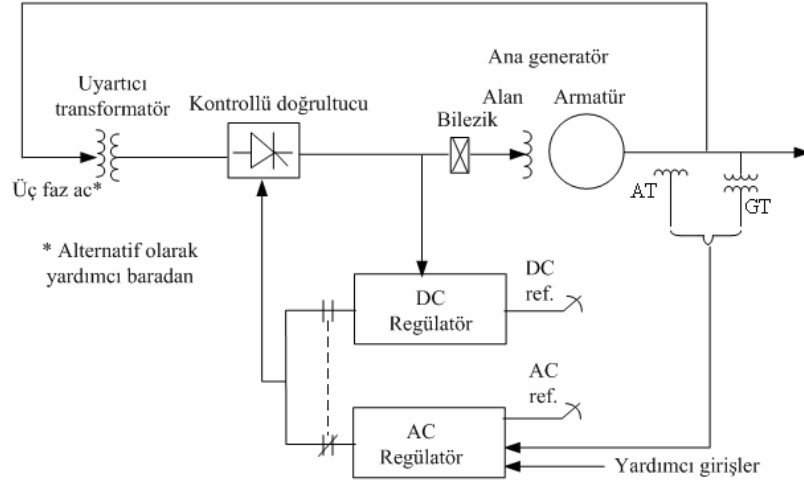
2.4.1.3 Statik uyarım sistemleri

Tüm bileşenler statiktir (yani sabit) ve DC generatör alanına bilezikler yoluyla sağlanmaktadır.

Doğrultulara güç, ana generatörden ya da yardımcı bara istasyonundan sağlanmaktadır. Üç temel çeşidi vardır:

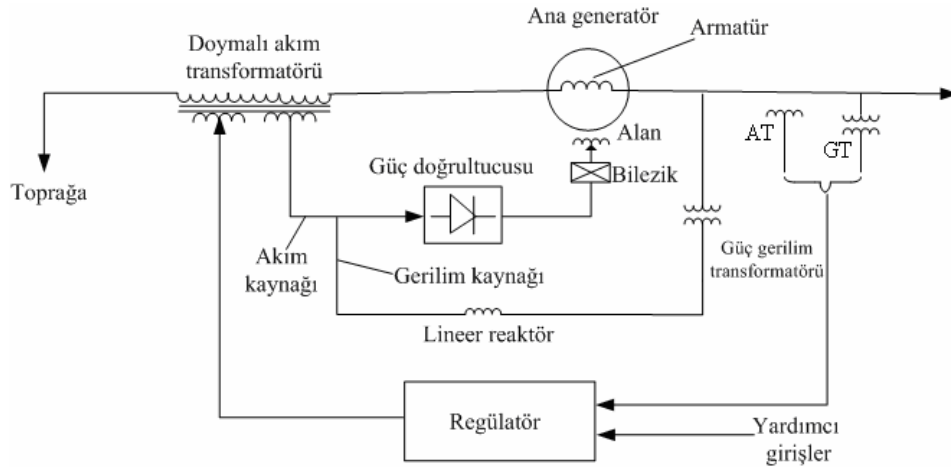
- 1- Gerilim kaynaklı kontrollü doğrultuculu uyarım sistemleri
- 2- Bileşik kaynaklı doğrultuculu uyarım sistemleri
- 3- Bileşik kontrollü doğrultuculu uyarım sistemleri (İnt.Kyn.1).

Gerilim kaynaklı kontrollü doğrultuculu uyarım sistemlerinde (Şekil 2.13) uyarım gücü transformatör aracılığıyla generatör terminallerinden ya da yardımcı bara istasyonundan sağlanmaktadır ve kontrollü doğrultucu ile regüle edilmektedir. Ucuz ve bakımı kolaydır (Kundur 1993).



Şekil 2.13 Gerilim kaynaklı kontrollü doğrultuculu uyarım sistemi (Kundur 1993).

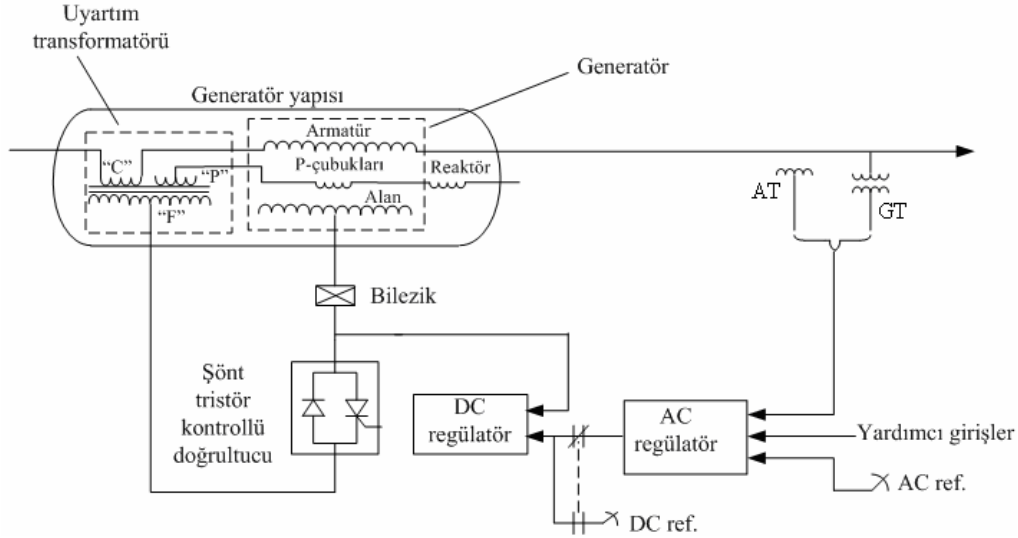
Bileşik kaynaklı doğrultuculu uyarım sistemi (Şekil 2.14) için güç ana generatörün gerilimi gibi akımını da kullanarak oluşturulmaktadır. Bu Gerilim Transformatörü (GT) ve Akım Transformatörü (AT) ile gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 2.14 Bileşik kaynaklı doğrultuculu uyarım sistemi (Kundur 1993).

Bileşik kontrollü doğrultuculu uyarım sistemlerinde uyartıcı çıkış devrelerinde kontrollü doğrultucular ve uyarım gücü üretmek için generatör statorunda gerilim ve akımdan türetilmiş kaynakların bileşimini kullanmaktadır.

Reaktör uyartım sisteminin istenen bileşik karakteristiğine katkı ve uyartım sistemindeki ya da generatördeki arızalar için arıza akımlarının azaltılması olmak üzere iki fonksiyon gerçekleştirmektedir. Şekil 2.15'te generrex bileşik kontrollü doğrultuculu uyartım sistemi gösterilmektedir (Kundur 1993).

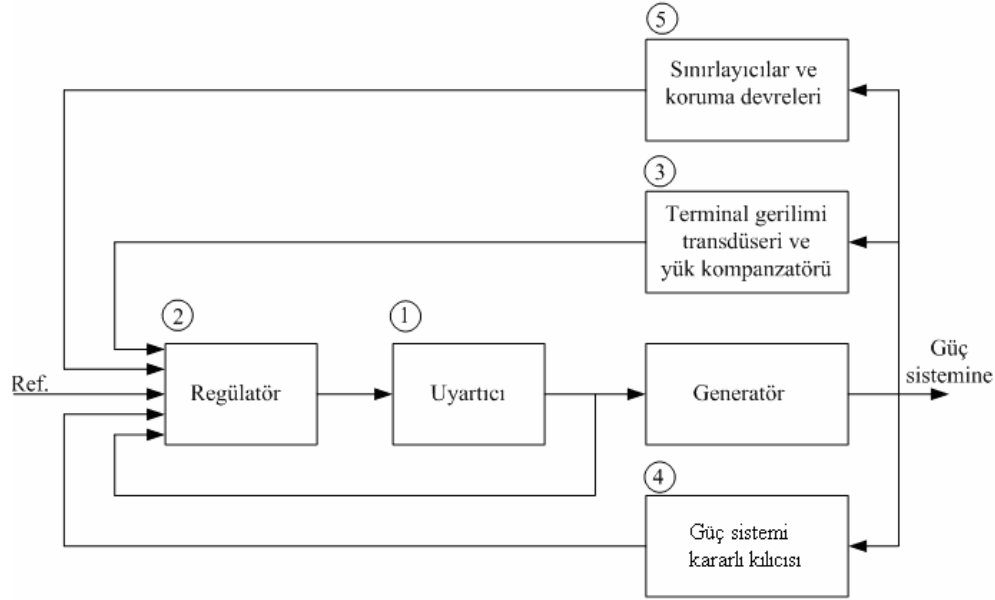


Şekil 2.15 Generrex bileşik kontrollü doğrultuculu uyartım sistemi (Kundur 1993).

2.5 Uyartım Kontrol Sistemi

Uyartım sistemi tüm güç, regülasyon, kontrol ve koruma elemanlarını içeren senkron makina için alan akımı sağlayan donanımdır. Uyartım kontrol sistemi ise senkron makina ve onun uyartım sistemini içeren geri beslemeli kontrol sistemidir (IEEE std. 421.4-1990). Eski uyartım sistemleri istenen generatör terminal gerilimini ve reaktif güç yüklemesini sürdürmek için manuel kontrol edilmiştir. İlk otomatik gerilim kontrolü, çok yavaştı, temel olarak uyartıcı rolünü gerçekleştirmiştir. Küçük sinyal ve geçici hal kararlılığı için 1920lerin başlarında, sürekli ve hızlı çalışan regülatörler keşfedilmiştir. Uyartım sistemlerinin tasarımına ilgi giderek artmış ve kısa süre sonra hızlı cevaplı gerilim regülatörleri ve uyartıcılar endüstriye kazandırılmıştır. 1960ların başlarında, sistem salınımlarını söndürmede alan gerilimini kontrol etmek için terminal gerilimi hata sinyaline ek olarak yardımcı kararlı kılıcı sinyallerinin kullanımına başlanmıştır. Uyartım kontrolünün bu bölümü GSKK olarak gösterilmektedir. Modern uyartım

sistemleri yüksek tavan gerilimleri ile anlık cevap sağlayabilmektedir. Yüksek alan zorlaması kapasitesi ve yardımcı kararlı kılıcı sinyallerinin kullanımı tüm sistemin dinamik performansının gelişimine önemli katkı sağlamıştır.



Şekil 2.16 Senkron generatör uyarım kontrolü sisteminin fonksiyonel blok diyagramı (Kundur 1993).

Şekil 2.16'da senkron generatöre ait uyarım kontrolü sisteminin fonksiyonel blok diyagramı gösterilmektedir. Birinci eleman (Şekil 2.16) uyarıcı uyarım sisteminin güç kademesini oluşturmaktadır; senkron makina alan sarımına DC güç sağlamaktadır. İkinci eleman (Şekil 2.16) regülâtör giriş kontrol sinyallerini uyarıcının kontrolü için uygun seviyeye ve şekle uygun olarak işlemekte ve yükseltmektedir. Bu hem regülasyon hem de uyarım sistemi kararlı kılıcı fonksiyonları içermektedir (hız geri beslemesi ya da ileri-geri kompanzasyon). Üçüncü eleman (Şekil 2.16) terminal gerilimi transdüseri ve yük kompanzâtörü generatör terminal gerilimini algılamakta, doğrultmakta, filtrelemekte ve istenen terminal gerilimine uygun bir referansla karşılaştırmaktadır. Generatör terminal geriliminden elektriksel olarak uzak bir noktada gerilimin sabit tutulması istenirse, ek olarak yük kompanzasyonu sağlayabilmektedir. Dördüncü eleman (Şekil 2.16) güç sistemi kararlı kılıcısı güç sistemi salınımlarını söndürmek için regülâtöre ek bir giriş sinyali sağlamaktadır. Beşinci eleman (Şekil 2.16) sınırlayıcılar

ve koruma devreleri geniş kontrol aralığı ve uyarıcı ve generatörün kapasite sınırlarının aşılmasını sağlayan koruma fonksiyonları içermektedir. Genelde kullanılan fonksiyonların bazıları alan akımı sınırlayıcısı, maksimum uyarım sınırlayıcısı, terminal gerilimi sınırlayıcısı, V/Hz regülatörü ve koruması, aşırı uyarım sınırlayıcısıdır. Bunlar normalde farklı devrelerdir ve çıkış sinyalleri bir toplama noktası ya da bir kapalı giriş olarak çeşitli yerlerde uyarım sistemine uygulanabilmektedir. Ancak Şekil 2.16'da gruplandırılarak tek bir blok olarak gösterilmektedir (Kundur 1993).

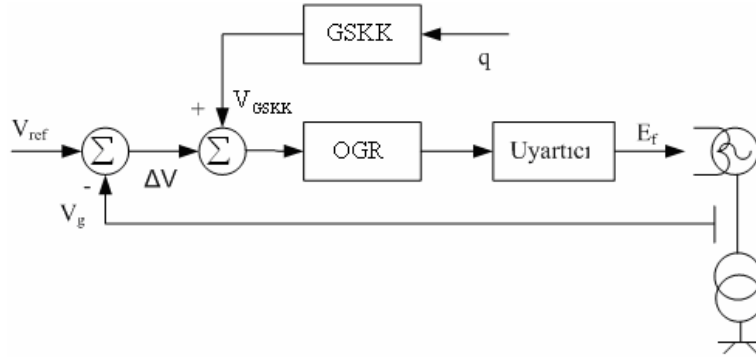
2.5.1 Otomatik gerilim regülatörü (OGR)

Eski sistemlerde gerilim regülatörü tamamen elle kontrol edilmiştir. Bu yüzden terminal gerilimi incelenir ve ayarlı alan reostası (gerilim regülatörü) istenen çıkış koşullarına göre ayarlanırdı. Çoğu modern sistemlerde gerilim regülatörü generatör çıkış gerilimini algılayan sonra istenen yönde uyarıcı kontrolünü değiştirerek düzeltici işlemi başlatan bir denetleyicidir (Anderson ve Fouad 1994). Bu yüzden OGR arıza durumlarında terminal gerilimlerini sürdürmeye çalışarak ve arıza temizlendikten sonra hızlıca terminal gerilimini geri kazanarak geçici hal kararlılığıyla ilgili çok önemli bir rol oynamaktadır (İnt.Kyn.1). OGR alt sistemi ayrıca OGR'yi, uyarıcıyı ve generatörü aşırı gerilimlerden ve akımlardan koruma fonksiyonu olan sınırlayıcılar içermektedir. Bunu OGR sinyallerini önceden belirlenen sınırlar içerisinde tutarak gerçekleştirmektedir. Böylece yükseltici aşırı yüksek giriş sinyaline karşı, uyarıcı ve generatör çok yüksek alan akımına karşı ve generatör çok yüksek stator akımına ve çok yüksek güç açısına karşı korunmaktadır (Machowski vd. 1997).

OGR arıza koşullarında armatür reaksiyonu etkileri tarafından azaltılmış olan akı eğiliminin tersine senkron makinada akı seviyelerini sürdürme şeklinde alan gerilimi zorlaması ile çalışmaktadır. Bu sıra ile terminal gerilimini ve böylece baradaki iletilen güç için generatörün kapasitesini devam ettirmektedir (İnt.Kyn.1).

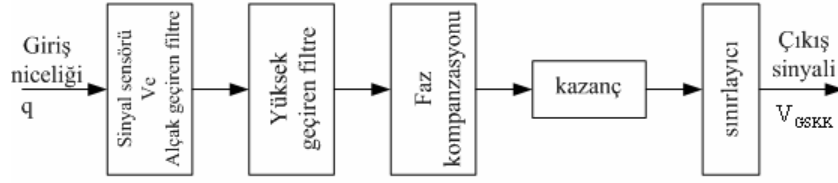
2.5.2 Güç sistemi kararlı kılıcı (GSKK)

Güç sistemi kararlı kılıcıları uyarım kontrolü ile sistem salınımlarının sönümünü geliştirmek için kullanılmaktadır (Chapman 2002). GSKK'lar en uygun maliyetli elektromekanik sönüm denetleyicileridir. Çünkü gerekli güç yükseltmesi generatörde yapılmaktadır. Sonuçta GSKK'lar son 20 yıldır birçok generatörle birlikte kullanılmaktadır (Rogers 2000).



Şekil 2.17 OGR sistemi için ek kontrol döngüsü blok diyagramı (Machowski vd. 1997).

Şekil 2.17'de gösterildiği gibi V_{GSKK} sinyali, ΔV ana gerilim hata sinyaline eklenmektedir. Kararlı halde V_{GSKK} sifıra eşit olduğunda gerilim regülasyon prosesini bozmamaktadır (Machowski vd. 1997). Genellikle kullanılan girişler şaft hızı, terminal frekansı ve güçtür. Giriş sinyali frekans olduğunda genellikle terminal frekansı kullanılmaktadır fakat bazı durumlarda simule edilen makina reaktansı arakasındaki frekans (çoğu çalışma için şaft hızına eşdeğer) da kullanılabilir (Chapman 2002). Kararlı halde, hız sapması sifır ya da sifıra yakın iken, gerilim denetleyicisinin sadece ΔV hata gerilimi ile sürülmesi gerekmektedir. Ayrıca geçici durumda generatör hızı sabittir, rotor salınımları ve rotor açısındaki değişimin neden olduğu salınımlarla karşılaşmaktadır. GSKK'nın görevi ΔV salınımlarını kompanze eden ve Δw ile aynı fazda sönüm bileşeni üreten ek bir sinyal eklemektir.



Şekil 2.18 GSKK'nın temel elemanları (Machowski vd. 1997).

Çıkış sinyali V_{GSKK} generatör terminallerinden ölçülen birçok farklı giriş sinyallerinden üretilebilen genel GSKK yapısı Şekil 2.18'de gösterilmektedir. Ölçülen nicelik (ya da nicelikler) alçak ve yüksek geçiren filtrelerden geçirilmektedir. Sonra filtrelenen sinyal gerekli faz kaymasını elde etmek için ileri ve/veya geri elemandan geçirilmektedir ve son olarak sinyal yükseltilmekte ve sınırlayıcıdan geçirilmektedir (Machowski vd. 1997).

2.6 Güç Sistemlerinde Kararlılık

Güç sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönme yeteneğidir (Tacer 1990). Bir güç sistemindeki kararsızlık, sistem yapısına ve çalışma moduna bağlı olarak farklı şekillerde ortaya çıkabilmektedir. Kararlılık genel olarak senkron çalışmanın korunması olarak tanımlanmaktadır (Arifoğlu 2002). Kararsızlıkla senkronizma kaybı olmaksızın da karşılaşılabilir. Örneğin, iletim hattında bir asenkron motor yükünü besleyen bir senkron generatörden oluşan sistem yük geriliminin düşüşünden dolayı kararsız olabilmektedir. Bu örnekte problem senkronizmanın korunması değildir, sorun kararlılık ve gerilim kontrolüdür. Kararsızlığın bu şekli büyük bir sistem tarafından beslenen geniş bir alanı kaplayan yüklerde meydana gelebilmektedir (Kundur 1993).

Kararlılık değerlendirilmesinde önemli olan geçici bir bozulma olduğunda güç sisteminin davranışdır. Bozulma küçük ya da büyük olabilmektedir. Yük değişimleri şeklindeki küçük bozulmalar sürekli meydana gelmektedir ve sistem kendini değişen koşullara göre ayarlamaktadır. Sistem bu koşullar altında memnun edici olarak çalışabilmeli ve maksimum miktarda yükü yeterli şekilde besleyebilmelidir. Bu aynı

zamanda iletim hattı kısa devresi, iki alt sistem arasındaki bağlantının kaybı, büyük bir generatör ya da yük kaybı gibi pek çok ağır bozulmalara dayanma yeteneği olmalıdır (Kundur 1993). Elektriksel gücün üretiminde güç sistemleri senkron makinalara bağımlı olduğundan, sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için gereken koşul, tüm senkron makinaların senkronizmada kalmasıdır. Bu kararlılık düşüncesi, generatör rotor açılarına ilişkin dinamikler ve güç-açı bağıntıları ile ifade edilebilmektedir (Arifoğlu 2002). Enterkonnekte senkron makinaları birbirleriyle senkronizmada tutan mekanizma diğer makinalara göre bir ya da daha fazla makinayı hızlandıran veya yavaşlatan kuvvetler oluştuğunda ortaya çıkan düzeltici kuvvetlerden yola çıkarak sağlanmaktadır.

Sürekli durumda her bir makinanın elektriksel çıkış momenti ve mekanik giriş momenti arasında bir denge vardır ve hız sabit kalmaktadır. Sistem bozulmuşsa bu denge durumu bozulmaktadır, makinaların rotorlarının hızlanması ya da yavaşlaması dönen cismin hareket kurallarına bağlıdır. Bir generatör sürekli olarak diğerinden daha hızlı gidiyorsa, yavaş giden makinaya göre onun rotorunun açısal durumu ileri olacaktır. Sonuçta, ortaya çıkan açısal fark yükün bir kısmını yavaş makinadan hızlı makinaya, güç açığı bağıntısına bağlı olarak aktarmaktadır. Bu yönelim hız farkını azaltacaktır ve sonuç olarak açısal fark azalacaktır. Güç açığı bağıntısı nonlineer olduğundan belli sınırlar ötesinde açısal sapmadaki bir artış güç iletiminde bir azalmaya eşlik etmektedir; bu açısal sapmayı ileri olarak arttırmakta ve kararsızlığa neden olmaktadır. Herhangi belli bir durum için, sistemin kararlılığı rotorların açısal durumlarındaki sapmaların yeterli düzelme momentlerini oluşturup oluşturmadıklarına bağlıdır (Demirören ve Zeynelgil 2004). Sistemin bozulmaya cevabı cihazların çoğunu etkilemektedir. Örneğin koruma röleleri tarafından arızanın yalıtımı ile izlenen kritik bir elemandaki kısa devre güç iletimlerinde, makina rotor hızlarında ve bara gerilimlerinde değişimlere neden olacaktır; gerilim değişimleri hem generatör hem de iletim sistemi gerilim regülatörlerini uyaracak; hız değişimleri tahrik makinasını uyaracak; bağlı yüklerdeki değişim üretim kontrollerini uyaracak; gerilim ve frekanstaki değişimler karakteristiklerine bağlı olarak değişme derecelerinde sistemdeki yükleri etkileyecektir. Ayrıca, her bir cihazı korumada kullanılan aygıtlar sistem değişkenlerindeki değişimlere tepki gösterebilmektedir ve bu yüzden sistem performansını etkilemektedir. Ayrıca verilen her durumda sadece sınırlı sayıda cihazın cevapları önemli olabilmektedir. Bu

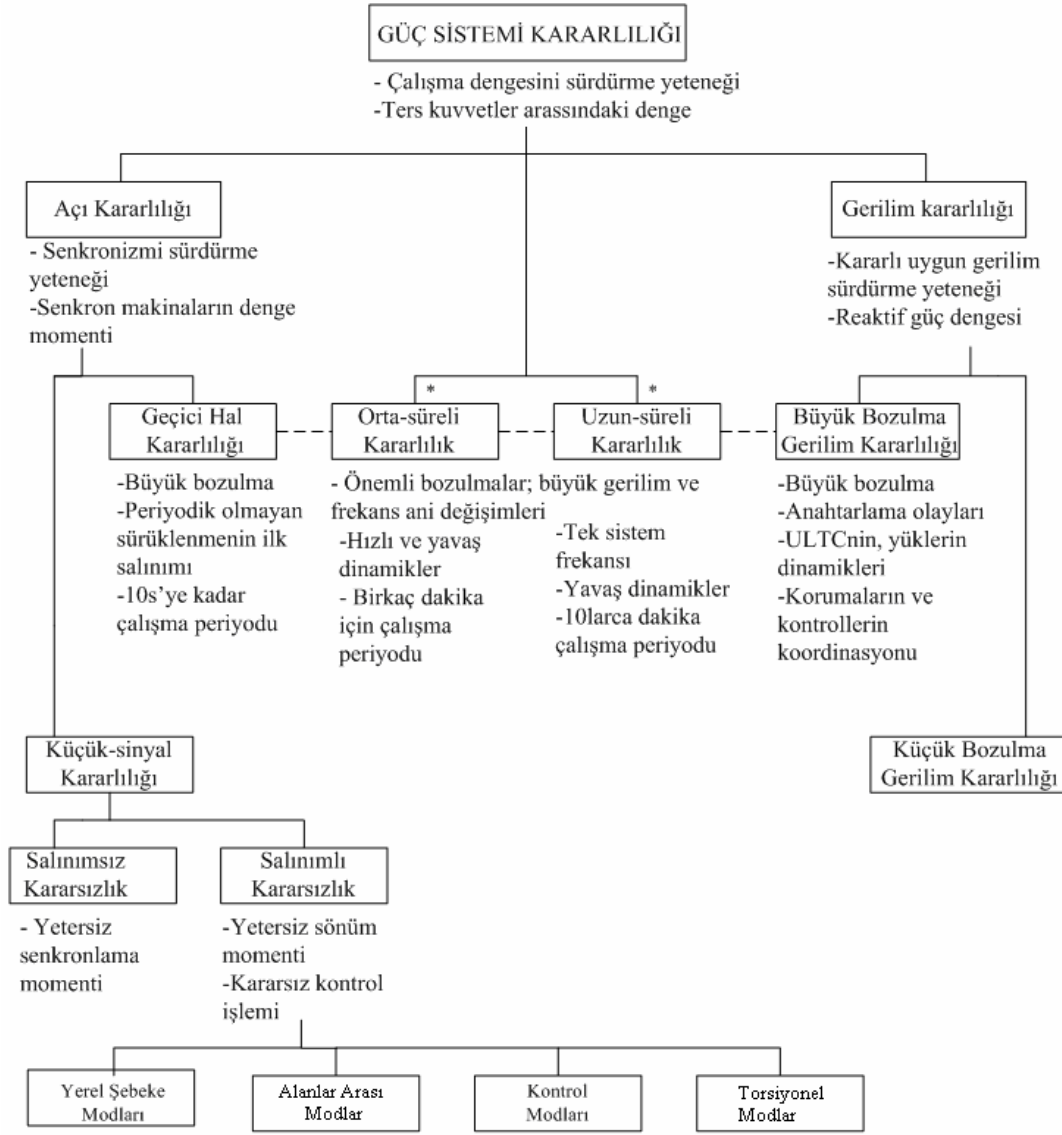
nedenle problemi basitleştirmek ve kararlılık probleminin çeşidini etkileyen faktörler üzerinde yoğunlaşmak için genellikle birçok varsayım yapılmaktadır. Kararlılık problemlerinin anlaşılması kararlılığın çeşitli sınıflara ayrılması ile sağlanmaktadır (Kundur 1993).

2.6.1 Kararlılığın sınıflandırılması

Güç sistemlerinde sistemlerin kararlılığı aslında tek bir problemdir ama bu şekilde ele almak pratik değildir. Sistemin kararsızlığı farklı şekillerde olabilmektedir ve farklı faktörlerden etkilenmektedir. Kararlılık analizi probleminde kararsızlığa neden olan asıl faktörlerin tanımlanması ve kararlı çalışmayı sağlamak için kararlılığı çeşitli sınıflara ayırarak incelenmesi son derece faydalıdır (Demirören ve Zeynelgil 2004). Şekil 2.19 sınıf ve alt sınıflarıyla güç sistemi kararlılık probleminin tamamını göstermektedir. Sınıflandırma birçok farklı düşünceye dayanmaktadır (Kundur 1993). Bu sınıflama aşağıdaki faktörlere göre yapılmaktadır (Demirören ve Zeynelgil 2004).

- Sonuçta oluşan kararsızlığın fiziksel doğası;
- İncelenen bozucunun büyüklüğü;
- Kararlılığı belirlemek için dikkate alınması gereken aygıtlar, işlemler ve zaman aralığı
- Kararlılığın tahmin edilmesinde ve hesaplanmasında en uygun yöntem.

Pratik kullanım için uygun ve kesin olan tanımlamalar üretmek ve tamamen bağımsız kategoriler seçmek zordur. Örneğin orta-süreli/uzun-süreli kararlılık ve gerilim kararlılığı arasında bazı benzerlikler vardır (Kundur 1993).



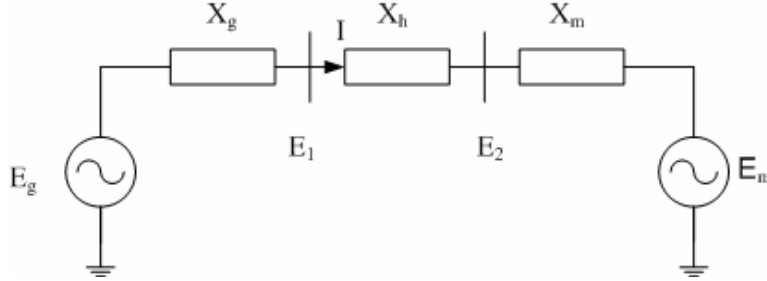
* Orta-süreli ve uzun-süreli kararlılık arasındaki fark yavaş ve hızlı dinamiklerin analizi için birleştirilmiş yaklaşım sağlayan geliştirilen analitik tekniklerin kullanırlığı ile daha az önemli olur.

Şekil 2.19 Güç sistemi kararlılığının sınıflandırılması (Kundur 1993).

2.6.1.1 Rotor açısı kararlılığı

Rotor açısı kararlılığı güç sistemindeki enterkonnekte bağlı senkron makinaların senkronizmayı sürdürme yeteneğidir. Kararlılık problemi güç sistemindeki içsel elektromekanik salınımların incelenmesini kapsamaktadır. Bu problemde temel faktör rotor salınımlarından dolayı senkron makinaların güç çıkışlarının da değişimidir

(Kundur 1993). İki ya da daha fazla senkron makina birlikte çalışırken, tüm makinaların stator gerilimleri ve akımları aynı frekansa sahip ve her rotorun mekanik hızı bu frekansa uyumlu olmalıdır. Böylece birlikte çalışan tüm senkron makinalar senkronizmada kalmaktadır.



Şekil 2.20 İki makinalı bir sistemin güç iletim modeli (Arifoğlu 2002).

Güç sistem kararlılığında önemli olan karakteristik, senkron makinaların rotorlarının açısal konumları ile güç alış-verişi arasındaki bağıntıdır. Şekil 2.20’de görüldüğü gibi, direnci ve kapasitansı ihmal edilmiş yalnız X_h reaktansına sahip olan bir iletim hattı ile birbirlerine bağlı iki senkron makinadan meydana gelen basit bir sistem incelendiğinde generatör senkron motora güç sağlamaktadır. Generatörden motora iletilen güç değeri, iki makinanın rotorları arasındaki δ açısal farkın fonksiyonu ile değişmektedir. Bu açı farkı üç bileşenden oluşmaktadır; generatör iç açısı δ_g , generatör ve motorun uç gerilimleri arasındaki açı farkı δ_h ve motorun iç açısı δ_m .

$$P_e = \frac{E_g \cdot E_m}{X_T} \cdot \sin \delta \quad (2.3)$$

$$X_T = X_g + X_h + X_m \quad (2.4)$$

Gücün açığa göre değişimi sinüs biçiminde olup (2.3) ile ifade edilmektedir. Daha ayrıntılı makina modellerinde diğer şekildeki sapmalarda göz önüne alınabilmektedir. Ancak genel olarak bu değişimin sinüs formundan fazla ayrılmadığı söylenebilmektedir. X_T generatörle motor arasındaki seri empedanstır ve (2.4) ile ifade edilmektedir. E_g generatör iç EMK’sını, E_m motor iç EMK’sını göstermektedir (Arifoğlu 2002).

Açı sıfır olduğunda güç iletimi olmamaktadır. Açı büyütülürken, güç transferi maksimuma ulaşmaktadır. 90^0 'de nominal olan belli bir değerden sonra, açığı daha çok arttırmak, güç iletiminde azalmaya sebep olmaktadır. Bu yüzden iki makina arasında iletilebilecek maksimum sürekli durum gücü vardır. İki makinadan daha fazla makina olduğunda, onların açısız yer değiştirmeleri de benzer şekilde güç alış-verişini etkilemektedir.

Analize uygunluk için ve kararlılık problemlerinin özelliklerini daha iyi anlamak için rotor açısı kararlılığı geçici hal kararlılığı ve küçük sinyal kararlılığı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Geçici hal kararlılığı şiddetli bir geçici bozulmayla karşılaşıldığında güç sisteminin senkronizmayı koruma yeteneğidir (Demirören ve Zeynelgil 2004). Bu bozucu etkiler sonucunda generatör rotor açılarındaki büyük titreşimler meydana gelmektedir (Arifoğlu 2002). Enerji sistemi büyük bir bozucu etkiye maruz kaldığında sistemdeki senkron makinalara ilişkin rotor (yük) açılarındaki ilk salınımları büyük öneme sahiptir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği ya da kararlı olarak çalışması, ilk salınımdan sonraki salınımların birincisinden daha küçük olmaları ile belirlenmektedir (Tacer 1990). Arızaların genellikle iletim hatları üzerinde oluştuğu düşünülürken birlikte, bazen bara ve transformatör arızaları da göz önüne alınmaktadır. Kararlılık, sistemin başlangıçtaki çalışma durumuna, bozucu etkinin yerine, cinsine ve şiddetine bağlıdır. Geçici hal kararlılık incelemelerinde inceleme süresi, küçük sistemlerde bozucu etkiyi izleyen 3 veya 5 saniye ile sınırlı olmakla beraber, çok büyük sistemler için yaklaşık 10 saniyeye kadar genişleyebilmektedir (Arifoğlu 2002). Senkron generatöre yakın bir arıza, hızlanma gücünde daha ciddi bir etki yapmaktadır ve böylece kararsızlık riskini arttırmaktadır. Artan arıza süresi de makina açısında artışa neden olmaktadır (Yadipour 1989).

Senkron makina teorisinden kararlı hal durumunda rotor açısı 90^0 'ye ulaştığında (yani kararlı hal kararlılık sınırı) rotor ve stator arasındaki senkronlama gücü sıfıra ulaşmaktadır. Bununla birlikte, geçici durumlarda bu açı kararlılığını (senkronizmayı)

kaybetmeksizin geçici olarak 90^0 'yi aşabilmektedir. Bu senkron makinanın (ve güç sistemlerinin) kararlı hal kararlılığı ve geçici hal kararlılığı arasındaki önemli bir farktır.

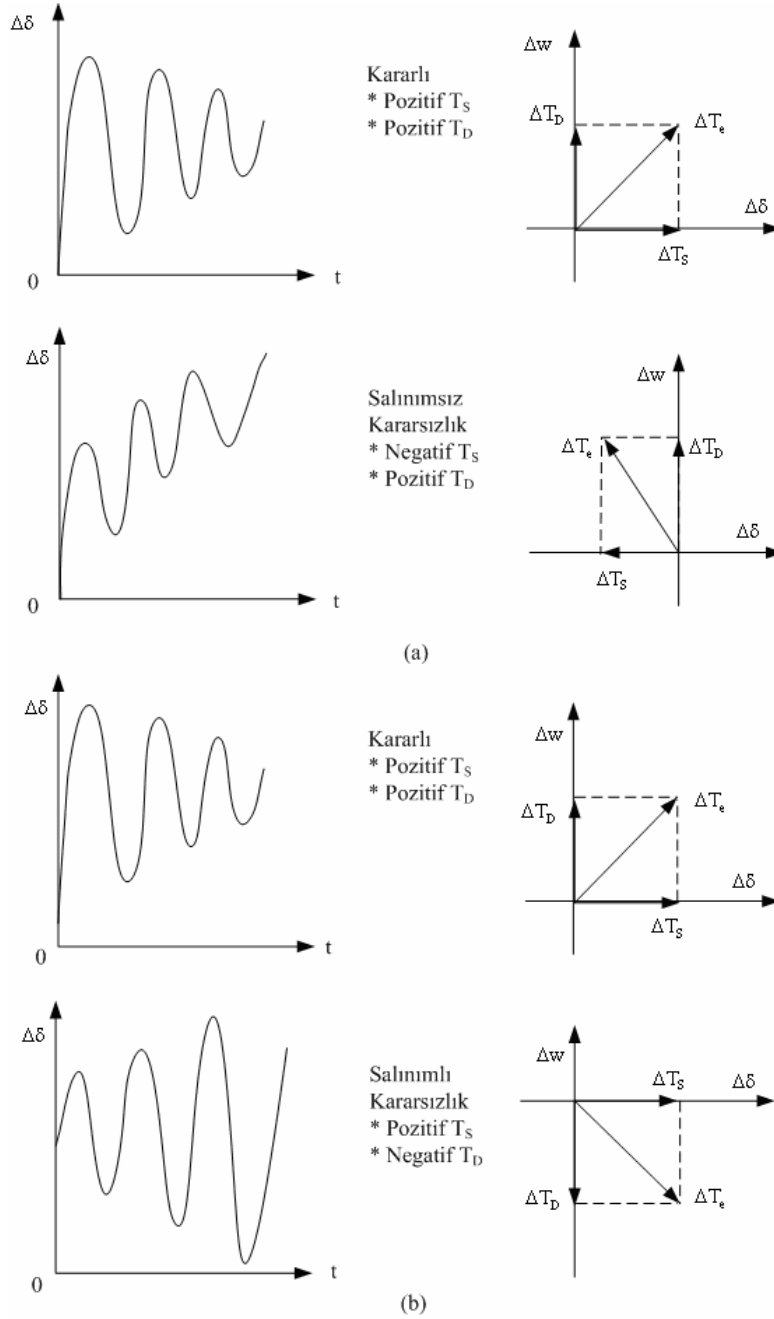
Geçici hal kararlılık sınırı ani (genellikle büyük) bir bozulmadan sonra kararlılığın sürdürülmesine izin verilecek bir noktada olası maksimum güç akışını anlatmaktadır. Geçici hal kararlılık sınırı kararlı hal kararlılık sınırından düşüktür ve bu yüzden daha önemlidir (İnt.Kyn.1).

Geçici Hal Kararlılığını Etkileyen Faktörler;

- Generatör ataleti- Daha yüksek ataletle açı değişim oranı daha yavaştır. Bu arıza süresince kazanılan kinetik enerjiyi azaltmaktadır.
- Generatör yüklenmesi
- Arıza süresince generatör çıkışı (güç transferi)- Bu arıza yerine ve arıza çeşidine bağlıdır.
- Arıza temizleme zamanı
- Arıza sonrası iletim sistemi reaktansı
- Generatör reaktansı- Daha düşük reaktans güç tepe değerini artırır ve ilk rotor açısını azaltmaktadır.
- Generatör iç gerilim genliği- Bu alan uyarımına bağlıdır.
- Sonsuz bara gerilimi genliği (Kundur 1993).

Küçük sinyal kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalarda senkronizmayı sürdürme yeteneğidir. Yükteki ve üretimdeki küçük değişimlerin neden olduğu böyle bozulmalar sistemde sürekli meydana gelmektedir. Kararsızlık iki şekilde meydana gelebilmektedir; (i) yeterli senkronlayıcı momentin kaybindan dolayı rotor açısında kararlı artış ya da (ii) yeterli sönüm momentinin kaybindan dolayı rotor salınımlarının genliğinde artış. Küçük bozucuya sistem cevabının özelliği; ilk çalışmayı, iletim sistemi dayanıklılığı ve kullanılan generatör uyarım kontrolleri çeşidini içeren birçok faktöre bağlıdır. Büyük bir güç sistemine bağlı generatör için OGR yoksa (yani sabit alan gerilimli) kararsızlığın nedeni yeterli senkronlayıcı momentin kaybıdır. Bu kararsızlık Şekil 2.21(a)'da gösterildiği gibi salınımsız modla sonuçlanmaktadır. Sürekli çalışan gerilim

regülatörü ile küçük sinyal kararlılık problemi sistem salınımlarının yeterli sönümünü sağlamaktır. Kararsızlık problemi salınımların genliğinin artmasıdır. Şekil 2.21(b) OGR ile generatörün cevabını göstermektedir (Kundur 1993).



Şekil 2.21 Küçük bozulma cevabının özelliği

a)Sabit alan gerilimli; b)Uyartım kontrollü (Kundur 1993).

Genelde, güç sistemi davranışının/olayının belli kategorileri küçük sinyal kararlılık kategorisinde olduğu (deneyimlerden ve testlerden) bilinmektedir. Örneğin:

- Yerel ve alanlar arası salınımlar (yetersiz sönüm);
- Senkronaltı rezonans;
- Kontrol modlarının kararlılığı (İnt.Kyn.1).

Yerel modlar veya makina-sistem modları güç sisteminin kalanına göre bir üretim santralindeki birimlerin salınımlarıyla ilgilidir. Yerel terimi güç sisteminin küçük bir kısmındaki ya da bir santraldeki salınımlar bölgeleştirildiğinde kullanılmaktadır.

Alanlar arası mod sistemin diğer kısımlarındaki makinalara karşı sistemin bir kısmındaki birçok makinanın salınımlarıyla ilgilidir. Bu zayıf bağlarla enterkonnekte bağlanan yakın kupajlı makina grupları ya da iki grup tarafından oluşturulmaktadır.

Kontrol modları üretim birimleri ile ve diğer kontrollerle ilgilidir. Zayıf ayarlı uyarımlar, hız regülatörleri, YGDA dönüştürücüleri ve statik Var kompanzatörleri çoğunlukla bu modların kararsızlığına neden olmaktadır.

Torsiyonel modlar sistemin dönen türbin-generator mili ile ilgilidir. Torsiyonel modların kararsızlığı uyarım kontrolleri, hız regülatörleri, YGDA denetleyiciler ve seri kompanzasyonlu hatlar tarafından oluşturulabilmektedir (Demirören ve Zeynelgil 2004).

2.6.1.2 Gerilim kararlılığı

Gerilim kararlılığı güç sisteminin normal çalışma koşullarında ve bir bozulmadan sonra sistemdeki tüm baralarda kabul edilebilir kararlı gerilimler sürdürme yeteneğidir(Kundur 1993). Sistemdeki en azından bir barada, aynı baraya giren reaktif güç artarken, bara gerilim genliği azalırsa sistem gerilim olarak kararsızdır. Diğer bir deyişle V-Q duyarlılığı her bara için pozitifse sistem gerilim kararlıdır ve V-Q duyarlılığı en azından bir bara için negatifse gerilim kararsızdır (Demirören ve

Zeynelgil 2004). Gerilim kararlılığı aslında yerel bir olaydır; bununla birlikte sonuçları geniş bir etkiye sahip olabilmektedir. Gerilim düşüşü basit bir gerilim kararsızlığından daha karmaşıktır ve genellikle güç sisteminin belli bir kısmında düşük gerilim profiline yol açan gerilim kararsızlığına eşlik eden olaylar sırasının sonuçlarıdır (Kundur 1993).

Sistem koşulundaki bir bozulma, yük talebindeki artış ya da değişim, ilerleyen ve kontrol edilemeyen bir gerilim düşüşüne neden olursa, sistem gerilim kararsızlığı durumuna girmektedir. Kararsızlığa neden olan temel faktör güç sisteminin reaktif güç talebini karşılamadaki yetersizliğidir. Problemin kalbi genellikle aktif güç ve reaktif güç, iletim şebekesi endüktif reaktanslarından akarken meydana gelen gerilim düşüşüdür (Kundur 1993).

Gerilim kararsızlığı her zaman saf şekilde meydana gelmemektedir. Genellikle açığı ve gerilim kararsızlıkları ile birlikte meydana gelmektedir ya da biri diğerine yol açabilmekte ve fark açıkça görülmeyebilmektedir. Ayrıca açığı kararlılığı ve gerilim kararlılığı arasındaki fark uygun tasarım ve çalışma prosedürü geliştirmek için problemlerin altındaki nedenleri anlamak için önemlidir (Kundur 1993). Baraj gerilimindeki sürekli düşme, rotor açılarının nominal çalışma durumuna getirilmesi ile ilgilidir. Örneğin iki makina grubu arasındaki rotor açıları 180^0 'ye yaklaşırken veya bunu aştığında makinalardaki kademeli senkronizma kaybı, şebekenin ortalarında çok düşük gerilimlere neden olacaktır. Tersine, rotor açısı kararlılığının konu olmadığı yerde oluşan devamlı düşen gerilim durumu gerilim kararsızlığı ile ilgilidir (Demirören ve Zeynelgil 2004).

Gerilim kararlılığını büyük bozulma gerilim kararlılığı ve küçük bozulma gerilim kararlılığı olarak iki alt sınıfa ayırmak faydalıdır. Bu alt sınıflar özellikle nonlineer dinamik analiz ile incelenmesi zorunlu olan olaylardan kararlı-hal analizi kullanılarak incelenebilecekleri ayırmaktadır.

Büyük bozulma gerilim kararlılığı, sistemin sistem arızası, yük kaybı ya da üretim kaybı gibi büyük bozulmalardan sonra gerilimi kontrol edebilme yeteneğidir. Küçük bozulma

(ya da küçük sinyal) gerilim kararlılığı yükteki değişimler gibi küçük bozulmalardan sonra sistem gerilimini kontrol edebilme yeteneğidir (Kundur 1993).

2.6.1.3 Orta-sürelili ve uzun-sürelili kararlılık

Uzun-sürelili kararlılık ve orta-sürelili kararlılık güç sistemi kararlılık literatürüne göre nispeten yenidir. Önemli bozulmalara güç sistemlerinin dinamik cevabıyla ilgili problemlerle ilgilenme ihtiyacının sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Önemli sistem bozulmaları gerilimin, frekansın ve güç akışlarının büyük ani değişimlerine neden olmaktadır. Böylece klasik geçici kararlılık çalışmalarında modellenmeyen yavaş işlemleri, kontrolleri ve korumaları gerektirmektedir. Büyük gerilim ve frekans değişimleri ile harekete geçirilen işlemlerin ve aygıtların karakteristik zamanları saniyelerden (generatör kontrollerinin ve korumalarının cevabı) birkaç dakikaya (türbin enerji kaynağı sistemleri ve yük-gerilim regülatörleri gibi aygıtların cevabı) yükselecektir.

Uzun-sürelili kararlılık analizi makinalar arası senkronlama gücü sınımlarının sönüğünü, böylece tek sistem frekansı olduğunu kabul etmektedir. İlgili merkezi büyük ölçekli sistem bozulmalarından sonra oluşan aktif ve reaktif gücün üretimi ve tüketimi arasındaki sürekli uyumsuzluklar olan daha yavaş ve daha uzun-sürelili olaydır. Bu olay şunları içermektedir: termal birimlerin kazan dinamikleri, hidro birimlerin su borusu ve kablo borusu dinamikleri, OÜK, enerji şebekesi ve iletim sistemi koruma/kontrolleri, transformatör doyumu ve yükteki ve şebekedeki off-nominal frekans etkileri.

Orta-sürelili cevap kısa-sürelili ve uzun-sürelili cevaplar arasındaki geçişi göstermektedir. Orta-sürelili kararlılık çalışmalarında, ilgili merkezi daha yavaş olayların bazıları muhtemelen ani büyük gerilim ya da frekans değişimlerinin etkilerini içeren makinalar arasındaki senkronlama gücü sınımlarıdır.

Zaman periyodlarının tipik aralıkları; kısa-sürelili ya da geçici: 0-10s, orta-sürelili: 10s- birkaç dakika ve uzun-sürelili: birkaç dakika- dakikalar.

Orta-sürekli ve uzun-sürekli kararlılık arasındaki fark zaman periyodundan ziyade özellikle hızlı geçici bozulmalara ve makinalar arası salınımlarına göre sistemin gösterimine ve analizi olayına dayanmaktadır.

Genelde, uzun-sürekli ve orta-sürekli kararlılık problemleri cihaz cevaplarındaki, koruma ve kontrol cihazlarının zayıf koordinasyonu ya da yetersiz aktif/reaktif güç kaynakları ile ilgilidir.

Uzun-sürekli kararlılık normal sistem tasarım kriterinden başka beklenmedik durumlar içeren temel bozulmalara sistemin verdiği cevapla ilgilidir. Bu güç sisteminin her adada senkronizmanın sürdürüldüğü birçok generatörlü adaya ayrılmasını ve kaskat bağlanmasını gerektirebilmektedir. Bu durumda kararlılık, minimum yük kaybıyla dengeli çalışma olan uygun duruma her adanın ulaşip ulaşamayacağı sorusuyla ilgilidir. Makinaların bağıl hareketinden ziyade frekans ile gösterildiğinden adanın tüm cevabı ile belirlenmektedir.

Uzun-sürekli ve orta-sürekli kararlılık analizinin diğer uygulamaları transformatör kademe değişiminin, generatör aşırı uyarım korumasının ve reaktif güç sınırlarının ve termostatik yüklerin etkilerinin simülasyonunu gerektiren gerilim kararlılığının dinamik analizini içermektedir. Bu durumda, makinalar arası salınımlar muhtemelen önemli değildir. Bununla birlikte ilgili hız dinamiklerinin bazısının ihmal edilmemesi araştırılmalıdır. Uzun-sürekli ve orta-sürekli kararlılık analizi ile ilgili sınırlı literatür vardır (Kundur 1993).

2.7 Modelleme

Büyük güç sistemleri ile çalışırken her bir bileşeni ve her birinin tüm ayrıntısını göstermek pratik değildir. Modellerde sadeleştirmeler yapılarak hesaplama yoğunluğu azaltılmaktadır. Geçici hal durumlarında senkron generatörün temel dinamik davranışları basit generatör ve şebeke modeli kullanılarak elde edilebilmektedir (Ong 1997). Aynı zamanda oluşturulacak matematiksel modeller, sistemin gerçek fiziksel

davranışına uygun olmalıdır. Bu görüş açısından kararlılık analizi için oluşturulacak matematiksel model;

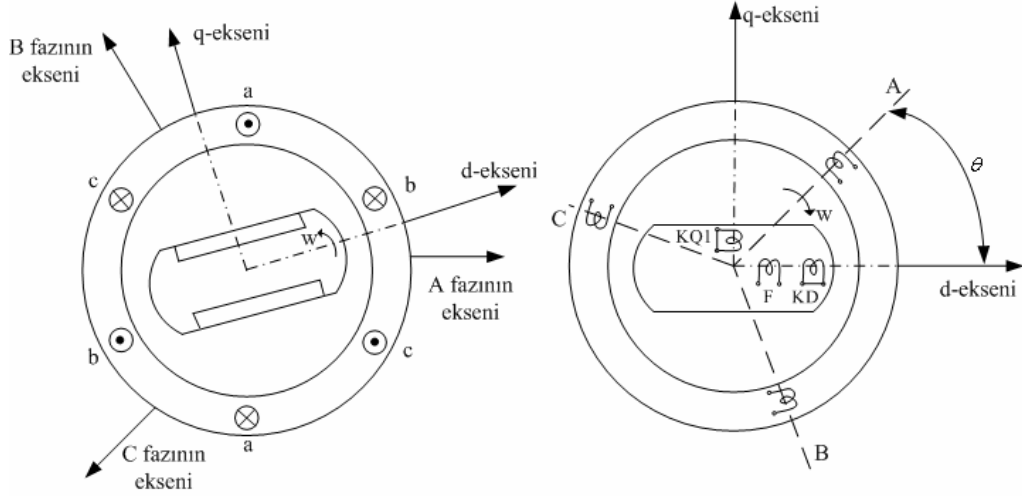
- Sistemin sürekli hal çalışma koşullarını,
- Sistemin bir bozucu etki öncesindeki, bozucu etki sırasındaki ve bozucu etki sonrasındaki elektriksel eşdeğer devrelerini,
- Elektriksel yükler ve bunların çalışma karakteristiklerini,
- Senkron makinaların parametrelerini,
- Senkron makinalara ilişkin uyarım sistemlerinin özelliklerini,
- Tahrik sistemleri ve bunlara ilişkin mekanik regülatörlerin özelliklerini,
- Yardımcı kararlı kılıcı işaretler ve bunları sağlayan sistemlerin özelliklerini içermelidir (Tacer 1990).

Güç sistemindeki senkron generatörler arasında elektromekanik salınım frekansı 0.5-3Hz. aralığındadır. Makinanın elektromekanik salınımlarının periyoduna göre kısa olan geçici hal öncesi zaman sabiti çoğu makina için 0.03-0.04s. aralığındadır. Fakat 0.5-10s. aralığında olan geçici hal zaman sabiti genellikle elektromekanik salınımların periyodundan daha uzundur. Pratikte ele alınan problem için önemli olan frekans cevabı aralığına dayanarak gerekli doğrulukta uygun modeller seçilebilmektedir (Ong 1997).

2.7.1 Senkron makinanın dinamik modellenmesi

Senkron makinanın denklemlerini geliştirmek için aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

1. Stator MMK'sı ve akı dalgaları sinüsoidaldir.
2. Manyetik devre lineerdir; yani doyumsuzdur.
3. Histerezis ihmal edilir.
4. Sarımlar ve kaynak dengelidir.



Şekil 2.22 Senkron makinanın idealleştirilmiş gösterimi (İnt.Kyn.1).

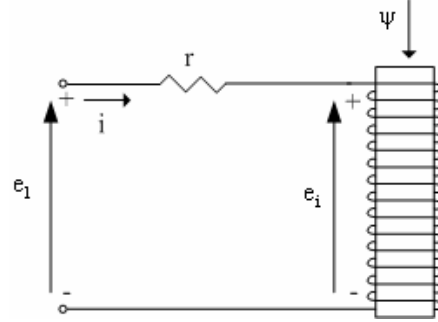
Şekil 2.22 senkron makina analizinde gereken devreleri göstermektedir. A, B, C alternatif akım taşıyan stator bobinleridir. Bu sarımlar hava boşluğunda dönen stator MMK dalgasını ve stator akı dalgasını oluşturmaktadır. F alan bobini DC alan (uyartım) akımını taşımaktadır, alan MMK'sını ve alan akısını üretmektedir.

KD ve KQ1 kısa devreli bobinleri sönüm (amortisör) sarımlarıdır. Rotorda endüklenen akımlara yol sağlayan, böylece geçici hal rotor salınımlarında var olan enerji dağıtımına yardım eden, ya rotora yerleştirilmiş çubuklar ya da rotordaki oluk kamalarıdır. Silindirik rotorlu makinada d ve q eksenlerindeki rotor devrelerinin sayısı eşittir, çıkık kutuplu makinada ise q ekseninde daha az rotor devresi vardır.

Modelin çıkarılmasında ihmal edilmesine rağmen, doyma ve etkileri çok önemli olabilmektedir. Doyma model çıkarımını kolaylaştırmak için ihmal edilmektedir ve etkilerinin gerekli olduğu daha sonraki aşamada dikkate alınmaktadır.

Basitçe devre teorisi ve Faraday Kanunu kullanılarak makinanın her bir elektriksel devresi ya da bobini için bir dinamik model (tanımlama denklemi) yazılmaktadır (İnt.Kyn.1).

Şekil 2.23'teki tek uyarımlı bobinden oluşan temel devrenin incelenmesi daha kolay anlamayı sağlamaktadır. Bobin N tane sarımdan oluşmaktadır ve direnci r'dir. Lineer akı-MMK ilişkisine sahip olduğu kabul edilmektedir. Faradaya kanununa göre endüklenen gerilim e_i (2.5)'te ve gerilim ifadesi (2.6)'da verildiği gibidir.



Şekil 2.23 Tek uyarımlı manyetik devre (Kundur 1993).

$$e_i = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

$$e_1 = e_i + i.r \quad (2.6)$$

Akının, devrenin endüktansı ile ifadesi (2.7)'deki gibidir (Kundur 1993).

$$\phi = L.i \quad (2.7)$$

$$\psi = N.\phi = N.L.i \quad (2.8)$$

Makinaların dinamik modellenmesinde bir sarımdan oluşan bobin incelenmektedir. Böylece $N=1$ için $\phi = \psi$ 'dir. Buna göre halkalama akısı ve gerilim denklemleri (2.9) ve (2.10)'daki gibi yazılabilmektedir.

$$\psi = L.i \quad (2.9)$$

$$v = \frac{d\psi}{dt} + i.r \quad (2.10)$$

Son olarak halkalama akısı ifadesi gerilim denkleminde yerine yazılırsa (2.11) elde edilmektedir. (2.11) RL devresinin dinamik elektriksel denklemidir (İnt.Kyn.1).

$$v = p(Li) + i.r = L(pi) + i.r$$

$$v = L \frac{di}{dt} + i.r \quad (2.11)$$

Bir senkron makina düşünöldüğünde iççerilen devrelerin çok olmasının yanı sıra stator devrelerinin ortak ve öz endüktanslarının rotor konumu ile değışmesinden dolayı denklemler karmaşıklaşmaktadır. Eşit olmayan hava boşluğundan dolayı manyetik akı yolunun manyetik iletkenliğindeki değışim endüktansların değışmesine neden olmaktadır. Çıkıntılı kutuplu makinada bu manyetik iletkenlik iki eksende önemli ölçüde farklıdır. Alan sınımları oluklarından dolayı silindirik rotorlu makinada da iki eksende farklılıklar vardır.

Stator sarımı tarafından üretilen akı, stator üzerinden bir yol izlemektedir, hava boşluğundan, rotordan geçmektedir ve hava boşluğuna geri dönmektedir (Kundur 1993).

1. Her bobini halkalayan akı (A, B, C, F, KD, KQ1) birçok farklı bobinin etkisinden oluştuğunu ve
2. Bu bobinlerin karşılıklı endüktansının rotorun açısai konumuna (θ) bağı olduğunu kabul ederek makinanın dinamik modeli benzer şekilde çıkarılmaktadır.

$$v_a = r_a.i_a + p\Psi_a \quad (2.12)$$

$$v_b = r_b.i_b + p\Psi_b \quad (2.13)$$

$$v_c = r_c.i_c + p\Psi_c \quad (2.14)$$

$$v_f = r_f.i_f + p\Psi_f \quad (2.15)$$

$$0 = v_{kd} = r_{kd}.i_{kd} + p\Psi_{kd} \quad (2.16)$$

$$0 = v_{kq1} = r_{kq1}.i_{kq1} + p\Psi_{kq1} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_f \\ \Psi_{kd} \\ \Psi_{kq} \end{bmatrix} = [L(\theta)] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

(2.12), (2.13), (2.14) stator devresi denklemleri, (2.15), (2.16), (2.17) rotor devresi denklemleri ve (2.18) halkalama akısı denklemdir. $[L(\theta)]$ 6x6'lık θ 'ya bağlı endüktans matrisidir (İnt.Kyn.1).

Öz endüktans L_{aa} diğer tüm devrelerdeki akımlar sıfır iken a fazı akısının i_a akımına oranına eşittir. Endüktans manyetik iletkenlikle doğru orantılıdır. Endüktans L_{aa} $\theta = 0^\circ$ için maksimum, $\theta = 90^\circ$ için minimum, $\theta = 180^\circ$ için tekrar maksimum olmaktadır ve böyle devam etmektedir. Harmonikler ihmal edilince a fazının MMK'sı sinüsoidal dağılıma sahiptir.

Her iki stator sarımı arasındaki ortak endüktans rotor şeklinden dolayı ikinci harmonik değişimini göstermektedir. Daima negatiftir, kuzey ve güney kutupları ilgili iki sarımın merkezlerinden eşit uzaklıkta iken en büyük mutlak değerine sahiptir. Örneğin, $\theta = -30^\circ$ ya da $\theta = 150^\circ$ iken L_{ab} maksimum mutlak değerine sahiptir. Ortak endüktans L_{ab} sadece a fazı uyarıldığında b fazını bağlayan hava boşluğu akısı hesaplanarak bulunabilmektedir.

Stator oluklarının ihmal edilmesinden dolayı hava boşluğundaki değişimlerle rotor devreleri sabit bir manyetik iletkenlik görmektedir. Bu yüzden bu durum manyetik iletkenliğin değişimi değildir yerine sarımların kendi arasındaki bağıl hareketten dolayı olan ortak endüktanstaki değişimdir.

Stator sarımı rotor sarımı ile hizalandığında, iki sarımı bağlayan akı maksimumdur ve ortak endüktans maksimumdur. İki sarım 90° yer değiştirdiğinde, iki devreyi bağlayan akı yoktur ve ortak endüktans sıfırdır (Kundur 1993).

aynı hızda dönen sanal stator sarımındaki anlık akım olarak yorumlanabilmektedir ve eksenini d eksenine ile çakışan bir konumda kalmaktadır. Bu sarımdaki akımın değeri stator sarımlarında akan gerçek faz akımları gibi d-ekseninde aynı MMK'yı meydana getirmektedir. Benzer bir yorum i_q 'ya da uygulanabilir. \dot{I}_d ve i_q 'nın oluşturduğu MMK'lar rotora göre sabittir ve sabit manyetik iletkenlik yolunda hareket etmektedirler. Dengeli kararlı çalışma için, i_d ve i_q sabittir. Başka bir ifadeyle, abc referans düzleminde değişen faz akımları dq0 referans düzleminde doğru akım olarak görünmektedir.

dq0 dönüşümü stator niceliklerini rotor tarafından elde etme anlamı olarak düşünülebilmektedir. Bu transformatörde sekonder taraf niceliklerinin dönüştürme oranı ile primer taraftan elde edilmesine benzemektedir. Benzer şekilde rotor niceliklerini için stator tarafından elde etme olarak ters dönüşümü de düşünülebilmektedir.

dq0 değişkenleri ile senkron makina denklemlerinin analizi aşağıdaki sebeplerden dolayı faz nicelikleri ile yapılandan çok daha basittir:

- Dinamik performans denklemleri sabit endüktanslara sahiptir.
- Dengeli koşullar için sıfır sıra nicelikleri ortadan kalkmaktadır.
- Dengeli kararlı hal çalışma için stator nicelikleri sabit değerlere sahiptir. Diğer çalışma modları için zamanla değişmektedirler. Kararlılık çalışmaları 2-3Hz.den düşük frekanslara sahip olan yavaş değişimleri kapsamaktadır.
- d ve q eksenleri ile ilgili parametreler terminal deneylerinden doğrudan ölçülebilmektedir.

dq0 dönüşümü değişen stator faz niceliklerini göstermek için fazörlerin kullanımına eşdeğerdır. d,q değişkenlerini kullanmanın avantajları AC devrelerin kararlı hal analizi için fazörlerin kullanımınıkiyle (doğrudan zamanla değişen sinüsoidal nicelikleri kullanımı yerine) benzerdir (Kundur 1993).

Bu koordinat dönüşümünden sonra makina denklemleri ve dinamik elektriksel denklemler (2.19)-(2.23) ve (2.24)-(2.28)'deki gibidir.

$$v_d = R_a \cdot i_d + p\psi_d + w \cdot \psi_q \quad (2.19)$$

$$v_q = R_a \cdot i_q + p\psi_q - w \cdot \psi_d \quad (2.20)$$

$$v_{fd} = R_{fd} \cdot i_{fd} + p\psi_{fd} \quad (2.21)$$

$$v_{kd} = R_{kd} \cdot i_{kd} + p\psi_{kd} \quad (2.22)$$

$$v_{kq1} = R_{kq1} \cdot i_{kq1} + p\psi_{kq1} \quad (2.23)$$

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + L_{md} \cdot i_{fd} + L_{md} \cdot i_{kd} \quad (2.24)$$

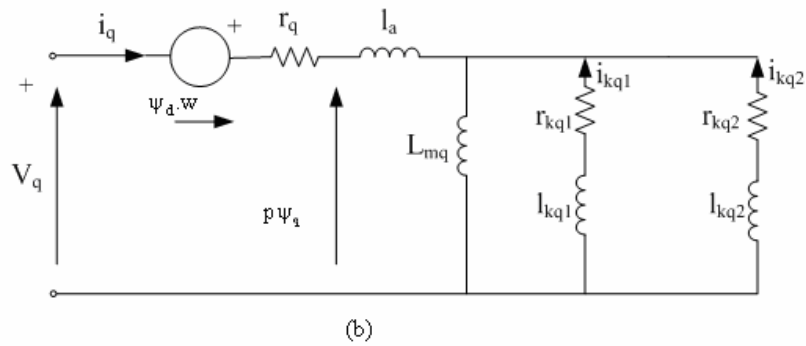
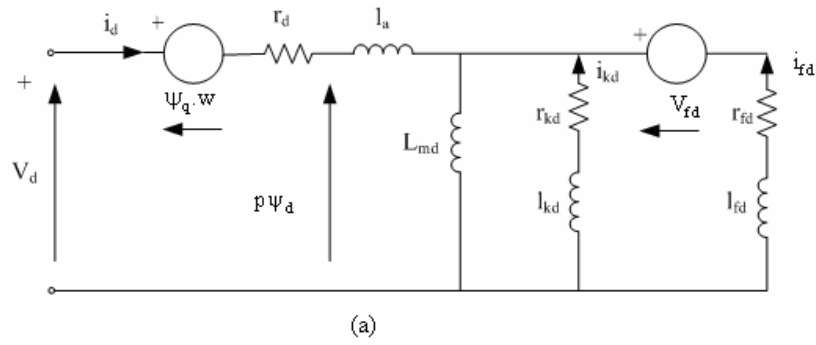
$$\psi_q = L_q \cdot i_q + L_{mq} \cdot i_{kq1} \quad (2.25)$$

$$\psi_{fd} = L_{ffd} \cdot i_{fd} + L_{md} \cdot i_d + L_{md} \cdot i_{kd} \quad (2.26)$$

$$\psi_{kd} = L_{kkd} \cdot i_{kd} + L_{md} \cdot i_d + L_{md} \cdot i_{fd} \quad (2.27)$$

$$\psi_{kq1} = L_{kkq1} \cdot i_{kq1} + L_{mq} \cdot i_q \quad (2.28)$$

(2.19)-(2.23) denklemleri dq koordinatlarındaki gerilim denklemleri, (2.24)-(2.28) denklemleri dq koordinatlarındaki halkalama akısı denklemleridir (İnt.Kyn.1). İki eksenli modelin eşdeğer devre şekli Şekil 2.25'te gösterilmektedir.



Şekil 2.25 d ekseni (a) ve q ekseni (b) eşdeğer devreleri (İnt.Kyn.1).

d- ekseni 1.göz için elde edilen denklem (2.29)'daki gibidir.

$$-v_d + \Psi_q \cdot w + r_d \cdot i_d + l_a \cdot p i_d + L_{md} \cdot p(i_d + i_{kd} + i_{fd}) = 0 \quad (2.29)$$

$$\Rightarrow v_d = r_d \cdot i_d + p\Psi_d + w \cdot \Psi_q$$

$$\Psi_d = L_d \cdot i_d + L_{md} \cdot (i_{kd} + i_{fd}) \quad (2.30)$$

$$L_d = l_a + L_{md} \quad (2.31)$$

d- ekseni 2.göz için elde edilen denklem (2.32)'deki gibidir.

$$r_{kd} \cdot i_{kd} + l_{kd} \cdot p i_{kd} + L_{md} \cdot p(i_{kd} + i_d) = 0 \quad (2.32)$$

$$\Rightarrow 0 = r_{kd} \cdot i_{kd} + p\Psi_{kd}$$

$$\Psi_{kd} = L_{kkd} \cdot i_{kd} + L_{md} \cdot i_d \quad (2.33)$$

$$L_{kkd} = l_{kd} + L_{md} \quad (2.34)$$

d- ekseni 3.göz için elde edilen denklem (2.35)'teki gibidir.

$$-v_{fd} + r_{fd} \cdot i_{fd} + l_{fd} \cdot p i_{fd} + L_{md} \cdot p(i_{fd} + i_d) = 0 \quad (2.35)$$

$$\Rightarrow v_{fd} = r_{fd} \cdot i_{fd} + p\Psi_{fd}$$

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} \cdot i_{fd} + L_{md} \cdot i_d \quad (2.36)$$

$$L_{ffd} = l_{fd} + L_{md} \quad (2.37)$$

q- ekseni 4.göz için elde edilen denklem (2.38)'deki gibidir.

$$-v_q - \Psi_d \cdot w + r_q \cdot i_q + l_a \cdot p i_q + L_{mq} \cdot p(i_q + i_{kq1}) = 0 \quad (2.38)$$

$$\Rightarrow v_q = r_q \cdot i_q + p\Psi_q - w \cdot \Psi_d$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_q + L_{mq} \cdot i_{kq1} \quad (2.39)$$

$$L_q = l_a + L_{mq} \quad (2.40)$$

q- ekseni 5.göz için elde edilen denklem (2.41)'deki gibidir.

$$r_{kq1} \cdot \dot{i}_{kq1} + l_{kq1} \cdot p \dot{i}_{kq1} + L_{mq} \cdot p(\dot{i}_{kq1} + \dot{i}_q) = 0 \quad (2.41)$$

$$\Rightarrow 0 = r_{kq1} \cdot \dot{i}_{kq1} + p \Psi_{kq1}$$

$$\Psi_{kq1} = L_{kkq1} \cdot \dot{i}_{kq1} + L_{mq} \cdot \dot{i}_q \quad (2.42)$$

$$L_{kkq1} = l_{kq1} + L_{mq} \quad (2.43)$$

Makinanın iki eksen modeli ile ilgili zaman sabitleri (2.44)-(2.51) ile tanımlanmaktadır.

$$T_{d0}' \approx \frac{L_{md} + l_{fd}}{r_{fd}} = \frac{L_{ffd}}{r_{fd}} \quad (2.44)$$

$$T_{d0}'' \approx (l_{kd} + \frac{L_{md} \cdot l_{fd}}{L_{md} + l_{fd}}) / r_{kd} \quad (2.45)$$

$$T_d' \approx (l_{fd} + \frac{L_{md} \cdot l_a}{L_{md} + l_a}) / r_{fd} \quad (2.46)$$

$$T_d'' \approx (l_{kd} + \frac{L_{md} \cdot l_{fd} \cdot l_a}{L_{md} \cdot l_a + L_{md} \cdot l_{fd} + l_a \cdot l_{fd}}) / r_{kd} \quad (2.47)$$

$$T_{q0}' \approx \frac{L_{mq} + l_{kq1}}{r_{kq1}} = \frac{L_{kkq1}}{r_{kq1}} \quad (2.48)$$

$$T_{q0}'' \approx (l_{kq2} + \frac{L_{mq} \cdot l_{kq1}}{L_{mq} + l_{kq1}}) / r_{kq2} \quad (2.49)$$

$$T_q' \approx (l_{kq1} + \frac{L_{mq} \cdot l_a}{L_{mq} + l_a}) / r_{kq1} \quad (2.50)$$

$$T_q'' \approx (l_{kq2} + \frac{L_{mq} \cdot l_a \cdot l_{kq1}}{L_{mq} \cdot l_a + L_{mq} \cdot l_{kq1} + l_a \cdot l_{kq1}}) / r_{kq2} \quad (2.51)$$

T_{d0}' : d ekseni geçici hal açık devre zaman sabiti.

T_{d0}'' : d ekseni geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti.

T_d' : d ekseni geçici hal kısa devre zaman sabiti.

T_d'' : d eksenini geçici hal öncesi kısa devre zaman sabiti.

T_{q0}' : q eksenini geçici hal açık devre zaman sabiti.

T_{q0}'' : q eksenini geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti.

T_q' : q eksenini geçici hal kısa devre zaman sabiti.

T_q'' : q eksenini geçici hal öncesi kısa devre zaman sabiti.

Dinamik modelin standart endüktans parametreleri (2.52)- (2.57) ile tanımlanmaktadır.

$$L_d = \Psi_d / i_d \text{ (Kararlı halde)} \quad (2.52)$$

$$L_d'' = l_a + \frac{L_{md} \cdot l_{fd} \cdot l_{kd}}{L_{md} \cdot l_{fd} + L_{md} \cdot l_{kd} + l_{fd} \cdot l_{kd}} \quad (2.53)$$

$$L_d' = l_a + \frac{L_{md} \cdot l_{fd}}{L_{md} + l_{fd}} \Delta \Psi_{fd} / \Delta i_d \quad (2.54)$$

$$L_q = \Psi_q / i_q \text{ (Kararlı halde)} \quad (2.55)$$

$$L_q'' = l_a + \frac{L_{mq} \cdot l_{kq1} \cdot l_{kq2}}{L_{mq} \cdot l_{kq1} + L_{mq} \cdot l_{kq2} + l_{kq1} \cdot l_{kq2}} \quad (2.56)$$

$$L_q' = l_a + \frac{L_{mq} \cdot l_{kq1}}{L_{mq} + l_{kq1}} \quad (2.57)$$

L_d : d eksenini senkron endüktansı

L_d'' : d eksenini geçici hal öncesi endüktansı (çok hızlı değişimler için $\Delta \Psi_d / \Delta i_d$).

L_d' : d eksenini geçici hal endüktansı (hızlı (geçici hal öncesi) dinamikler üzerinde dinamik değişimler için $\Delta \Psi_d / \Delta i_d$).

L_q : q eksenini senkron endüktansı (kararlı halde Ψ_q / i_q).

L_q'' : q eksenini geçici hal öncesi endüktansı (çok hızlı değişimler için $\Delta \Psi_q / \Delta i_q$).

L_q' : q ekseni geçici hal endüktansı (hızlı (geçici hal öncesi) dinamikler üzerinde dinamik değişimler için $\Delta\psi_q / \Delta i_q$).

Reaktanslar (ya da endüktanslar) arasındaki ilişki $X_d \geq X_q > X_q' \geq X_d' > X_q'' \geq X_d''$ şeklindedir.

Kabuller 7. dereceden modelden türetilerek yapılmıştır; her ekseninde rotor devrelerinin sayısı artırılarak daha fazla ayrıntı dahil edilebilmektedir (İnt.Kyn.1).

Stator geçici hallerinin ihmal edilmesi; denklemler açısından stator gerilim denklemlerindeki (2.19 ve 2.20) $p\psi$ terimlerinin ihmal edilmesi demektir. Fiziksel olarak ise statorun elektriksel dinamikleri olmadığını kabul etmektir, yani makinanın stator devreleri (ve böylece iletim şebekesi) 50 Hz.'de reaktansları ile gösterilmektedir. Başka bir ifadeyle, stator ve iletim sistemi devreleri rms eşdeğer devreleri olarak gösterilmektedir ve değişkenleri (akımlar ve gerilimler) anlık sinüzoidler yerine rms fazör genlikleri olarak gösterilmektedir. Bu stator değişkenlerindeki değişimlerin gösterilmediği değil, sadece bu değişimlerle ilgili dinamiklerin gösterilmediği anlamına gelmektedir. Matematiksel olarak sistem modelindeki her makinanın iki diferansiyel denklemden kurtarmaktadır, şebekenin ayrıca diferansiyel denklemleri olması gerektiğinden bu büyük bir kazançtır. Büyük karmaşık bir iletim sisteminde bu model boyutunda ve şebekedeki hızlı (50Hz.-20ms.) (model hızlı değişimi artık tahmin edildiğinden dolayı integrasyon derecesi daha büyük olabilmektedir) sinüzoidlerinin çözümünde büyük bir kolaylık meydana gelmektedir. Doğruluk kaybı olarak bu modelle şebekenin dinamik etkileri (senkronaltı rezonans ve bazı denetleyici etkileşimleri) açıkça tahmin edilememektedir. DC frenleme ve stator geçici hallerinden dolayı momentin salınımlı bileşenleri ihmal edilmektedir; bu momentler geçici bozulmaları izleyen generatörün rotor salınımlarının genliğini sınırlamaya yardımcı olmaktadır. Bu yüzden ihmal edilmeleri önemli bir hata meydana getirmektedir. Generatöre yakın simetrik arızalar durumunda oluşabilen açısız geri salınım tahmin edilememektedir.

Ayrıca, düşük frekanslı rotor salınımları için $p\psi$ terimlerinin ihmal edilmesinde maruz kalınan hatanın dengelenmesi için, stator gerilimlerinde hız değişimleri de bu modelde ihmal edilmektedir. Başka bir ifadeyle, statordaki gerilim denklemlerinde $w = w_0 + \Delta w \approx w_0$ olduğunu kabul edilmektedir. Bu makinanın sabit hızda çalıştığını kabul etmekle aynı anlama gelmemektedir.

Bu kabullerle stator gerilim denklemleri (2.58) ve (2.59)'daki gibi yazılabilmektedir.

$$v_d = R_a \cdot i_d + w_0 \cdot \Psi_q \quad (2.58)$$

$$v_q = R_a \cdot i_q - w_0 \cdot \Psi_d \quad (2.59)$$

Sönüm sarımlarını ihmal etmek fiziksel olarak, bozulma sonrası rotor salınımlarından enerjiyi yok etmek için sönüm çubuklarının var olmadığını ve böylece rotorda ve oluklarında (ya da sönüm çubuklarında) akım endüklenmediğini kabul etmektir. Matematiksel olarak ise stator gerilim denklemleri değişmez fakat endüklenen sönüm çubuğu akımlarının dinamiklerini anlatmak için gereken diferansiyel denklemler olmadığından modelin derecesi azalmaktadır; böylece daha hızlı çözüm sağlanmaktadır. Ayrıca, bu dinamiklerin bazen hızlı olmasından dolayı, bu kabul daha büyük integrasyon derecelerine izin verebilmektedir.

Alan denklemi (2.21) değişmez ve (2.60)'daki gibi de yazılabilmektedir.

$$p\Psi_{fd} = v_{fd} - R_{fd} \cdot i_{fd} \quad (2.60)$$

Fakat (2.22) ve (2.23) gerilim denklemleri ihmal edilmektedir. Halkalama akıları sönüm bobinleri ve sönüm akımları olmadığından dolayı, bu akımlar hiçbir akıya sebep olmamaktadır, böylece halkalama akısı denklemleri azalmaktadır. Ayrıca (2.24)-(2.26)'da $i_{kd}=0$ ve $i_{kq}=0$ yerine konarak (2.61)-(2.63) elde edilmektedir.

$$\Psi_d = L_d \cdot i_d + L_{md} \cdot i_{fd} \quad (2.61)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_q \quad (2.62)$$

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} \cdot i_{fd} + L_{md} \cdot i_d \quad (2.63)$$

Artık stator için iki cebirsel denklem [(2.58) ve(2.59)], rotor akısındaki dinamik değişimleri gösteren bir diferansiyel denklem [(2.60)] ve ilgili halkalama akısı denklemleri [(2.61), (2.62) ve (2.63)] vardır; bu denklemler hareketin mekanik denklemi ile birlikte 3. dereceden modeli oluşturmaktadır (İnt.Kyn.1).

Bu model OGR ve GSKK döngüleri çalışıldığında senkron generatör dinamiklerini çalışmak için gereken minimum modeldir. Ayrıca arıza analizi çalışmalarında ve büyük sistem kararlılık çalışmalarında çok sık kullanılan generatör modelidir.

3. dereceden model “Geçici Hal Reaktansı Arkasındaki Gerilim Modeli” olarakta bilinmektedir. Bu modelde gösterilen elektriksel dinamikler sadece alan devresindeki (ve böylece alan halkalama akılarında) dinamiklerdir.

Senkronizma açısından senkronlama gücündeki/momentindeki alan halkalama akılarının genliğindeki değişimlerin etkisi; uyarım kontrolü tarafından etkilendiğinden geçici hal kararlılığı için çok önemlidir. Sönüm açısından amortisör etkileri ihmal edilmiştir fakat alan sarımında endüklenen akımlar tarafından alan devresindeki enerjinin harcanımı gösterilmektedir (İnt.Kyn.1).

Senkron makina literatüründe (2.61), (2.62), (2.63), (2.60) genellikle (2.64), (2.65), (2.66) terimleriyle ifade edilmektedir.

$$E_I = L_{md} \cdot i_{fd} \quad (2.64)$$

$$E_q' = \frac{L_{md}}{L_{ffd}} \cdot \Psi_{fd} \quad (2.65)$$

$$E_0 = \frac{L_{md}}{R_{fd}} \cdot V_{fd} \quad (2.66)$$

E_q' : Alan halkalama akılarına (Ψ_{fd}) orantılı gerilim.

E_0 : Uygulanan alan gerilimine orantılı gerilim.

E_1 : Alan akımına (i_{fd}) orantılı gerilim.

Yeni terimlerle (2.61), (2.67)'deki gibi olur.

$$\Psi_{fd} = L_d \cdot i_d + E_1 \quad (2.67)$$

(2.63) L_{md}/L_{ffd} ile çarpılarak yeni değişkenlerle (2.68)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$E'_q = \frac{L_{md}^2}{L_{ffd}} \cdot i_d + E_1 \quad (2.68)$$

(2.54) düzenlenip (2.68)'de yerine yazılırsa (2.69) elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} L'_d &= L_a + \frac{L_{md} \cdot I_{fd}}{L_{md} + I_{fd}} \\ &= (L_d - L_{md}) + \frac{L_{md} \cdot I_{fd}}{L_{md} + I_{fd}} = L_d - \frac{L_{md}^2}{L_{ffd}} \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$L_d - L'_d = \frac{L_{md}^2}{L_{ffd}}$$

$$E'_q = E_1 - (L_d - L'_d) \cdot i_d \quad (2.69)$$

(2.60)'ı L_{md}/L_{ffd} ile çarpılarak (2.70) elde edilmektedir.

$$p\left(\frac{L_{md}}{L_{ffd}} \cdot \Psi_{fd}\right) = \frac{L_{md}}{R_{fd}} \cdot \frac{R_{fd}}{L_{ffd}} \cdot V_{fd} - \frac{R_{fd}}{L_{ffd}} \cdot L_{md} \cdot i_{fd} \quad (2.70)$$

(2.70)'in yeni değişkenlerle ifade edilmesi (2.71)'deki gibi olmaktadır.

$$pE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} \cdot (E_0 - E_1) \quad (2.71)$$

Makina denklemlerinin bu alternatif şekli (2.67), (2.72), (2.69) ve (2.71) ifadeleri ile özetlenebilmektedir.

$$\Psi_{fd} = L_d \cdot i_d + E_1 \quad (2.67)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot i_q \quad (2.72)$$

$$E'_q = E_1 - (L_d - L'_d) \cdot i_d \quad (2.69)$$

$$pE'_q = \frac{1}{T'_{d0}} \cdot (E_0 - E_1) \quad (2.71)$$

Makina denklemlerinin bu alternatif şekli birçok kararlılık probleminde senkron makinaları göstermek için kullanılmaktadır. Bu formülasyonda E'_q , Ψ_{fd} yerine durum değişkenidir. E'_q , X'_d geçici hal reaktansı arkasındaki gerilimin q-ekseni bileşenidir. E'_q 'nin durum değişkeni olarak kullanımı alan devresi dinamiklerini hesaplamak için kullanılan klasik modelin kolayca elde edilmesini sağlamaktadır (Kundur 1993).

Alan devresi dinamikleri ihmal edildiğinde denklem terimlerinde, $p\Psi_{fd} = 0$ kabul edilmektedir; (2.21) (2.73)'teki gibi olmaktadır.

$$v_{fd} = r_{fd} \cdot i_{fd} \quad (2.73)$$

Yani analize başlandığında alan akımının (ve böylece alan akısının) herhangi bir bozulma öncesi sahip olduğu kararlı hal değerinde sabit olduğu kabul edilmektedir. Böylece alan akımı, halkalama akıları ve gerilim sabit olmaktadır.

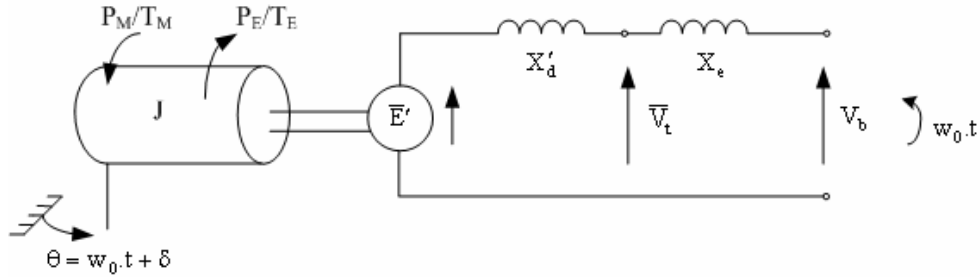
Alan devresi dinamiklerinin ihmal edilmesi fiziksel olarak, bozulma sonrası rotor salınımları süresince endüklenen alan akımlarından dolayı enerjinin harcanımı artık gösterilmektedir; OGR'lerin, GSKK'ların, vb.lerin sönümünün bu şeklindeki etkisi bu modelde tahmin edilememektedir.

Alan akısının genliğinde değişim olmadığı (ya uyarım kontrolünden dolayı ya da endüklenen akımlardan dolayı) gösterilmektedir; bu değişimin senkronizmadaki etkisi bu modelle tahmin edilebilmektedir.

Alan devresi dinamiklerinin ihmal edilmesi ile matematiksel olarak, son elektriksel dinamik denklem $[pE_q'/p\psi_{fd}]$ çıkarılmıştır, modelde kalan dinamikler sadece rotor hareketinin mekanik denklemleridir.

Bu modelde sönümün gösterilebildiği tek yol mekanik şaft sisteminin sönümü D ve stator direnci r_a 'dır. Bunlar sıfırsa sönüm yoktur ve eşit alan kriteri çerçevesinin klasik salınım denklemi modeli elde edilmektedir. Bu modelin bütün için hatası çoktur; fakat en basit hesaplamalar ve kavramsal anlayış için kullanılmaktadır (İnt.Kyn.1).

2.7.2 Salınım denklemi



Şekil 2.26 Hareket denklemi modeli (İnt.Kyn.1).

Şekil 2.26 hareket denklemi modelini göstermektedir. Dönen kütlede depolanan kinetik enerji (2.74) ve açısal momentum (2.75) ile ifade edilmektedir.

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot w_0^2 \quad (\text{Joule}) \quad (2.74)$$

$$M = J \cdot w_0 \quad (\text{Joule-saniye/radyan}) \quad (2.75)$$

Dönen kısımda depolanan enerji aynı zamanda makina gücü ile atalet sabitinin çarpımına eşittir ve (2.76) ile ifade edilmektedir.

$$E = G.H = \frac{1}{2}.M.w_0 \quad (2.76)$$

$$H = \frac{\frac{1}{2}.M.w_0}{G} \quad \left(\frac{MW.s}{MVA} \right) \quad (2.77)$$

w_0 : senkron hız (rad/s)

J: atalet momenti (kg.m²)

H: atalet sabiti (MW.s/MVA)

G: Makina gücü (MVA)

Gerçek rotor hızı (2.78)'deki ve rotor ivmesi (2.79)'daki gibidir.

$$p\theta = w_0 + p\delta = w \quad (2.78)$$

$$p^2\theta = p^2\delta \quad (2.79)$$

Makina generatör olarak çalıştığı için δ pozitif olacak ve girişe uygulanan momente ters bir elektriksel çıkış momenti üretilecektir. Bu durumda hareket denklemleri (2.80)'deki gibi ifade edilmektedir (Caner 2006).

$$J.(p^2\delta) = T_M - T_e = \Delta T = T_a \quad (2.80)$$

(2.80) tekrar düzenlenerek (2.81)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$p^2\delta = \frac{\Delta T}{J} = \frac{(\Delta T.w_0)w_0}{\frac{J.w_0^2}{2}} = \frac{\Delta P.w_0}{2.E} \quad (2.81)$$

(2.76) (2.81)'de yerine yazılırsa (2.82) elde edilmektedir.

$$p^2 \delta = \frac{\Delta P}{M} \quad (2.82)$$

$$P_e = \frac{E \cdot V}{X_T} \cdot \sin \delta = P_{\max} \cdot \sin \delta \quad (2.83)$$

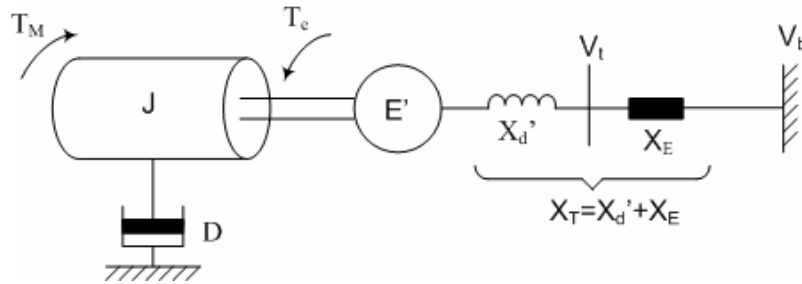
$$M \cdot p^2 \delta = \Delta P = P_m - P_{\max} \cdot \sin \delta \quad (2.84)$$

$$J \cdot p^2 \delta = \Delta T = T_m - T_{\max} \cdot \sin \delta$$

(2.84) ile ifade edilen hareket denklemi genellikle salınım denklemi olarak adlandırılmaktadır. Çünkü bozulmalar süresince δ rotor açısındaki salınımları göstermektedir (Kundur 1993). Mekanik giriş gücü ile elektriksel çıkış gücü arasındaki bağıntıyı tanımlamaktadır. Buna göre sistemde oluşabilecek herhangi bir dengesizlik sonucunda bir çıkış ve yükselme ardından da bir düşüş ve alçalma görülecektir. Yani sistem bir mekanik osilatördür (Caner 2006).

2.7.3 Klasik model (salınım denklemi modeli)

Anahtar kavramları kurmak, analiz ve lineerleştirme işlemini göstermek için geçici hal kararlılığı durumunda sadece basitliğinden dolayı bu model kullanılmaktadır. Burada makina sabit bir gerilim (E') ve sabit bir reaktans (X_d') ile gösterilmektedir. Şekil 2.27'de sonsuz baraya X_E reaktansı üzerinden bağlı senkron generatör gösterilmektedir.



Şekil 2.27 Sonsuz baraya X_E reaktansı üzerinden bağlı senkron generatör (İnt.Kyn.1).

Bu sistem için denklemler (2.85) ve (2.86)'dır.

$$T_e = \frac{E'V_b}{X_T} \cdot \sin \delta \quad (2.85)$$

$$J.p^2 \delta + D.p\delta + T_e = T_m \quad (2.86)$$

Sonra $p\delta = \Delta w$ ifadesi (2.86)'da yerine yazılarak (2.87) elde edilmektedir.

$$J.p\Delta w + D.\Delta w + T_e - T_m = 0 \quad (2.87)$$

$$p\Delta w = \frac{1}{J}(T_m - T_e - D.\Delta w) \quad (2.88)$$

$$p\delta = \Delta w \quad (2.89)$$

Dinamik model (2.85), (2.88) ve (2.89) denklemleridir. Bu modelde nonlineer ifade sadece (2.90)'daki gibi lineerleştirilmesi gereken denklem (2.85)'dir.

$$\Delta T_e \approx \left. \frac{dT_e}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} \Delta \delta \quad (2.90)$$

$$\frac{dT_e}{d\delta} = \frac{dT_e}{d\delta} = \frac{E'V_b}{X_T} \cdot \cos \delta \quad (2.91)$$

$\delta = \delta_0$ belli bir yük açısında, (2.85) için bu lineerleştirilmiş yaklaşım ifadesi (2.92)'deki gibi olmaktadır.

$$\Delta T_e = \left[\frac{E'V_b}{X_T} \cdot \cos \delta_0 \right] \cdot \Delta \delta \quad (2.92)$$

$$K_S = \frac{E'V_b}{X_T} \cdot \cos \delta_0 \quad (2.93)$$

K_S : Senkronlama moment katsayısıdır.

(2.92), (2.88)'de yerine yazılarak ve $p\delta$ $p\Delta\delta$ 'ye ve T_m ΔT_m 'ye değişken değişimi ile verilen bir çalışma noktası civarında küçük değişmeler için sistem dinamiklerinin lineer modeli elde edilmektedir.

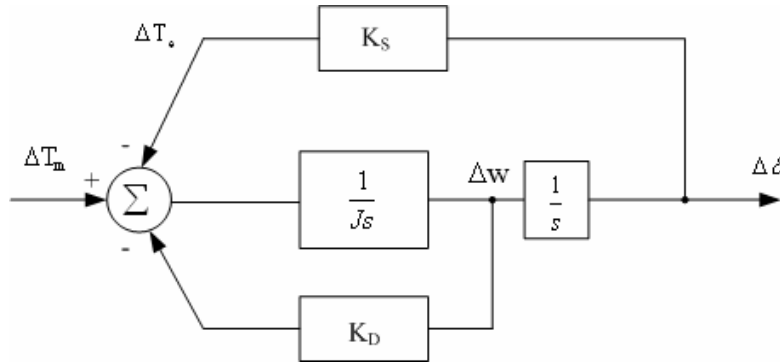
$$p\Delta w = \frac{1}{J}(\Delta T_m - K_S \cdot \Delta\delta - K_D \cdot \Delta w) \quad (2.94)$$

$$p\Delta\delta = \Delta w \quad (2.95)$$

$K_D=D$ sönüm momenti katsayısıdır.

(2.94) ve (2.95) ifadelerinin matris şekli (2.96)'daki gibidir. Blok diyagram modeli ise şekil 2.28'de gösterilmektedir.

$$p \begin{bmatrix} \Delta w \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_D & -K_S \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (2.96)$$



şekil 2.28 Klasik generatör modeli ile SMIB sistemin blok diyagram modeli
(İnt.Kyn.1).

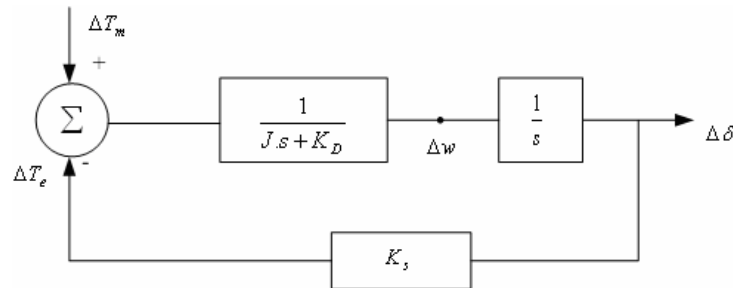
Bu diyagram küçük sinyal kararlılık merkezinde senkronlama ve sönüm momentleri kavramını grafiksel olarak göstermektedir. Sistem, giriş mekanik momentinin değişimi (yani ΔT_m sıfır olmayan) ile bozulursa ters momentlerin iki çeşidi vardır:

- $\Delta\delta$ yük açısı değişimi ile aynı fazda ters moment (K_S bloğunun çıkışında);
- Δw hız sapması ile aynı fazda ters moment (K_D bloğunun çıkışında).

Bu ters momentlerin ilk çeşidi senkronlama momenti olarak gösterilmektedir; enerji dönüşümü (mekanikten elektriksele) ile ilgili ters bir momenttir ve bu yüzden kayıpsızdır. Başka bir ifadeyle girişte ΔT_m 'de bir değişim için cevapta ters momentin senkronlama bileşeninin gelişimi, generatörün bu ekstra mekanik girişini elektrik enerjisine dönüştürebilir ve böylece senkronizmada kalabilir anlamındadır. Makina yeterli senkronlama momenti ile ΔT_m 'deki bir artışı tersleyici yeteneğini kaybettiği gibi, aşırı mekanik giriş şaftı hızlandırmaya devam edeceğinden makina senkronizmayı kaybetmektedir. Bu yüzden, senkronlama momenti geliştirme yeteneği kararlılık için çok önemlidir.

Bu ters momentlerin ikinci çeşidi sönüm momenti olarak gösterilmektedir; enerji harcanımı (moment kaybı) ile ilgili ters momenttir ve rotor salınımlarının (yani $\Delta\delta$ ve $\Delta\omega$ 'deki salınımları) enerji harcadığına ve bu yüzden zamanla bozulduğuna emin olmak için önemlidir.

Bu basit salınım denklemi modelinde elektriksel moment saf olarak senkronlamadır ve mekanik şaft sisteminde sönüm momentinin kaynağı sadece $\Delta T_L = K_D \cdot \Delta\omega$ moment kaybıdır. Dinamik koşullarda elektriksel enerji kaynaklarının gösterildiği (örneğin alan devresi sönüm sınırlarında endüklenen geçici hal akımları) makinanın daha ayrıntılı elektriksel gösteriminde $\Delta\omega$ ile aynı fazda ters momentin ek elektriksel bileşenleri olmaktadır, yani sönüm momentinin elektriksel bileşenleri vardır (İnt.Kyn.1). Şekil 2.28'deki blok diyagram modeli Şekil 2.29'daki gibi sadeleştirilebilmektedir.



Şekil 2.29 Klasik generatör modeli ile SMIB sistemin sadeleştirilmiş blok diyagram modeli (İnt.Kyn.1).

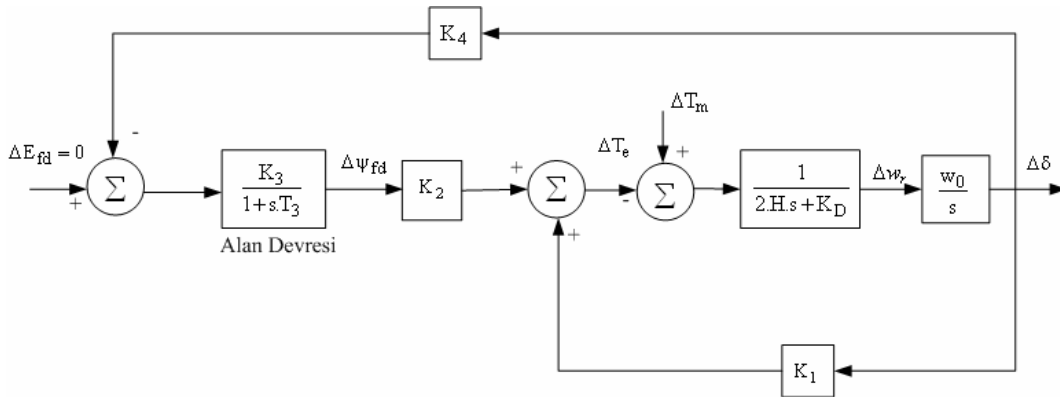
$$\frac{\Delta\delta}{\Delta T_m} = \frac{\frac{1}{s} \cdot (J \cdot s + K_D)}{1 + \frac{1}{s} \cdot (J \cdot s + K_D)} = \frac{1}{J \cdot s^2 + K_D \cdot s + K_s} = \frac{\frac{1}{J}}{s^2 + \frac{K_D}{J} \cdot s + \frac{K_s}{J}} \quad (2.97)$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_s}{J}} \quad (2.98)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_D}{\sqrt{J \cdot K_s}} \quad (2.99)$$

(2.98) ve (2.99) belli bir çalışma noktasında sistem için küçük bir bozulmadan kaynaklanan salınımların doğal frekansını ve sönüm oranını ifade etmektedir. (İnt.Kyn.1). K_s senkronlama momenti katsayısı artarsa, doğal frekans artar ve sönüm oranı azalmaktadır. K_D sönüm momenti katsayısındaki bir artışla sönüm oranı artmaktadır, oysa atalet sabitindeki bir artışla hem w_n hem de ζ azalmaktadır (Kundur 1993).

2.7.4 Geçici hal reaktansı (X'_d) arkasındaki değişken gerilim (E'_q) modeli- OGR'siz



Şekil 2.30 E_{fd} sabiti ile SMIB sistemin blok diyagram modeli (Kundur 1993).

Şekil 2.30'da gösterilen blok diyagram, SMIB sistemin küçük sinyal performansının blok diyagram modelidir. Bu modelde sistemin dinamik karakteristikleri K sabitleri ile ifade edilmektedir ve (2.100)-(2.103) denklemleri ile gösterilmektedir (Kundur 1993).

$$K_1 = \frac{E_{q0}.V_b}{X_{qT}}.\cos \delta_0 + \frac{X_q - X_d'}{X_{dT'}}.i_{q0}.V_b.\sin \delta_0 \quad (2.100)$$

$$K_2 = \frac{V_b.\sin \delta_0}{X_{dT'}} \quad (2.101)$$

$$K_3 = \frac{X_{dT}'}{X_d T} \quad (2.102)$$

$$K_4 = \frac{X_d - X_d'}{X_{dT'}}.V_b.\sin \delta_0 \quad (2.103)$$

$$T_3 = K_3.T_{d0}' \quad (2.104)$$

$$X_{dT}' = X_d' + X_E \quad (2.105)$$

$$X_{dT} = X_d + X_E \quad (2.106)$$

$$X_{qT} = X_q + X_E \quad (2.107)$$

Bu model senkron makinanın Phillips-Heffron lineer modelinin temelini oluşturmaktadır ve sistem kararlılığında uyartım kontrolünün etkisinin analizi için geniş ölçüde kullanılmaktadır.

K_1 : Senkronlama momenti katsayısıdır. Önceki gibi, çalışma noktasına bağımlıdır fakat şimdi çıkıntılılıktan dolayı relüktans moment bileşenine sahiptir.

K_2 : Sonuç elektrik momentindeki değişiklikler için alan halkalama akılarında ilgili değişikliklerin katsayısıdır. Bu terim çalışma noktasına bağlıdır.

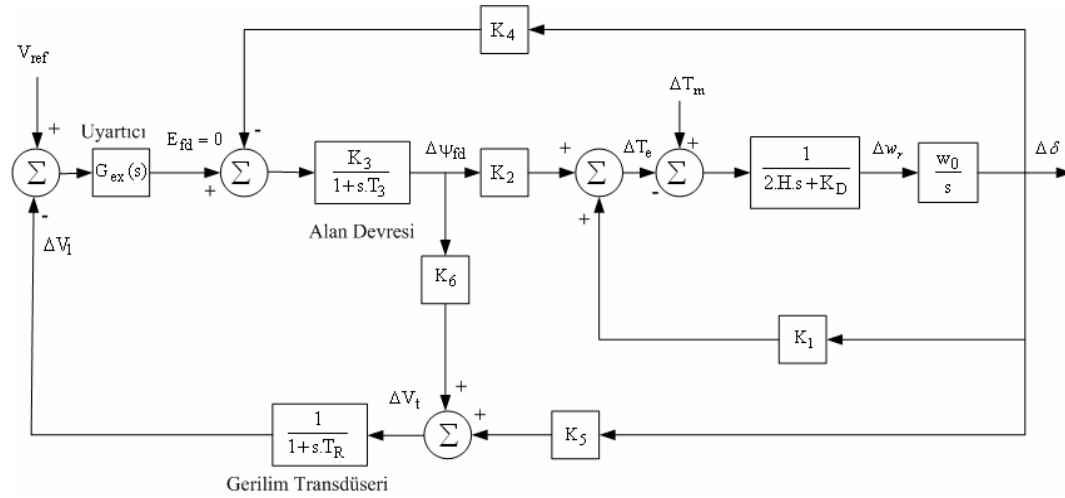
K_3 : Empedans katsayısıdır. T_3 (yükte alan zaman sabiti) ile birlikte bozulmalar için alan halkalama akılarının dinamik cevabını etkilemektedir. Çalışma noktasına bağlı olmamasına rağmen, yine de alan akısının ne kadar hızlı değişebileceğini belirleyen makinanın önemli parametrelerindendir.

K_4 : Alan halkalama akıları değişiklikleri için yük açısındaki değişmelerle ilgili katsayıdır (K_3 yoluyla). Makinadaki çok önemli etki olan armatür reaksiyonu etkisinin mıknatıslılığını gidermektedir.

Sabit alan gerilimi ile sönümün yokluğundan dolayı kararsız olması sistem için mümkün değildir. Yük açısı arttığında ve net senkronlama momenti katsayısı azaldığından sistem kararlı hal çalışma noktasından sürüklendiği için dayanıksızlaşmaktadır. Bu sürüklenme kararsızlığı uyarım kontrolünün (OGR'ler) girişi ile modern güç sistemlerinde neredeyse ortadan kaldırılmaktadır.

Yük açısı arttığında, $\Delta\psi_{fd}$ 'den dolayı sönüm katkısı artmaktadır. Bu yüzden sistem geçici hal kararlılığı sınırına yakın olduğundan sönüme göre daha kararlı olabilmektedir (İnt.Kyn.1).

2.7.5 Geçici hal reaktansı (X'_d) arkasındaki değişken gerilim (E'_q) modeli- OGR'li



Şekil 2.31 OGR'li ve uyarıcı SMIB sistem blok diyagram modeli (Kundur 1993).

Sisteme gerilim regülatörü kontrolü ve uyarıcı modeli eklenir ve tekrar lineerize edilirse alan akısı değişimlerinde ve böylece kararlılıkta hem dış uyarım kontrollerinin hem de makina rotor salınımlarının etkisini gösteren yeni bir lineer model elde edilmektedir. Şekil 2.30'daki sisteme bir OGR ve uyarıcı eklenirse Şekil 2.31'deki OGR'li ve uyarıcı blok diyagram modeli elde edilmektedir (İnt.Kyn.1).

Burada makina modeli değişmez sadece çevresine dış denetleyiciler eklenmektedir. Uyarıcı birçok çeşitten herhangi biri olabilmektedir. Bu yeni blok diyagram modelindeki K_5 ve K_6 ifadeleri (2.108) ve (2.109) ile ifade edilmektedir.

$$K_5 = \frac{X_q}{X_{qT}} \cdot \frac{V_{d0}}{V_{t0}} \cdot V_b \cdot \cos \delta_0 - \frac{X_d'}{X_{dT}'} \cdot \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \cdot V_b \cdot \sin \delta_0 \quad (2.108)$$

$$K_6 = \frac{X_E}{X_{dT}'} \cdot \frac{V_{q0}}{V_{t0}} \quad (2.109)$$

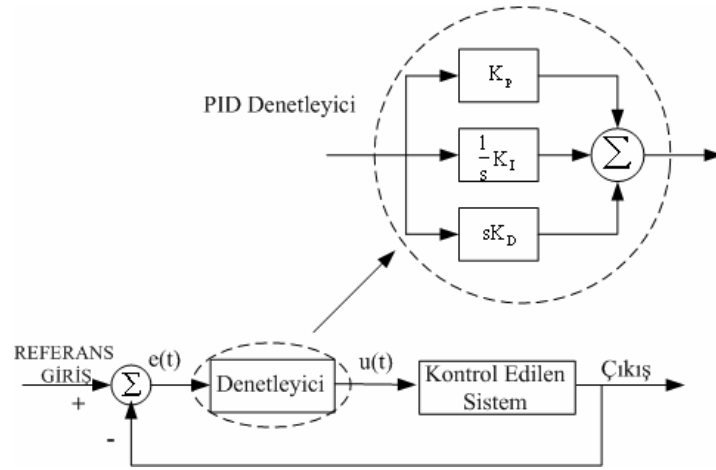
Alan akı değişimleri olan OGR girişi hem armatür reaksiyonuna hem de alan gerilimi değişimlerine yol açmaktadır. K_5 ve K_6 için ifadeler OGR performansının çalışma koşulları ile değişeceğini ve böylece OGR ayarı gerektiğini göstermektedir. OGR etkisi hem senkronlama hem de sönüm momentlerini açıkça değiştirecektir. İfadelerden K_2 , K_3 , K_4 ve K_6 genellikle pozitif olurken, K_5 'in pozitif ya da negatif olabildiği bulunmaktadır. K_5 'in negatif olduğu durum daha alışılagelmiştir. OGR etkisi senkronlama momentini arttırmak ve sönüm momentini azaltmaktır.

2.8 Kontrol Yöntemleri

2.8.1 PID kontrol

PID kontrol kesinlikle günümüzde en yaygın kullanılan kontrol stratejisidir. Kontrol çevrimlerinin %90'ından fazlasının PID kontrol kullandığı tahmin edilmektedir (Knospe 2006). PID, Orantılı İntegral Türevinin kısaltılmasıdır (İbrahim 2004). PID denetleyici; orantı, integral ve türev (P,I ve D) temel kontrol etkilerini birleştiren sürekli kontrol yasası veya yordamıdır. Yani bu denetleyicide sürekli olarak hata mevcut olduğu sürece kontrol komutu da mevcuttur (Yüksel 2006). şekil 1'de PID kontrol yönteminin blok diyagramı görölmektedir. Referans değeri, ölçölen değer ile karşılaştırılarak farkı alınmakta ve $e(t)$ hata sinyali elde edilmektedir. Denetleyici hata sinyaline göre $u(t)$ kontrol çıkış sinyali üretmekte ve hatayı en aza indirmeye çalışmaktadır. PID denetleyici çıkışındaki kontrol sinyali, hatanın çarpanı, integrali ve

türevi alınarak hesaplanmaktadır (Kizir ve Ertunç 2006). PID denetleyici genelde en basit yapıda denetleyici olarak bilinmektedir ve pek çok endüstriyel uygulama alanında yeterli ve uygun bir kontrol sağlamaktadır. Diğer taraftan bu basitlik ve kullanılabilirlik özelliklerinin yanında zayıf yanları da vardır. PID denetleyici günümüzde karmaşık yapıda her çeşit sisteme uygulanamamaktadır. PID denetleyici daha çok doğrusal ve basit yapıda tek döngülü sistemlerde kolaylıkla uygulanabilmektedir. Buna karşılık doğrusal olmayan, özellikle ölü zaman gecikmesi sistem zaman gecikmesi yanında çok yüksek olan sistemlerde uygulanması zordur (Yüksel 2006).



Şekil 2.32 PID kontrol blok diyagramı (Kizir ve Ertunç 2006).

Oransal terimi hatanın anlık değerine göre makul bir şekilde hatayı azaltmaya çalışırken, integral terimi hatanın yavaşça sıfır olmasını ve türevsel terim ise hatanın değişim oranını kullanarak gelecek değeri tahmin etmeye çalışmakta, oransal terimin sisteme olan cevabını hızlandırmakta ve integral teriminin neden olduğu gecikmeyi gidermektedir. Bu terimlerin birleşimi çok hassas, doğru ve kararlı bir kontrol sağlamaktadır. Ancak optimum kontrolü sağlamak için kontrol katsayılarının çok iyi ayarlanması gerekmektedir (Kizir ve Ertunç 2006).

PID denetleyicinin kontrol etki sinyali üç bileşenden oluşur (İbrahim 2004):

$$p(t) = K_p e(t) \quad (2.110)$$

(2.110) ile ifade edilen oransal etki, $p(t)$, o andaki sinyalin hata sinyaline orantılı olduğu durumdur (İbrahim 2004). Oransal kontrol hatayı giderici bir etki sağlamaktadır. Oransal katsayı K_p denetleyicinin oransal kazancı olarak bilinmektedir. Kazanç arttıkça sistem cevabı, değişen referansa göre daha hızlı hale gelmekte ve kalıcı durum hatası küçülmekte, ancak sistem kararlılığı azalmakta, aşma ve salınımlar oluşmaktadır (Kizir ve Ertunç 2006).

$$i(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.111)$$

(2.111) ile ifade edilen integral etki, $i(t)$, o ana kadarki sinyalin, hata sinyalinin değişen değerlerine orantılı olduğu durumdur (İbrahim 2004). Oransal kontrolün hatayı yeterli derecede azaltmasına rağmen, tek başına hatanın sıfır olmasını sağlayamamaktadır. Ancak hatanın sıfıra düşürülmesi kontrol sistemine integral teriminin eklenmesiyle sağlanabilmektedir. Uygun integral kazanç sabiti K_i ile hata sıfıra inerken, K_i arttıkça salınımlar ve kararsızlık oluşacaktır (Kizir ve Ertunç 2006).

$$d(t) = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.112)$$

(2.112) ile ifade edilen türev etki, $d(t)$, o andaki hata sinyalinin değişim hızına orantılıdır (İbrahim 2004). Türev teriminin eklenmesiyle, kararlılık artmaktadır, yüksek kazançlı oransal ve/veya integral terimleri sonucu oluşan aşmayı azaltmaktadır ve sistemin yanıt hızını arttırmaktadır. Türevsel kazanç sabiti ya da sönüm sabiti K_D , küçük seçilmişse gidermesi gereken aşma devam edebilirken, yüksek seçilmesi sonucu sistem cevabının yavaş olmasına neden olabilmektedir (Kizir ve Ertunç 2006).

Toplam kontrol etkisi, $m(t)$, (2.113) ile gösterilebilmektedir (İbrahim 2004):

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.113)$$

K_p , K_i ve K_d denetleyicilerin kapalı çevrim sistemdeki etkileri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Bu yüzden, Çizelge 2.1, K_p , K_i ve K_d değerleri belirlenirken referans olarak kullanılabilir (İnt.Kyn.2).

Çizelge 2.1 Kapalı çevrim sistemde K_p , K_i ve K_d denetleyicilerin etkisi (İnt.Kyn.2).

Kapalı çevrim cevabı	Artış zamanı	Aşım	Oturma zamanı	Kararlı hal hatası
K_p	Azalı	Artar	Az değişir	Azalı
K_i	Azalı	Artar	Artar	Elenir
K_d	Az değişir	Azalı	Azalı	Az değişir

Standart bir PID denetleyici, transfer fonksiyonu genellikle paralel şekilde (2.114) ve ideal şekli (2.115) ile ifade edilen üç terimli denetleyici olarak da bilinmektedir (Ang vd. 2005).

$$G(s) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{s} + K_D \cdot s \quad (2.114)$$

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_D \cdot s \right) \quad (2.115)$$

T_i integral zaman sabiti, T_D türev zaman sabitidir.

$T_i \geq 4 \cdot T_D$ ise PID denetleyici seri şekilde de gerçekleştirilebilir. Bu durumda PD ve PI denetleyiciler kaskat bağlı olarak uygulanabilir; (2.116) ile ifade edilmektedir (Ang vd. 2005).

$$G(s) = K_p (\alpha + T_D \cdot s) \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha \cdot T_i \cdot s} \right) \quad (2.116)$$

$$\alpha = \frac{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \cdot T_D}{T_i}}}{2} > 0 \quad (2.117)$$

2.8.2 Bulanık mantık (BM)

BM yaklaşık akıl yürütmenin mantığıdır (Baykal ve Beyan 2004). Bulanık mantık A. Lotfi Zadeh tarafından 1965 yılında ortaya atılmıştır (Özarlan ve Bay 2006). Bulanık mantığın ardındaki temel fikir, bir önermenin doğruluğunun, önermelerle, kesin yanlış ve kesin doğru arasındaki sonsuz sayıda doğruluk değerlerini içeren bir kümedeki değerle ya da sayısal olarak $[0,1]$ gerçel sayı aralığıyla ilişkilendirilen bir fonksiyon olarak kabulüdür (Baykal ve Beyan 2004).

Bulanık mantığın genel özellikleri Zadeh tarafından şu şekilde ifade edilmiştir;

- Bulanık mantıkta, kesin değerlere dayanan düşünme yerine yaklaşık düşünme kullanılmaktadır.
- Bulanık mantıkta her şey $[0,1]$ aralığında belirli bir derece ile gösterilmektedir.
- Bulanık mantıkta bilgi büyük, küçük, çok az gibi dilsel ifadeler şeklindedir.
- Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılmaktadır.
- Her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilmektedir.
- Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için çok uygundur (Elmas 2003).

2.8.2.1 Bulanık kümeler

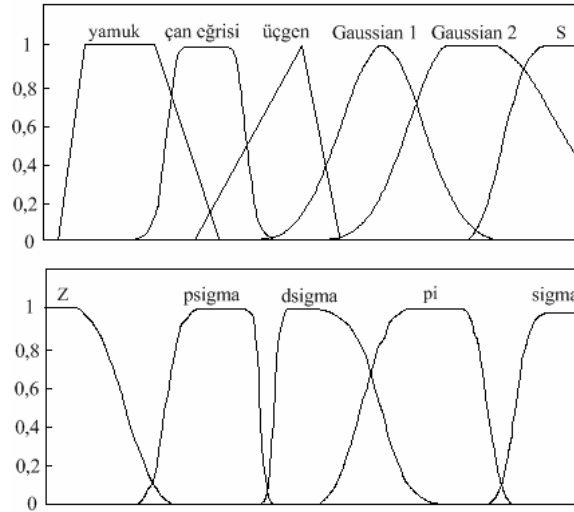
Klasik kümeler belli karakteristikleri taşıyan nesnelere toplamı olarak tanımlanmaktadır. Klasik kümede bir x nesnesi ya verilen A kümesinin bir elemanıdır ya da elemanı değildir; kısmi üyelik mümkün değildir (İbrahim 2004). Doğal olarak bu mantığın hiçbir esnekliği yoktur. Gerçek dünyada ise bu kadar kesin sınırlar yoktur (Elmas 2003).

Bir bulanık küme, “Seçilen Konu” hakkında “Önermeler Kümesindeki” (Evren) her önermeye doğruluk değeri atayarak elde edilen “Doğruluk İşlevi” ile tanımlanmaktadır (Çiftçibaş 2006). Bulanık kümeler, klasik kümelerin bir jenerasyonu olarak

görülebilmektedir (İbrahim 2004). Bulanık kümeler kuramının amacı belirsizlik ifade eden, tanımlanması güç veya anlamı zor kavramlara üyelik derecesi atayarak onlara belirlilik getirmektir. Belirlilik getirme yaklaşımı iki değerli kümeler kuramının, çok değerli kümeler kuramına dönüşümünden doğmaktadır (Karanfil 1997).

2.8.2.2 Üyelik fonksiyonları

Bulanık bir kümenin kesikli ve sürekli fonksiyonlarının bir insanın düşünme şeklini yakalaması istenmektedir (İbrahim 2004). Bir A bulanık kümesi $\mu_A : X \rightarrow [0,1]$ genelleştirilmiş karakteristik fonksiyonuyla karakterize edilmektedir (Bandemer ve Gottwald 1996). $\mu_A(x)$ A'nın üyelik fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır; x'in A'daki üyelik derecesidir ki bu x'in A'ya ait olma derecesini göstermektedir (Oonsivilai ve El-Hawary 1998). Bulanık üyelik fonksiyonları uzmanın düşüncesi temelinde pratik problemlere bağlı olarak seçilebilmektedir. Uzmanın düşünme şekli ya doğrudan ya da dolaylı olarak özel bir algoritma aracılığıyla yakalanabilmektedir (İbrahim 2004).



Şekil 2.33 Değişik üyelik fonksiyonları (Elmas 2003).

Üyelik fonksiyonları bir bulanık kümeyi ifade ettiğinden, tanımlamaları bulanık küme teorisi içinde önemli bir yer tutmaktadır. Üyelik fonksiyonlarının geliştirilmesi üzerine

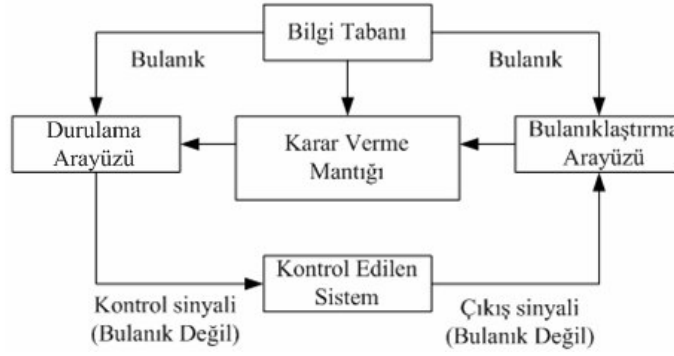
pek çok çalışmalar yapılmıştır (Karanfil 1997). Pratikte üyelik fonksiyonları denetlenecek sistemin durumuna göre uygulayıcı tarafından yamuk, üçgen, çan eğrisi gibi çok değişik şekillerde seçilebilmektedir (Elmas 2003). Bunlardan sıkça karşılaşılabilecek üyelik fonksiyonları Şekil 2.33'te gösterilmektedir.

2.8.3 Bulanık mantık kontrol (BMK)

BM son yirmiyılda birçok sistemi kontrol etmek için kullanılan güçlü bir araç haline gelmiştir (Karaköse 2006). Basitliğinden; lineer ve nonlineer aygıtları mükemmel kontrolünden dolayı bulanık mantık günlük hayatta birçok farklı şekilde mühendisler için bir araç olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Moodley vd 1996). BMK sistemi temel olarak kontrol hedeflerine ulaşmak için kullanılan bir BM karar verme yapısıdır (Karaköse 2006).

BMK sistemleri birden fazla anlama gelebilen kurallar kümesinden yapılandırılmış üyelik fonksiyon kümeleri ile etkin bir kontrol yapabilme olanağı sunmaktadır (Erentürk 2006). BMK otomatik kontrol stratejisine uzman bilgisine dayanan sözel kontrol stratejisi sağlamaktadır (Birdwell ve Wang 1994). Bulanık mantık algoritmasının kullanımı, makinalara sıcak, soğuk, geniş, küçük vb. gibi belirli insani kavramları anlama ve buna yanıt verme olanağı sağlamaktadır (İbrahim 2004). BM temelli denetleyiciler klasik kontrol sistemlerinde görülen herhangi bir matematiksel modele bağlı kalmadan sadece sistem çıkışına bakarak sistem girişini istenilen çıkışı elde etmek için ayarladıklarından, karmaşık, kararsız ve doğrusal olmayan sistemlerin parametre kestirimine ve matematiksel modellerine ihtiyaç duymadan kontrolü için oldukça elverişlidirler (Ertürk 2006).

Şekil 2.34 bulanık mantık denetleyicinin blok diyagramını göstermektedir, genellikle 4 prensip bileşen içermektedir: bulanıklaştırma ara yüzü, bilgi tabanı, karar verme mantığı ve durulama ara yüzü. Bulanık denetleyici normalde iki giriş ve bir çıkış bileşenine sahiptir (Gupta ve Bhatia 2006, Majid vd. 2002). Bir BM denetleyicinin girişleri hata ve hatanın değişiminden oluşmaktadır (Karaköse 2006).



Şekil 2.34 BM denetleyicinin prensip tasarımı(Gupta ve Bhatia 2006, Majid vd. 2002).

2.8.3.1 Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, sistemden alınan kontrol giriş bilgilerini dilsel etiketler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemidir (Elmas 2003). Bu sembolik olarak (2.118) ile ifade edilebilmektedir.

$$x = \text{bulanıklaştırıcı}(x_0) \quad (2.118)$$

x_0 prosesten kesin giriş değeri; x bulanık kümedir (Shi vd. 1992).

Sistemin verimli çalışmasını sağlamak amacıyla değişik şekillerde bulanık kümeler seçilebilmektedir (Elmas 2003). Bulanık kümeleri tanımlamak için sayısal ve fonksiyonel olmak üzere iki yöntem vardır (Shi vd. 1992).

2.8.3.2 Bilgi tabanı

Bilgi tabanı, karar verme biriminin kural tabanının da kullandığı bilgileri aldığı veri tabanı ve denetim amaçlarına uygun dilsel kontrol kurallarının bulunduğu kural tabanı olmak üzere iki kısma ayrılabilir (Elmas 2003). Sistemin girişi ile çıkışı arasındaki ilişki bulanık denetimin en önemli kısmıdır. Bu ilişki BM temelli kontrol sisteminin performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğundan, doğru bir

şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır (Erentürk 2006). Bilgi tabanı birimi girişleri çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal EĞER-İSE türünde yazılabilen bütün kuralları içermektedir (Şen 2001). Kural tabanı hangi koşulda hangi kuralların uygulanacağını belirlemektedir (Shi vd. 1992). A ve B girişler, C ise çıkış olan bir sistem için (2.119)'daki gibi bir kural A ve B'nin aldığı değerlere göre C çıkışının bulanık değerini belirlemektedir (Elmas 2003).

$$\text{Eğer } A=x \text{ ve } B=y \text{ ise O HALDE } C=z \quad (2.119)$$

2.8.3.3 Karar verme birimi

Bulanık çıkarım motoru bulanık kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan ilişkilerin hepsini bir araya toplayarak sistemin bir çıkışlı davranmasını temin eden işlemler topluluğunu içeren bir mekanizmadır (Şen 2001). Karar verme birimi çıkarım motoru olarak da adlandırılmaktadır. BM kontrolün çekirdek kısmıdır (Elmas 2003).

Bu kısım insanın karar verme ve çıkarım yapma yeteneğinin benzeri bir yolla bulanık kavramları işlemekte ve çıkarım yaparak gerekli kontrol denetimi belirlemektedir. Burada birçok bulanık gerçekleştirilmektedir. Yani insan beyninin bir benzetimi yapılmaya çalışılmaktadır. Bulanıklaştırıcı biriminde sayısal girişler bulanıklaştırılmakta, durumlaştırma biriminde bulanık olan çıktılar sayısallaştırılmaktadır (Şen 2001). Mandani'in bulanık içermesi max-min kompozisyonu ile birleştirilerek, BMK sistemlerinde çok sık kullanılmaktadır. Max-Dot, Min-Max, Tsukamoto, Takagi-Sugeno en çok kullanılan çıkarım yöntemleridir. Max-Dot yönteminde her bir çıkış değeri ait olduğu üyelik işlevindeki üyelik derecesine bağlı olarak ilgili bulanık kümeyi yeniden ölçeklendirilmektedir. Çıkış değeri tüm girişler için yeniden ölçeklendirilmiş bulanık kümeler içerisindeki maksimum değer alınarak bulunmaktadır. Min-Max yönteminde her bir giriş değeri için ait olduğu üyelik derecesine bağlı olarak ilgili bulanık kümenin üyelik değerinin üstündeki kısmı kesilmektedir. Çıkış değeri, elde edilen bu bulanık kümelere genellikle ağırlık

ortalaması yönteminin uygulanması ile bulunmaktadır. Tsukamoto yönteminde çıkış üyelik işlevi tek yönlü artan bir işlev olarak seçilmektedir. Çıkış değeri ise her bir kuralın keskin çıkış değerinin ağırlık ortalaması alınarak bulunmaktadır. Takagi-Sugeno yönteminde her bir kuralın çıkışı giriş değerlerinin doğrusal birleşimiyle bulunmaktadır (Elmas 2003).

2.8.3.4 Durulama

Bulanık çıkarım sonucu bulanık bir kümedir. Online kontrolde bulanık olmayan kontrol işlemleri gerekmektedir (Shi vd. 1992). Bu yüzden bu sonucun tekrar sisteme uygulanması için giriş değeri gibi sayısal değere dönüştürülmesi gerekmektedir (Elmas 2003). Bulanık küme işlemi sonucundaki bulanık kümenin tek sayı haline dönüştürülmesi işlemine durulama denmektedir (Şen 2001). Literatürde çeşitli durulama yöntemleri kullanılmaktadır. Hiçbir yöntem diğerinden fazla avantaja sahip değildir. Hangi yöntemin kullanılacağı öncelikle tasarımcının deneyimine bağlıdır (İbrahim 2004).

Maksimum üyelik yöntemi, yükseklik yöntemi olarak ta bilinmektedir (Elmas 2003, İbrahim 2004) ve bütün üyelik dereceleri içinde en büyük olana eşittir. (Elmas 2003). En büyük üyelik ilkesi yönteminin kullanılabilmesi için tepeleri olan çıkarım bulanık kümeleri gerekmektedir (Şen 2001). Çıkış (2.120) ile tanımlanmaktadır (İbrahim 2004).

$$\mu_F(x^*) \geq \mu_F(x), \quad \text{tüm } x \in X \text{ için} \quad (2.120)$$

Ağırlık merkezi yöntemi, alan merkezi olarak da bilinmektedir ve en çok kullanılan yöntemdir (Elmas 2003). Durulanmış çıkış x^* (2.121) ile tanımlanmaktadır (İbrahim 2004).

$$x^* = \frac{\int \mu_F(x) \cdot x \cdot dx}{\int \mu_F(x) \cdot dx} \quad (2.121)$$

Ağırlık ortalaması yönteminde girişlerden elde edilen bütün bulanık değerler ile üyelik değeri kullanılarak durulama yapılmaktadır (Elmas 2003). Ağırlıklı ortalama yöntemi simetrik çıkışlı üyelik fonksiyonları için geçerlidir. Her üyelik fonksiyonu, onun maksimum üyelik değeriyle tartılır. Çıkış (2.122) ile tanımlanmaktadır (İbrahim 2004).

$$x^* = \frac{\sum \mu_F(\bar{x}_i) \cdot \bar{x}_i}{\sum \mu_F(\bar{x}_i)} \quad (2.122)$$

Ortalama-maks üyelik yöntemi bu yöntem maksimumun ortası olarak da bilinmektedir (İbrahim 2004). Bu yöntem, maksimum üyelik işlevi yöntemiyle ilişkilidir. Bu işleve göre maksimum üyelik derecesi tek bir nokta olmayıp, düz olabilen sistemler içinde kullanılabilir. (Elmas 2003). Çıkışı (2.123) ile tanımlanmaktadır.

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_i}{n} \quad (2.123)$$

En büyük alanın merkezi yönteminde eğer çıkış bulanık kümesi en azından iki tane dış bükey alt bulanık kümeyi içeriyorsa dış bükey bulanık kümelerin en büyük alanlısının ağırlık merkezi durulama işleminde kullanılmaktadır (Şen 2001). Sonuç üyelik fonksiyonu tarafına doğru eğimlidir. İlk maksimum yöntemi maksimum üyelikle alınan en küçük değeri seçildiğinde, çıktı zirve yaptığı durumda uygulanabilmektedir. Merkezi toplam yöntemi bulanık altkümelerin birleşimi yerine cebirsel toplamını kullanmaktadır (İbrahim 2004). Bu yöntem en hızlı durulama yöntemidir (Şen 2001).

2.8.4 Bulanık modelleme çeşitleri

Bulanık mantık ile yaygın olarak kullanılan başlıca modeller; Mamdani ve Sugeno tipi bulanık modellerdir.

2.8.4.1 Mamdani tipi bulanık modelleme

Mamdani tipi bulanık model çok kolay oluşturulmaktadır, insan davranışlarına çok uygundur. Bu nedenle çok yaygın bir kullanıma sahiptir ve diğer bulanık mantık modellerin temelini oluşturmaktadır. Bu modelde hem girdi değişkenleri hem de çıktı değişkeni kapalı formdaki üyelik fonksiyonları ile ifade edilmektedir.

Mamdani tipi bir bulanık model aşağıdaki 5 adımda oluşturulmaktadır (Yılmaz ve Arslan 2005);

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

Mamdani yönteminin avantajları (İnt.Kyn.3):

1. Sezgiseldir.
2. Geniş kabule sahiptir.
3. İnsani terimlerle giriş için uygundur.

2.8.4.2 Sugeno tipi bulanık modelleme

Takagi–Sugeno bulanık mantık ya da Sugeno bulanık mantık ilk kez 1985 yılında kullanılmaya başlanmıştır (Yılmaz ve Arslan 2005). Birçok yönden Mamdani

yöntemiyle benzerdir. Mandani ve Sugeno arasındaki temel fark Sugeno çıkış üyelik fonksiyonunun lineer ya da sabit olmasıdır.

Sugeno tipi bulanık sistemde kural şekli (2.124)'teki gibidir.

$$\text{EĞER Giriş 1=x ve Giriş 2=y ise O HALDE çıkış } z=ax+by+c \quad (2.124)$$

Sıfırıncı dereceden Sugeno modeli için z çıkış seviyesi sabittir; yani $a=b=0$ 'dır. Her kuralın z_i çıkışı kuralın w_i ateşleme kuvvetiyle ağırlıklandırılmaktadır. Örneğin, giriş $1=x$ ve giriş $2=y$ ile VE kuralı için w_i ateşleme kuvveti (2.125)'teki gibi ifade edilmektedir (İnt.Kyn.3).

$$w_i = \text{VEyöntemi}(F_1(x), F_2(y)) \quad (2.125)$$

$F_{1,2}(\cdot)$ girişler için üyelik fonksiyonlarıdır. Sistemin son çıkışı tüm kural çıkışlarının ağırlıklandırılmış ortalamasıdır ve (2.126) ile gösterilmektedir.

$$\text{Son çıkış} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2.126)$$

Her kuralın giriş değişkenlerine lineer bağımlılıklarından dolayı Sugeno yöntemi dinamik nonlinear sistemlerin farklı çalışma koşullarına uygulanan çoklu lineer denetleyiciler için idealdir.

Sugeno tipi bulanık modelin avantajları (İnt.Kyn.3):

1. Hesaplama için daha uygundur.
2. Lineer tekniklerle daha iyi çalışmaktadır (Örn, PID kontrol).
3. Optimizasyon ve uyarlama teknikleri ile iyi çalışmaktadır.
4. Çıkış yüzeyinin devamlılığını garantilemektedir.
5. Matematiksel analiz için uygundur.

2.8.4.3 Sugeno ve Mandani yöntemlerinin karşılaştırılması

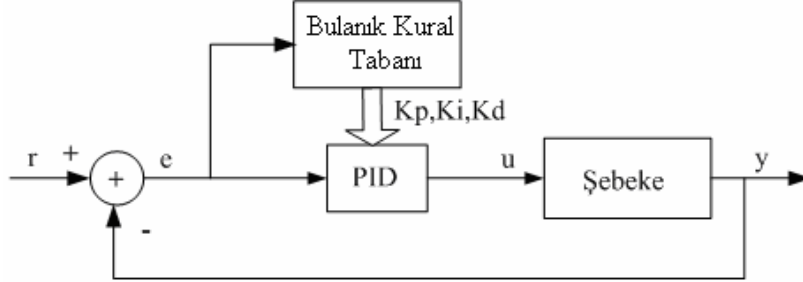
Sugeno yöntemi Mandani sistemden daha karmaşıktır ve hesaplama için daha uygundur. Sugeno sistemi kendi kendine bulanık modeller yapılandırmak için uyarlamalı tekniklerin kullanımına katkıda bulunmaktadır. Bu uyarlamalı teknikler bulanık sistem en iyi model bilgisine sahip olsun diye üyelik fonksiyonlarını özelleştirmek için kullanılabilir (İnt.Kyn.3).

2.8.5 Bulanık mantık PID (BPID) kontrol

PID denetleyiciler en yaygın kullanılan algoritmalarıdır fakat büyük bir kısmı çalışma esnasında yetersiz olarak ayarlanmaktadır. Geçen yıllardan beri birçok etkin ayarlama metodları geliştirilmiştir. Bununla birlikte, basit PID yapısı çok karmaşık sistemler için iyi bir kontrol sağlayamamıştır (Birdwell ve Wang 1994). Klasik PID denetleyiciler yarım yüzyıldan beri geliştirilmiş ve uygulanmıştır, endüstriyel otomasyon ve proses kontrolü için bugün de geniş ölçüde kullanılmaktadır. Bunun temel sebebi işlem basitliği, tasarım kolaylığı, ucuz bakımları ve birçok lineer sistem için ucuzlukları ve etkinlikleridir. Son zamanlarda hızla gelişen ileri mikroelektronik ve dijital işlemciler ile klasik PID denetleyiciler analog elektronikle pinomatik denetleyicilerden dijital devrelerle mikroişlemcilerle teknolojik evrim geçirmişlerdir (Mann vd. 1999).

BPID denetleyiciyle her PID denetleyici düzeltilmiş performans için ayrıca esneklik ve dayanıklılık özellikleri sağlanarak gerçekleştirilebilmektedir. BPID denetleyici kapalı çevrim sistemin kararlılığını garantileyen koşullar sağlamaktadır (Birdwell ve Wang 1994). BPID denetleyici, PID denetleyiciye nonlineer bir alternatiftir. BPID giriş sinyalleri hata (e) ve hatanın türevidir (de) ve BPID çıkış sinyali kontrol işlemlerinde değişmektedir. Genellikle daha fazla üyelik fonksiyonun daha fazla nonlineer ilişki kurulmasına izin verdiği doğrudur (Qin 1994). BPID denetleyici ile şebeke dinamiklerinin değişimine ve dışsal değişimlere göre kontrolü ve uyum yeteneğini gerçekleştirmektedir. BPID modeli PID denetleyici modeline bağımlıdır. Farklı koşullar için kullanılan PID kazançları bulanık kural tabanına kodlanmaktadır. Algoritmayı

öğrenen makina şebeke ve çevre bilgisini edinmek ve performansın belirlenen ölçümlerine göre optimum ayarları elde etmek için kural tabanını ayarlamak amacıyla geliştirilmektedir. Türetilen denetleyici en azından optimum PID denetleyici kadar iyi bir kontrol sağlamaktadır (Birdwell ve Wang 1994).

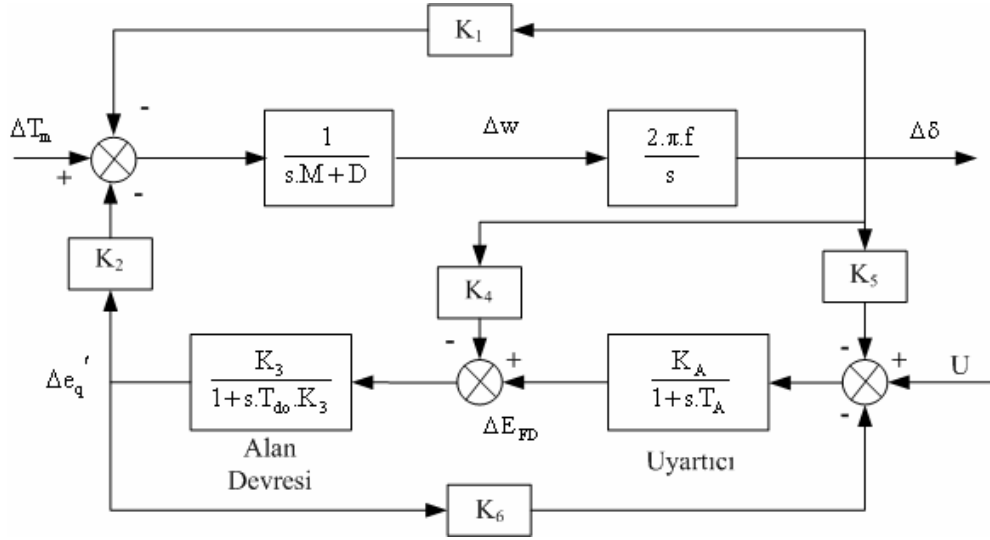


Şekil 2.35 BPID denetleyici modeli (Birdwell ve Wang 1994).

BPID denetleyicinin yapısı Şekil 2.35'te gösterilmektedir. Basit PID yapısına sahiptir fakat PID parametreleri bulanık çıkarım ile üretilmektedir. Nonlineer fonksiyon sabit kazançlara yakın olan başlangıç fonksiyonundan ayarlanmaktadır (Birdwell ve Wang 1994). BM denetleyiciler üç sınıfa ayrılabilir: direk işlem (DA) tipi, kazanç listeleme (GS) tipi ve DA ve GS tiplerinin birleşimi. BPID uygulamalarının çoğu DA tipidir; burada BPID denetleyici geri besleme kontrol döngüsüne yerleştirilmektedir ve bulanık çıkarımından PID işlemlerini hesaplamaktadır. GS tipi denetleyicilerde bulanık çıkarım ayrı PID kazançlarını hesaplamada kullanılmaktadır ve çıkarım ya hata ile sürülen otomatik ayarlama ya da performans temelli destekleyici ayarlamadır (Mann vd. 1999).

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Model ve Simülasyon Parametreleri



Şekil 3.1 Lineerleştirilmiş SMIB sistem modeli (Chung vd. 1999).

Simülasyonda kullanılan SMIB sistem modeli Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Bu sistem uyarım kontrol sistemi olarak sadece uyarıtıcı içerir, ek bir denetleyici içermemektedir.

Senkron generatör modeline ve uyarıtıcıya gerekli parametreler için daha önce uygulaması yapılmış (Chung vd. 1999) olan değerler (Çizelge 3.1) kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri (Chung vd. 1999).

D	f	M	T _{do}	K _a	T _a
0	60	9.26	7.76	50	0.05

Senkron generatör modelinin içerdiği katsayılar çalışma durumlarına göre değişmektedir. Simülasyonda kullanılan üç farklı çalışma durumuna ait katsayılar Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2 Simülasyonda kullanılan çalışma durumlarına ait parametreler (Chung vd. 1999).

No	P	Q	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆
1	1.0	0.015	0.5423	1.2068	0.6584	0.6982	-0.0955	0.8159
2	0.7	0.4	0.4739	0.8359	0.6584	0.6982	-0.1272	0.8598
3	1.3	0.8	0.6313	1.2105	0.6584	0.6982	-0.1004	0.8239

Tüm simülasyon uygulamaları için ilk rotor açısı 0.1 alınmıştır. Denetleyicinin bozulmayı giderme yeteneğini görebilmek için sisteme bozucu sinyal uygulanmıştır. Bu bozucu sinyal mekanik güç girişi T_m noktasından 5. s’de 0.5 s süreyle 0.5 birim olarak uygulanmıştır.

Simülasyon çalışmalarında kullanılan gskk adlı yazılım Ek-1’de verilmektedir.

Modern kontrol teorisi sistem mühendisinin gerekli sistem performansını nicel olarak belirleyebileceğini kabul etmektedir. Performans indeksi hesaplanabilmekte ya da ölçülebilmektedir ve sistem performansını değerlendirmek için kullanılabilir. Performans indeksi (3.1) ile ifade edilen hatanın mutlak değerinin toplamıdır. Bu indeks özellikle simülasyon çalışmaları için yararlıdır (Dorf ve Bishop 1995).

$$J = \int_0^T |e(t)|.dt \quad (3.1)$$

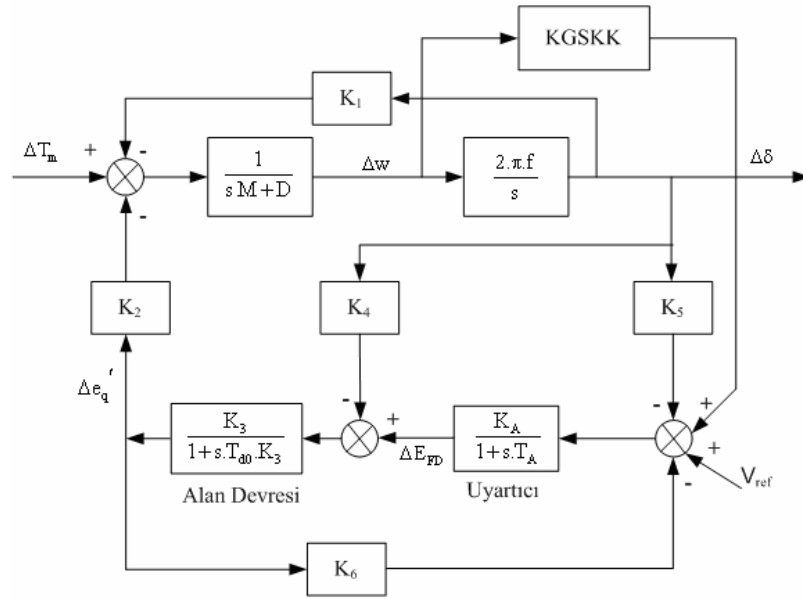
Tüm simülasyon sonuçları ile görsel olarak değerlendirilen denetleyici performansının sayısal olarak değerlendirilmesi (3.1) ile ifade edilen performans indeksine göre belirlenen (3.2) ve (3.3) ifadeleri ile yapılmıştır.

$$J = \int_0^T |\Delta\delta(t)|.dt \quad (3.2)$$

$$J = \int_0^T |\Delta w(t)|.dt \quad (3.3)$$

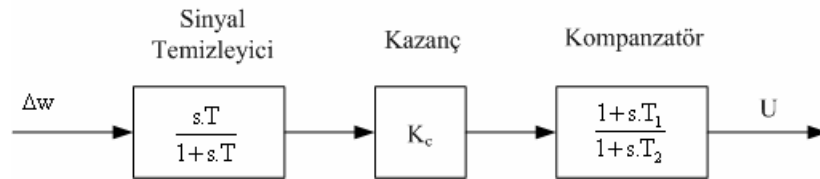
Farklı yük koşulları altındaki sistem performansını sayısal olarak ifade etmek için simülasyon süresi t 20 s alınmıştır.

3.2 Klasik GSKK (KGSKK)



Şekil 3.2 KGSKK'lı SMIB sistemin blok diyagram modeli

KGSKK'lı SMIB sistemin blok diyagram modeli Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Sistem modeline daha önce uygulanmış olan (Chung vd., 1999) bir KGSKK modeli uygulanmıştır. Uygulamada kullanılan KGSKK'nın blok diyagram modeli Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Çizelge 3.3'te ise bu KGSKK'ya ait parametreler verilmiştir.



Şekil 3.3 KGSKK modeli (Chung vd. 1999)

Çizelge 3.3 KGSKK parametreleri (Chung vd. 1999).

K_c	T	T_1	T_2
7.09	3.0	0.685	0.1

Sinyal temizleyici bloğu w_r 'deki salınımlarla ilgili sinyallerin değişmeden iletilmesine izin verecek kadar yüksek T zaman sabitiyle yüksek geçiren filtre olarak çalışmaktadır.

GSKK'nın sadece hız değişimlerinde tepki göstermesini sağlamaktadır. Sinyal temizleyici fonksiyonu açısından T değeri kritik değildir ve 1-20s aralığında olabilmektedir. K_c kararlı kılıcı kazancı GSKK tarafından girilen sönüm miktarını belirlemektedir. İdeal olarak kazanç maksimum sönüme göre ayarlanmaktadır (Kundur 1993).

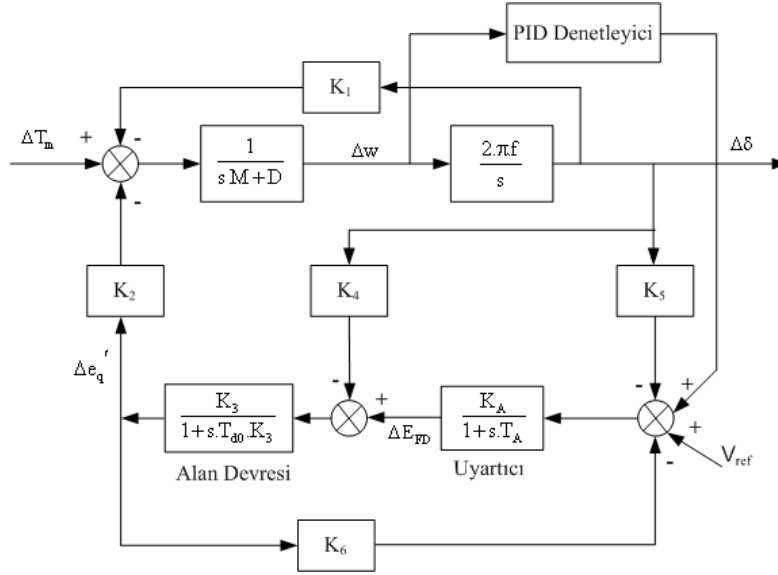
3.3 PID Denetleyicinin Tasarlanması

PID denetleyicinin ayarlanması orantı, integral ve türev parametreleri olan K_p , T_i ve T_d değerlerinin en uygun şekilde belirlenmesidir. En uygun ayar geribeslemeli sistemin en az veya sıfır hata, hatayı kısa zamanda düzeltme ve en kararlı çalışmasıdır. Başka bir ifadeyle minimum hatayı minimum zamanda ve minimum salınımla gidermesidir (Yüksel 2006). PID denetleyici Ziegler-Nichols frekans cevabı metodu kullanılarak ayarlanabilmektedir. Ziegler-Nichols frekans cevabı metodunda işlem basamakları:

1. PID denetleyici geri besleme hattına yerleştirilmektedir ve integral ve türev etki iptal edilmektedir.
2. Oransal kazanç sistem salınıma girene kadar arttırılmaktadır ve bu kazanç değeri K_u olarak adlandırılmaktadır.
3. İki tepe değeri arasındaki değer okunmakta ve T_u olarak adlandırılmaktadır
4. Çizelge 3.4'ten denetleyici değerleri hesaplanmaktadır (Jantzen 1998).

Çizelge 3.4 Ziegler-Nichols kuralları(frekans cevabı metodu) (Jantzen 1998).

Denetleyici	K_p	T_i	T_d
P	$0.5.K_u$	-	-
PI	$0.45.K_u$	$T_u/1.2$	-
PID	$0.6.K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

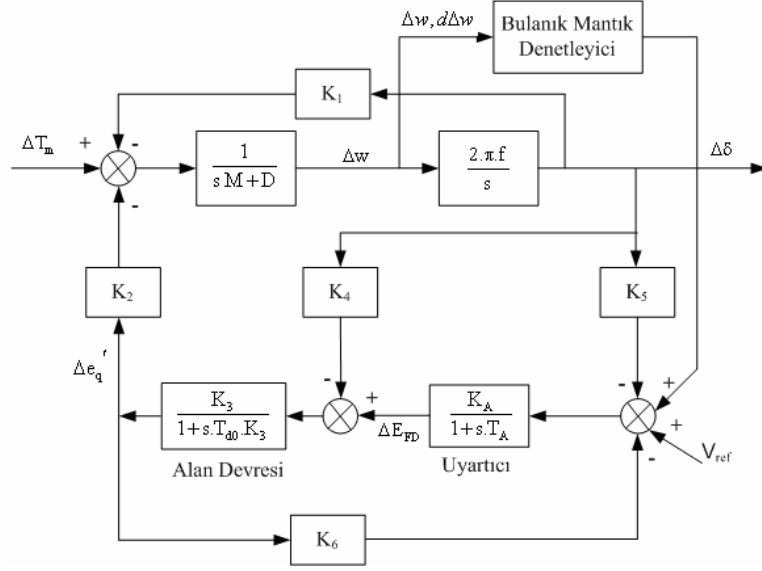


Şekil 3.4 PID denetleyicili SMIB sistemin blok diyagram modeli

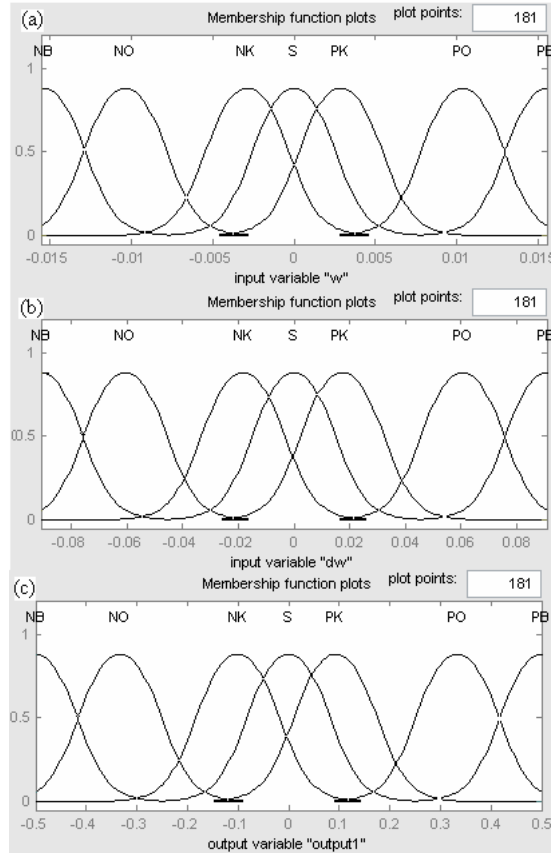
PID denetleyicili SMIB sistemin blok diyagram modeli Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Bu çalışma PID denetleyici parametreleri Ziegler-Nichols frekans cevabı metodu kullanılarak ayarlanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 2.1 referans alınarak düzeltilmiş olup $K_p=30$, $K_i=1.569$, $K_d=2.159$ olarak kullanılmıştır.

3.4 Bulanık Mantık (BM) Denetleyicinin Tasarlanması

BM denetleyicili SMIB sistemin blok diyagram modeli Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen, bölüm 2.8.4.1'de anlatıldığı gibi daha kolay, geniş kabule sahip ve insan davranışlarına daha uygun olan Mandani tipi BGSKK için giriş sinyalleri olarak hız değişimi (Δw) ve bunun türevi ($p\Delta w$) kullanılmıştır. İki giriş değişkeni ve bir çıkış değişkeni PB (pozitif büyük), PO (pozitif orta), PK (pozitif küçük), S (sıfır), NK (negatif küçük), NO (negatif orta), NB (negatif büyük) olmak üzere yedi adet dilsel etiketle tanımlanmıştır. Tanımlanan dilsel etiketler için Şekil 3.6'da gösterilen üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Sistem nonlinear özellikte olduğundan tüm üyelik fonksiyonları için sigmoid eğrileri kullanılmıştır. Performansı olumlu yönde etkilediği için üyelik fonksiyonları değişimin çok olduğu bölgede sıklaştırılmıştır.



Şekil 3.5 BM denetleyicili SMIB sistemin blok diyagram modeli



Şekil 3.6 Δw giriş değişkeni(a), $p\Delta w$ giriş değişkeni (b), çıkış değişkenin(c) üyelik fonksiyonları

Değişken aralıkları için KGSKK'lı SMIB sistem simülasyonundan elde edilen Çizelge 3.5'te gösterilen değerler referans olarak kullanılmıştır. Buna göre tüm giriş durumlarının işleme girebilmesi amacıyla Δw giriş değişkeni için değişim aralığı $[-0,0155, +0,0155]$, $p\Delta w$ giriş değişkeni için $[-0,091, 0,091]$, çıkış değişkeni için ise $[-0,5, 0,5]$ seçilmiştir.

Çizelge 3.5 KGSKK'lı SMIB sistem simülasyonundan elde edilen değişim aralıkları

Çalışma durumları	Δw	$p\Delta w$	KGSKK'nın çıkış değişimi
1	$\pm 0,013$	$\pm 0,09$	$\pm 0,33$
2	$\pm 0,0155$	$\pm 0,091$	$\pm 0,36$
3	$\pm 0,013$	$\pm 0,09$	$\pm 0,33$

Bu çalışmada kullanılan BM denetleyici için kullanılan kural tabanı tablosu ise Çizelge 3.6'da gösterilmiştir. Karar verme biriminde min-max yöntemi, durulama biriminde ise açortay (bisector) yöntemi kullanılmıştır.

Çizelge 3.6 BM denetleyici kural tablosu (Abdelazim ve Malik. 2003).

		$p\Delta w$						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
Δw	NB	NB	NB	NB	NB	NO	NK	S
	NO	NB	NB	NB	NO	NK	S	PK
	NK	NB	NB	NO	NK	S	PK	PO
	S	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
	PK	NO	NK	S	PK	PO	PB	PB
	PO	NK	S	PK	PO	PB	PB	PB
	PB	S	PK	PO	PB	PB	PB	PB

sabit parametrelili PID denetleyici referans alınarak denetleyicilerin çıkış sinyalleri $K_p=30$, $K_i=1.569$, $K_d=2.159$ ile genişletilmiştir.

Tasarlanan BPID denetleyici için K_p , K_i , K_d parametrelerini belirlemede kullanılan kural tabanı tabloları sırasıyla Çizelge 3.7, Çizelge 3.8 ve Çizelge 3.9'da gösterilmektedir. Karar verme biriminde prod-probor yöntemi, durulama biriminde ise wtsun yöntemi kullanılmıştır.

Çizelge 3.7 K_p kural tablosu

K_p	$p\Delta w$							
Δw		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
	NB	NB	NB	NO	NK	NK	S	PK
	NO	NB	NO	NO	NK	S	PK	PK
	NK	NO	NO	NK	S	PK	PO	PO
	S	NK	NK	S	PK	PO	PO	PB
	PK	NK	S	PK	PO	PO	PO	PB
	PO	S	PK	PO	PO	PO	PB	PB
	PB	PK	PO	PO	PB	PB	PB	PB

Çizelge 3.8 K_i kural tablosu

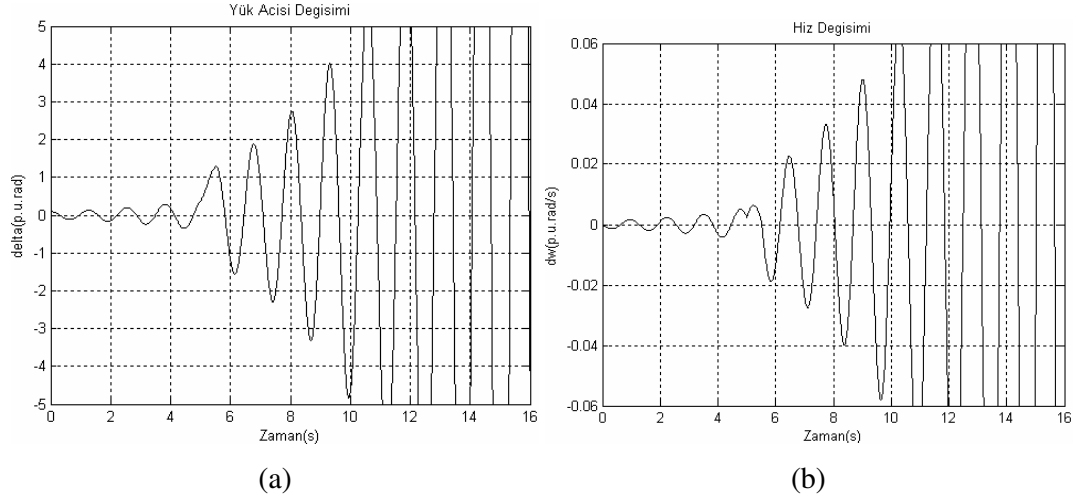
K_i	$p\Delta w$							
Δw		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
	NB	PB	PB	PO	PO	PK	PK	S
	NO	PB	PO	PO	PK	PK	S	NK
	NK	PO	PO	PK	PK	S	NK	NK
	S	PO	PK	PK	S	NK	NK	NO
	PK	PK	PK	S	NK	NK	NO	NB
	PO	PK	S	NK	NK	NO	NO	NB
	PB	S	NK	NK	NO	NB	NB	NB

Çizelge 3.9 K_d kural tablosu

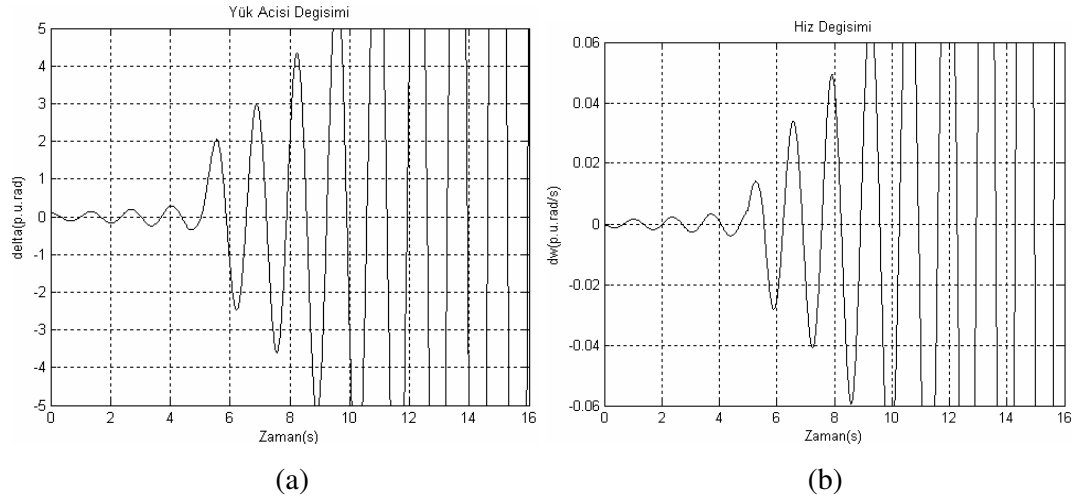
K_d	$p\Delta w$							
	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB	
Δw	NB	NB	NB	NO	NK	NK	S	PK
	NO	NB	NO	NO	NK	S	PK	PK
	NK	NO	NO	NK	S	PK	PO	PO
	S	NK	NK	S	PK	PO	PO	PB
	PK	NK	S	PK	PO	PO	PO	PB
	PO	S	PK	PO	PO	PO	PB	PB
	PB	PK	PO	PO	PB	PB	PB	PB

4. BULGULAR

4.1 İlave Denetleyici İçermeyen SMIB Sistem Simülasyonu



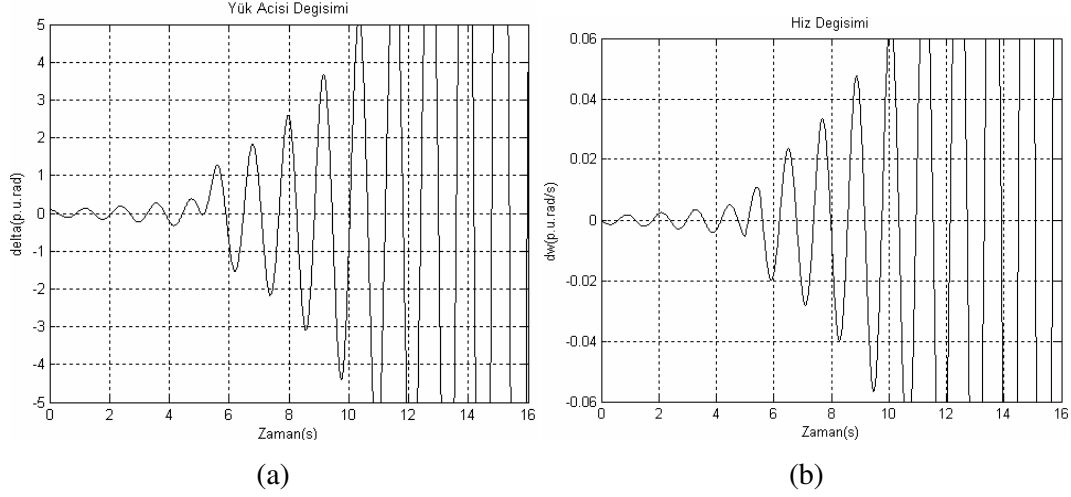
Şekil 4.1 1. çalışma durumuna göre ilave denetleyici içermeyen SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları



Şekil 4.2 2. çalışma durumuna göre ilave denetleyici içermeyen SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

İlave bir denetleyici içermeyen SMIB sistem için Çizelge 3.2’de verilen çalışma durumlarına ait simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te gösterilmektedir. Burada OGR döngüsüne ilave bir denetleyici olmadığından sistem üç

çalışma durumu içinde bozulma uygulanmadan önce kararlı hale gelememiştir ve bozulma uygulandıktan sonra salınımların genliği artmış yani sistem kararsızdır.



Şekil 4.3 3. çalışma durumuna göre ilave denetleyici içermeyen SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

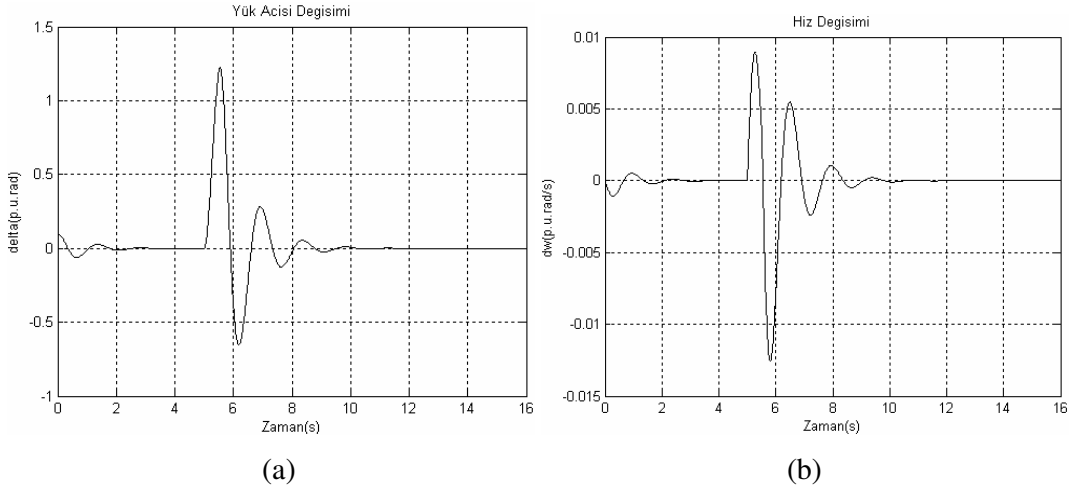
Sayısal değerlerden (Çizelge 4.1) anlaşılacağı gibi yük koşullarının ağırlığından dolayı SMIB sistem ilave denetleyici olmadan kararlı hale gelememiştir. En büyük performans indeksi ise en ağır yük durumu olan 2. çalışmada elde edilmiştir. Bu sonuçlardan da sistem için ilave denetleyici kullanma zorunluluğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.1 İlave denetleyici içermeyen SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

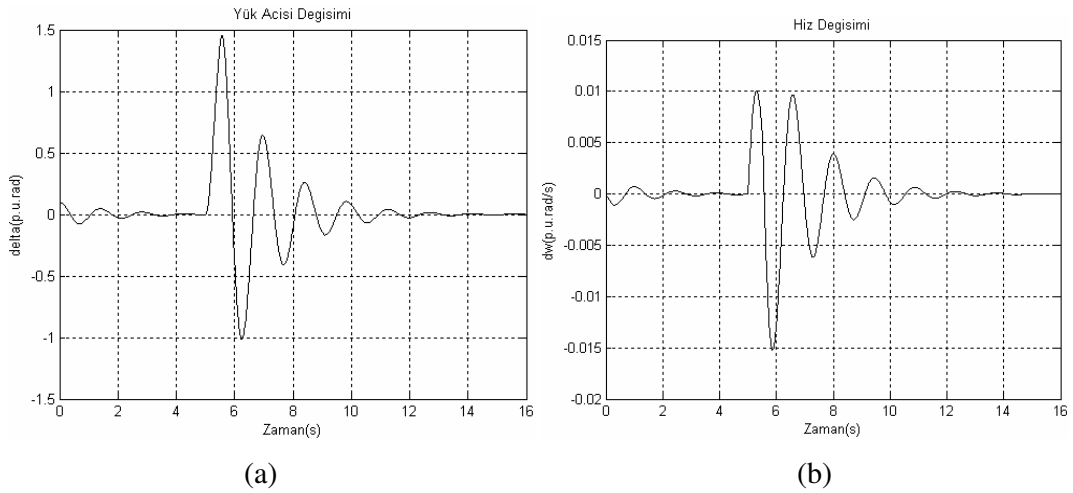
Çalışma Durumları	Yük Açısı	Hız
1	19894	270
2	25492	319
3	19807	269

4.2 KGSKK'lı SMIB Sistem Simülasyonu

Çizelge 3.2'de verilen çalışma durumlarına ait simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Burada OGR döngüsüne ek denetleyici olarak KGSKK kullanılmıştır. 1. çalışma durumu için (Şekil 4.4) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık olarak 3.5s'de, bozucu sinyalden kaynaklanan salınım ise yaklaşık olarak 6s'de giderilmiştir.

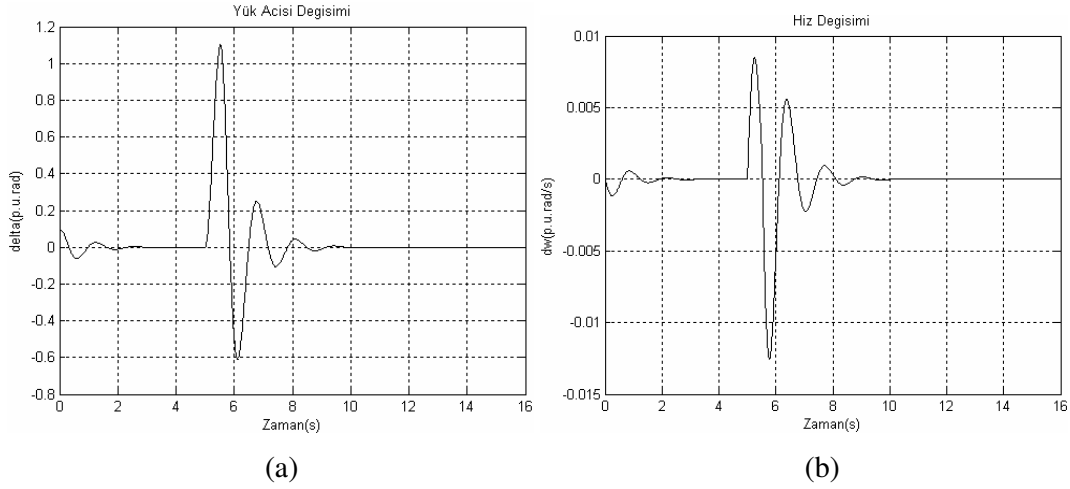


Şekil 4.4 1. çalışma durumuna göre KGSKK'lı SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları



Şekil 4.5 2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

2. çalışma durumunda (Şekil 4.5) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım tam olarak giderilmeden bozucu sinyal uygulanmıştır. Tüm salınımlar 13s’de söndürülmüştür. 3. çalışma durumunda (Şekil 4.6) ise ilk rotor açısından kaynaklanan salınım 3s’de, bozucu sinyalin girişiyile oluşan salınım ise 5s’de söndürülmüştür. Yani sistemin en ağır yük koşulunda dahi bozucu etkiyi söndürebilmesi iyi bir sonuçtur.



Şekil 4.6 3. çalışma durumuna göre KGSKK’lı SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

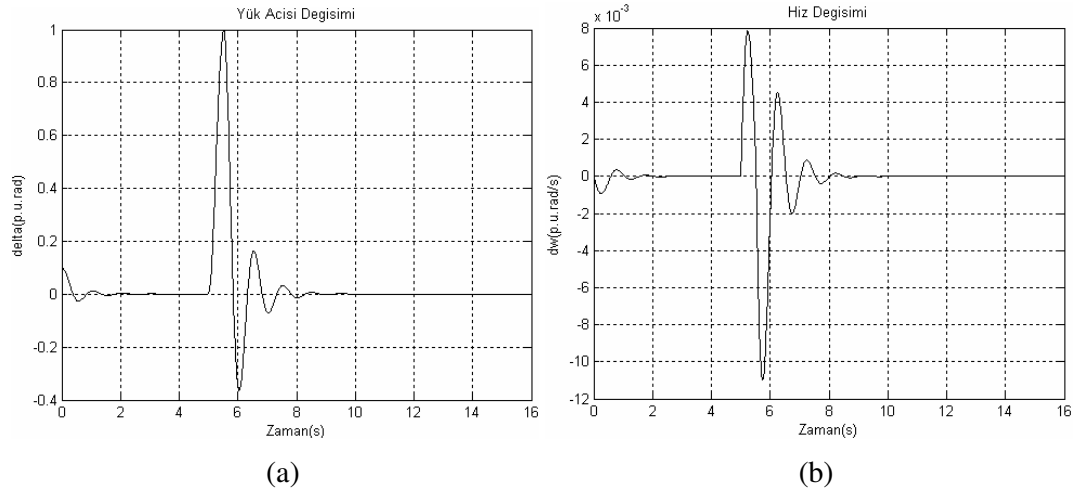
KGSKK’lı SMIB sistem için elde edilen sayısal değerler (Çizelge 4.2) ilave denetleyici içermeyen SMIB sistem için elde edilen sayısal değerle (Çizelge 4.1) karşılaştırıldığında KGSKK’nın bile SMIB sistemde çok büyük bir performans iyileştirmesi yaptığı görülmüştür. KGSKK ile en iyi performans en hafif yük durumu olan çalışma durumu 3 için elde edilmiştir.

Çizelge 4.2 KGSKK’lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

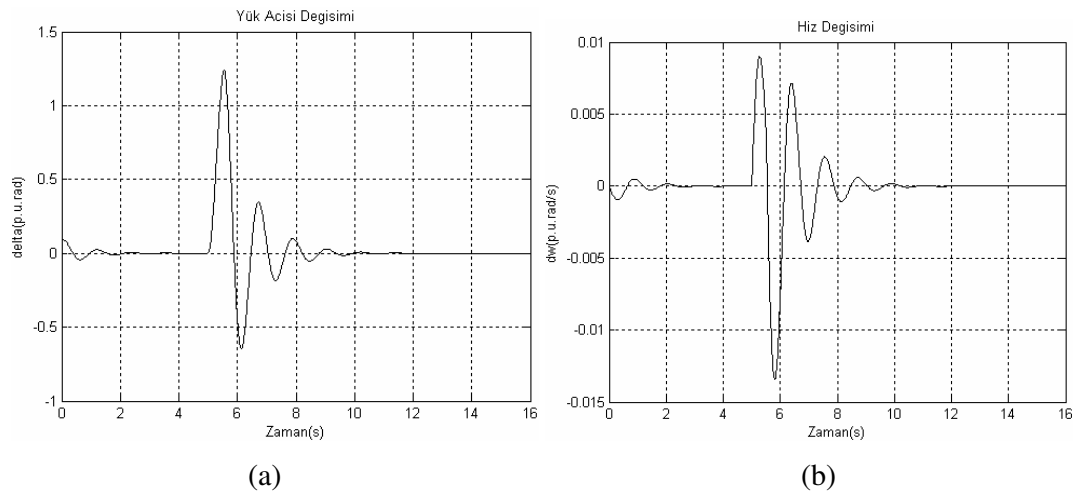
Çalışma Durumları	Yük Açısı	Hız
1	118,0338	1,3529
2	209,1853	2,3858
3	99,5580	1,2221

4.3 PID Denetleyicili SMIB Sistem Simülasyonu

Çizelge 3.2’de verilen çalışma durumlarına ait simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Burada OGR döngüsüne ek denetleyici olarak PID denetleyici kullanılmıştır. 1. çalışma durumu için (Şekil 4.7) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık olarak 2.3s’de, bozucu sinyalden kaynaklanan salınım ise yaklaşık olarak 4s’de giderilmiştir.

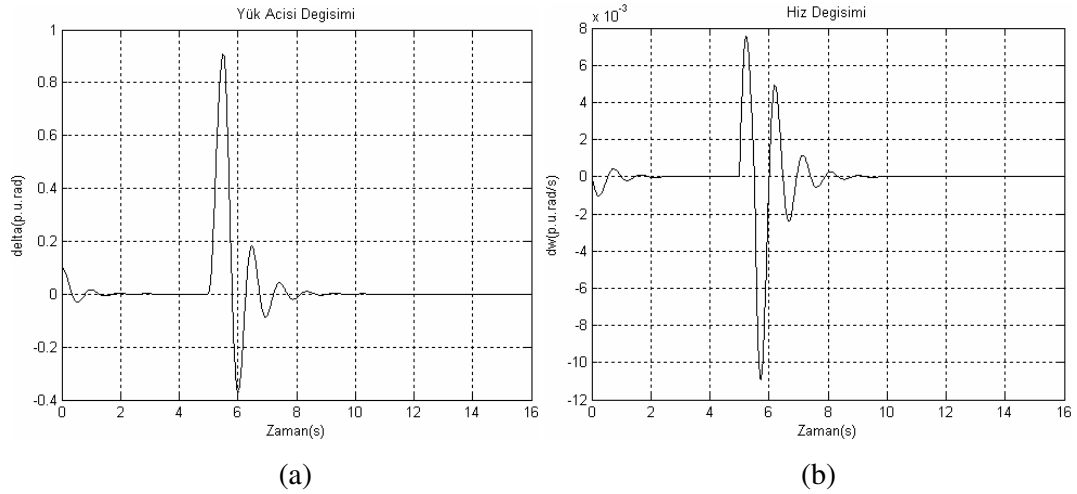


Şekil 4.7 1. çalışma durumuna göre PID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları



Şekil 4.8 2. çalışma durumuna göre PID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

2. çalışma durumunda (Şekil 4.8) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık olarak 3.1 s’de, bozucu sinyalden kaynaklanan salınım ise yaklaşık olarak 5.5 s’de giderilmiştir. 3. çalışma durumunda (Şekil 4.9) ise ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık 2.2s’de, bozucu sinyalin girişiyle oluşan salınım ise yaklaşık 4.5 s’de söndürülmüştür.



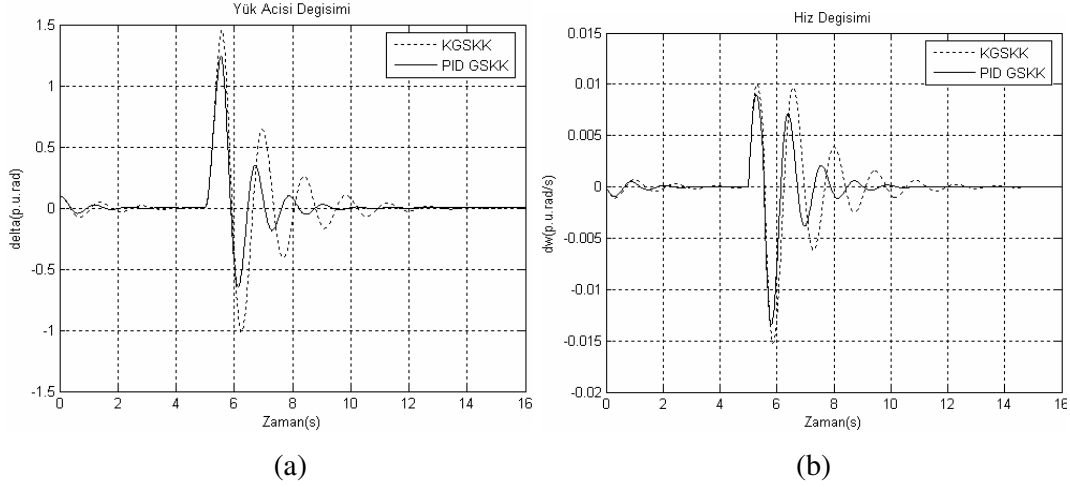
Şekil 4.9 3. çalışma durumuna göre PID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

PID denetleyicinin çalışma durumlarına göre performansını değerlendirebilmek için elde edilen sayısal değerler Çizelge 4.3’te verilmektedir. PID denetleyicili SMIB sistemin en iyi performansı KGSKK’lı SMIB sistemde olduğu gibi en hafif yük durumu olan 3. çalışma durumunda elde edilmiştir. PID denetleyicili SMIB sistemin tüm çalışma noktaları için sistemi kararlı hale getirdiği görülmüştür.

Çizelge 4.3 PID denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

Çalışma Durumları	Yük Açısı	Hız
1	70,4689	0,9278
2	115,9383	1,4750
3	66,2815	0,9231

Şekil 4.10'da 2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve PID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi ve hız değişimi simülasyon sonuçları gösterilmektedir. PID denetleyiciyle KGSKK'lı performansa göre salınımın genliği azaltmış ve daha kısa sürede söndürülmüştür.



Şekil 4.10 2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve PID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

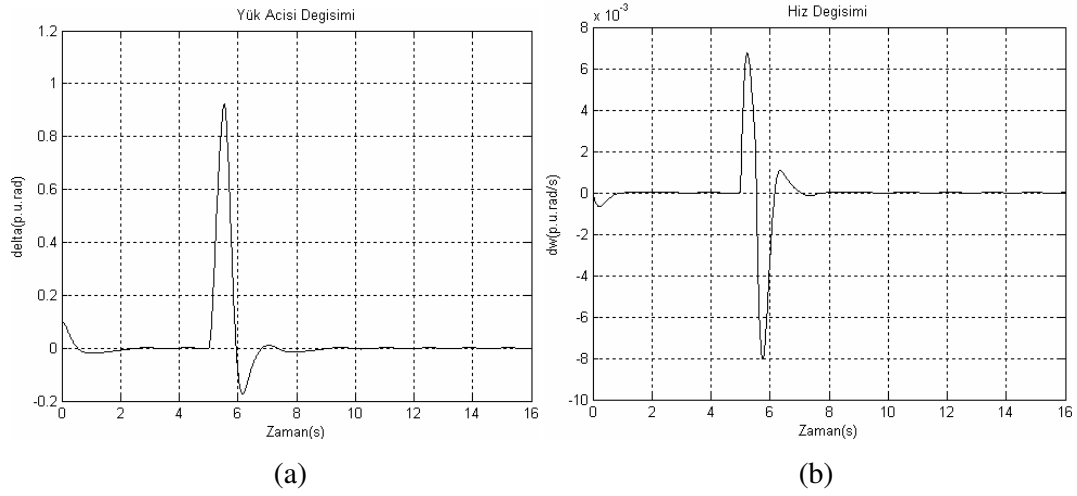
Şekil 4.10'da sadece en ağır yük durumu olan 2. yük durumu için karşılaştırılabilen KGSKK'lı ve PID denetleyicili SMIB sistem davranışı Çizelge 4.4'teki sayısal değerlerle tüm çalışma noktaları için daha kolay karşılaştırılabilmektedir. Sayısal sonuçlardan da anlaşıldığı gibi tüm çalışma durumları için en az hata miktarı vererek PID denetleyici KGSKK'ya göre çok daha iyi performans göstermiştir. Bu performans farkı 2. çalışma durumunda daha açık görülmüştür. Çünkü KGSKK diğer çalışma durumlarına nazaran 2. çalışma durumu ağır yük koşulu olduğundan daha kötü bir çalışma sergilemiştir.

Çizelge 4.4 PID denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

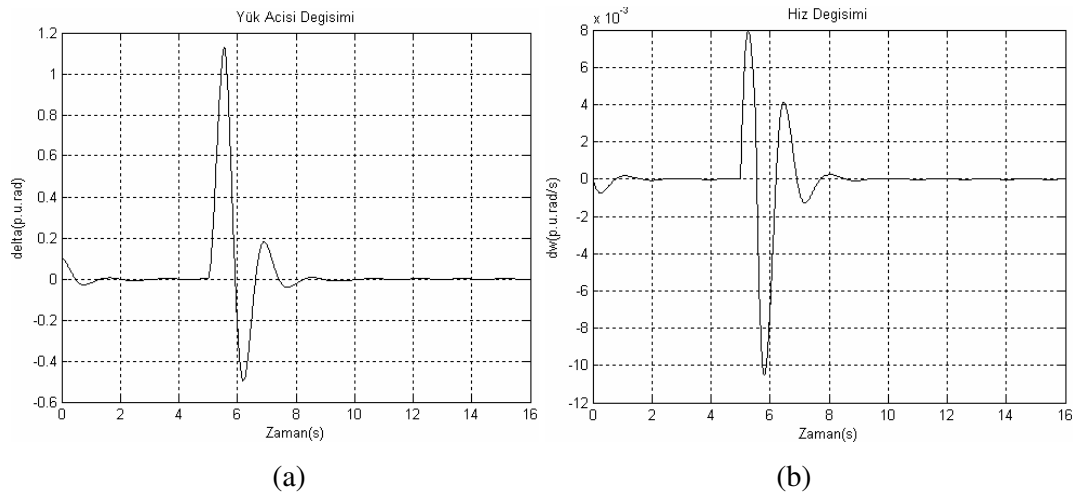
Çalışma Durumları	Yük Açısı		Hız	
	KGSKK	PID GSKK	KGSKK	PID GSKK
1	118,0338	70,4689	1,3529	0,9278
2	209,1853	115,9383	2,3858	1,4750
3	99,5580	66,2851	1,2221	0,9231

4.4 Bulanık Mantık Denetleyicili SMIB Sistem Simülasyonu

Çizelge 3.2’de verilen çalışma durumlarına ait simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te gösterilmektedir. Burada OGR döngüsüne ek denetleyici olarak BM denetleyici kullanılmıştır. 1. çalışma durumu için (Şekil 4.11) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık olarak 2.5s’de, bozucu sinyalden kaynaklanan salınım ise yaklaşık olarak 4.1s’de giderilmiştir.

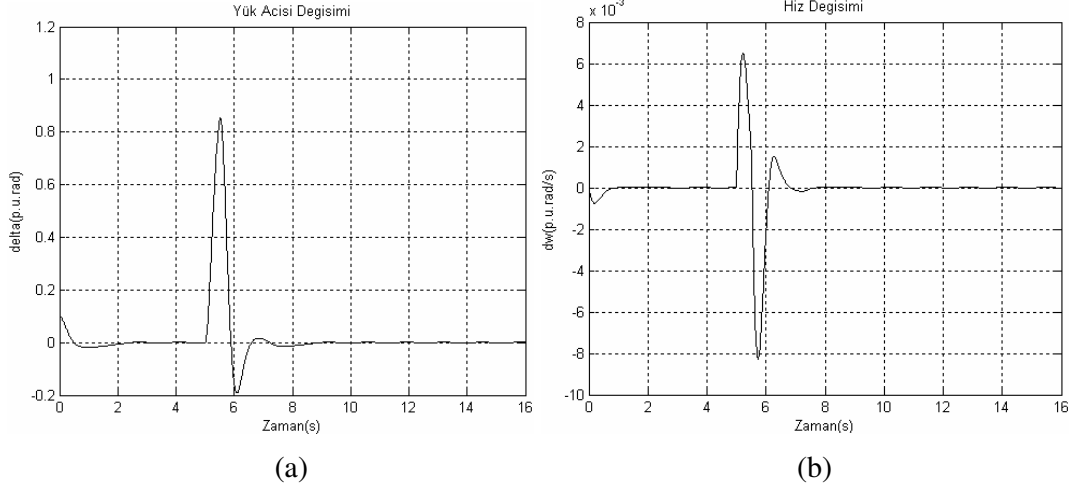


Şekil 4.11 1. çalışma durumuna göre BM denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları



Şekil 4.12 2. çalışma durumuna göre BM denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

2. çalışma durumunda (Şekil 4.12) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık olarak 2.5 s'de, bozucu sinyalden kaynaklanan salınım ise yaklaşık olarak 5 s'de giderilmiştir. 3. çalışma durumunda (Şekil 4.13) ise ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık 2.5s'de, bozucu sinyalin girişiyle oluşan salınım ise yaklaşık 4s'de söndürülmüştür.



Şekil 4.13 3. çalışma durumuna göre BM denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

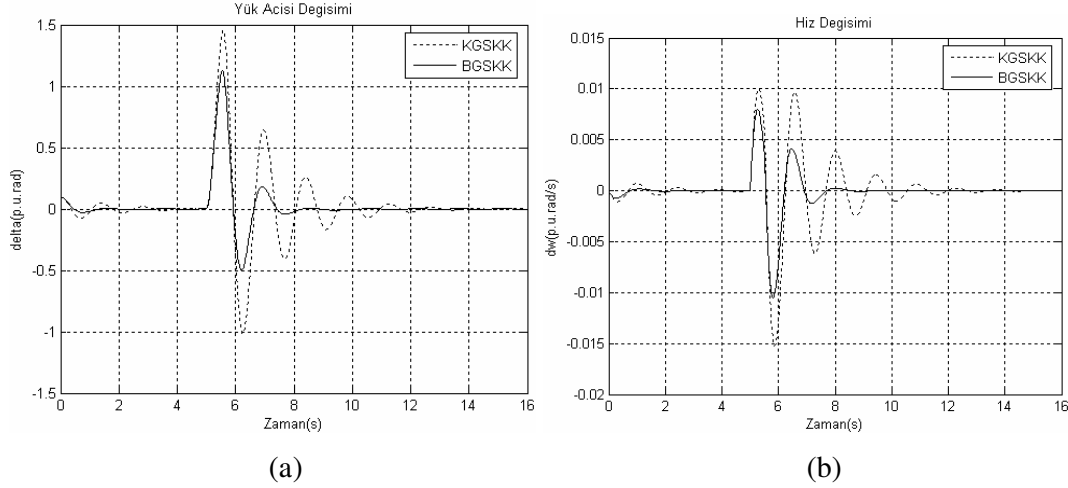
BM denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indekslerinden (Çizelge 4.5) anlaşılacağı gibi sistem tüm çalışma durumlarında oldukça kararlı davranmış ve en iyi performansı 3. çalışma noktasında göstermiştir.

Çizelge 4.5 BM denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

Çalışma Durumları	Yük Açısı	Hız
1	62,4201	0,6541
2	95,5168	1,0580
3	56,4739	0,6283

Şekil 4.14'te 2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve BM denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi ve hız değişimi simülasyonu sonuçları gösterilmektedir. Bu

sonuçlardan BM denetleyiciyle KGSKK'lı sisteme göre salınım miktarının ve süresinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.14 2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve BM denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

BM denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri (Çizelge 4.6) karşılaştırıldığında BM denetleyicinin çok daha iyi performans sergilediği gözlenmiştir.

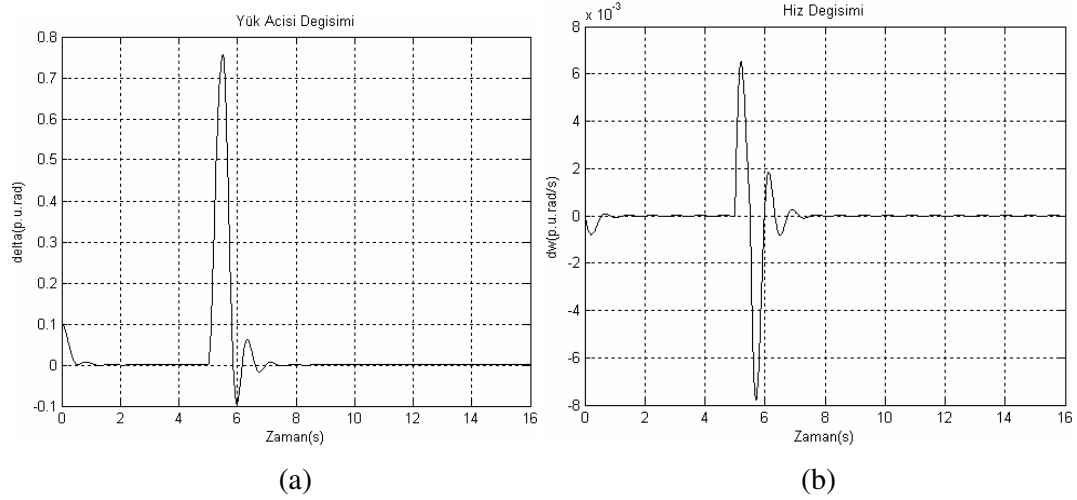
Çizelge 4.6 BM denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

Çalışma Durumlar	Yük Açısı		Hız	
	KGSKK	BGSKK	KGSKK	BGSKK
1	118,0338	62,4201	1,3529	0,6541
2	209,1853	95,5168	2,3858	1,0580
3	99,5580	56,4739	1,2221	0,6283

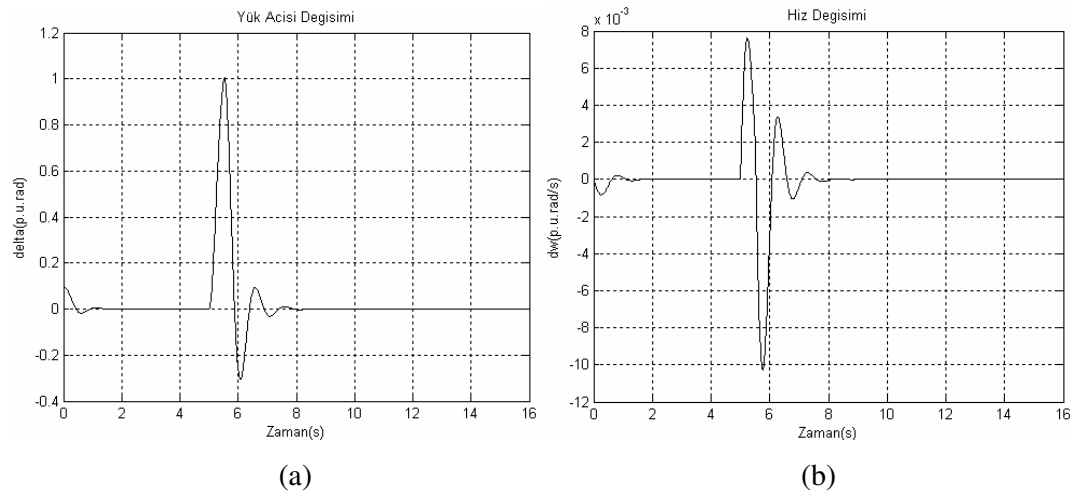
4.5 BPID Denetleyicili SMIB Sistem Simülasyonu

Çizelge 3.2'de verilen çalışma durumlarına ait simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Burada OGR döngüsüne ek denetleyici

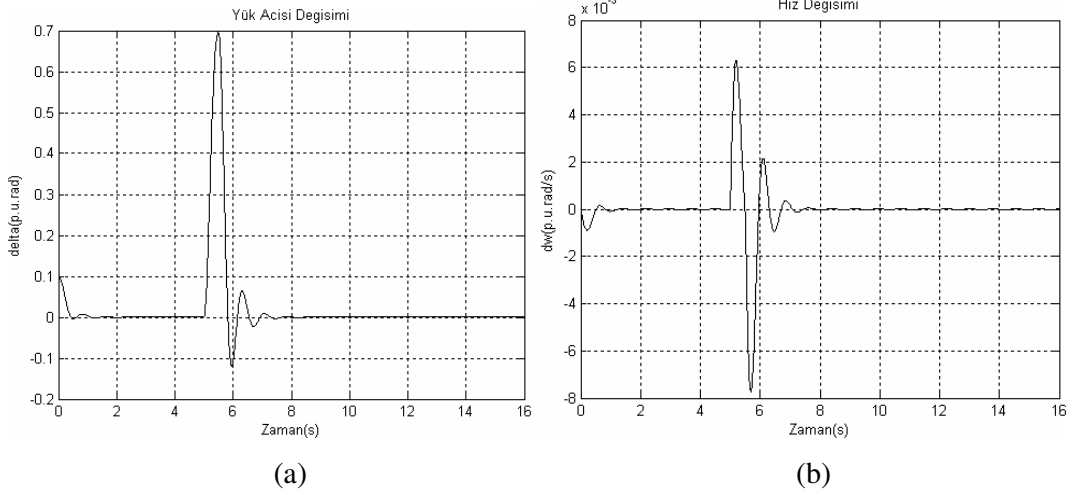
olarak BPID denetleyici kullanılmıştır. 1. çalışma durumu için (Şekil 4.15) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık olarak 1.7s'de, bozucu sinyalden kaynaklanan salınım ise yaklaşık olarak 2.6s'de giderilmiştir. 2. çalışma durumunda (Şekil 4.16) ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık olarak 1.8s'de, bozucu sinyalden kaynaklanan salınım ise yaklaşık olarak 2.9 s'de giderilmiştir. 3. çalışma durumunda (Şekil 4.17) ise ilk rotor açısından kaynaklanan salınım yaklaşık 1.2s'de, bozucu sinyalin girişiyle oluşan salınım ise yaklaşık 2.5s'de söndürülmüştür.



Şekil 4.15 1. çalışma durumuna göre BPID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları



Şekil 4.16 2. çalışma durumuna göre BPID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları



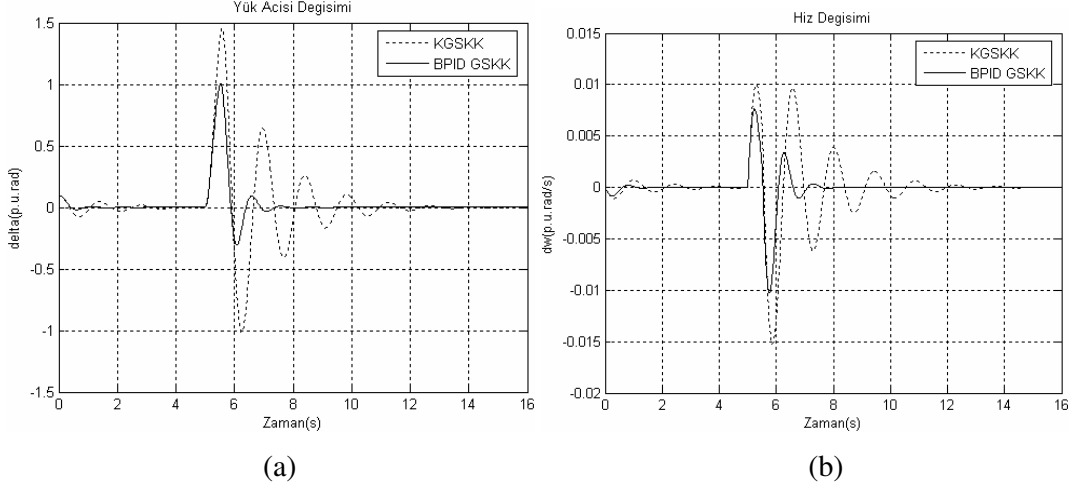
Şekil 4.17 3. çalışma durumuna göre BPID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

BPID denetleyicili SMIB sisteme ait performans indeksleri Çizelge 4.7’de verilmektedir. Bu sonuçlardan anlaşılacağı gibi BPID denetleyicili sistemin tüm çalışma noktalarında kararlı olduğu ve en iyi performansı 3. çalışma noktasında gösterdiği gözlenmiştir.

Çizelge 4.7 BPID denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

Çalışma Durumları	Yük Açısı	Hız
1	42,7147	0,5286
2	64,9002	0,8109
3	39,7199	0,5191

Şekil 4.18’de 2. çalışma durumuna göre KGSKK’lı ve BPID’li SMIB sisteme ait yük açısı değişimi ve hız değişimi simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Bu sonuçlardan BPID’le KGSKK’lı sisteme göre salınım miktarının ve süresinin oldukça azaldığı görülmüştür.



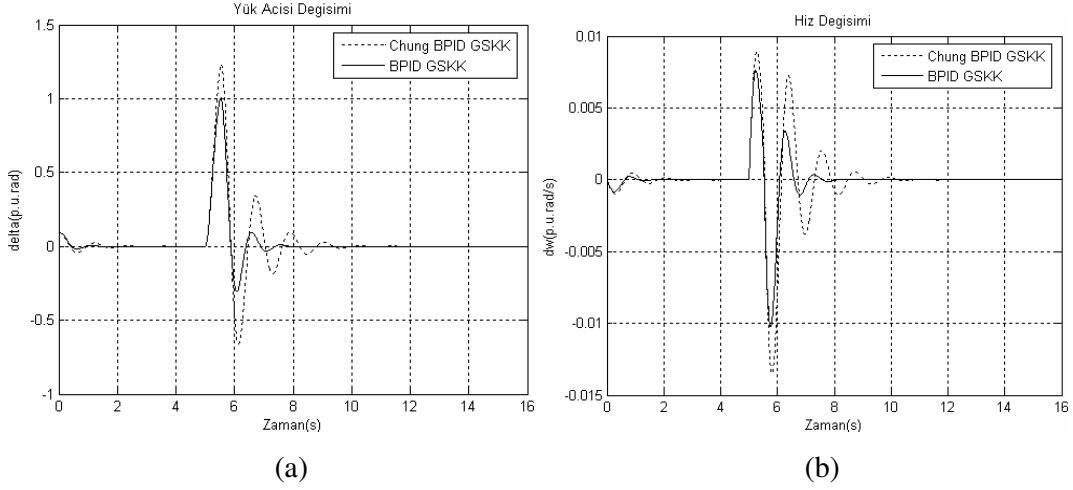
Şekil 4.18 2. çalışma durumuna göre KGSKK'lı ve BPID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

BPID denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri (Çizelge 4.8) karşılaştırıldığında BPID denetleyicili sistemin KGSKK'lı sistemden çok daha iyi performans gösterdiği ve tüm çalışma durumlarında kararlı olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.8 BPID denetleyicili ve KGSKK'lı SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

Çalışma Durumları	Yük Açısı		Hız	
	KGSKK	BPID GSKK	KGSKK	BPID GSKK
1	118,0338	42,7147	1,3529	0,5286
2	209,1853	64,9002	2,3858	0,8109
3	99,5580	39,7199	1,2221	0,5191

Şekil 4.19'da en ağır durum olan 2. çalışma durumuna göre Chung vd.(1999) tarafından gerçekleştirilen 5 üyelik fonksiyonlu ve bu çalışmada gerçekleştirilen 7 üyelik fonksiyonlu BPID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi ve hız değişimi simülasyon sonuçları gösterilmektedir. Sonuçlardan görüldüğü gibi bu çalışmada gerçekleştirilen 7 üyelik fonksiyonlu BPID denetleyiciyle Chung vd.(1999) tarafından gerçekleştirilen BPID denetleyiciden daha iyi olduğu görülmüştür. Çünkü daha fazla üyelik fonksiyonu kullanımı daha fazla nonlinear ilişki kurulmasını sağlamıştır. Bu da denetleyici performansını arttırmıştır.



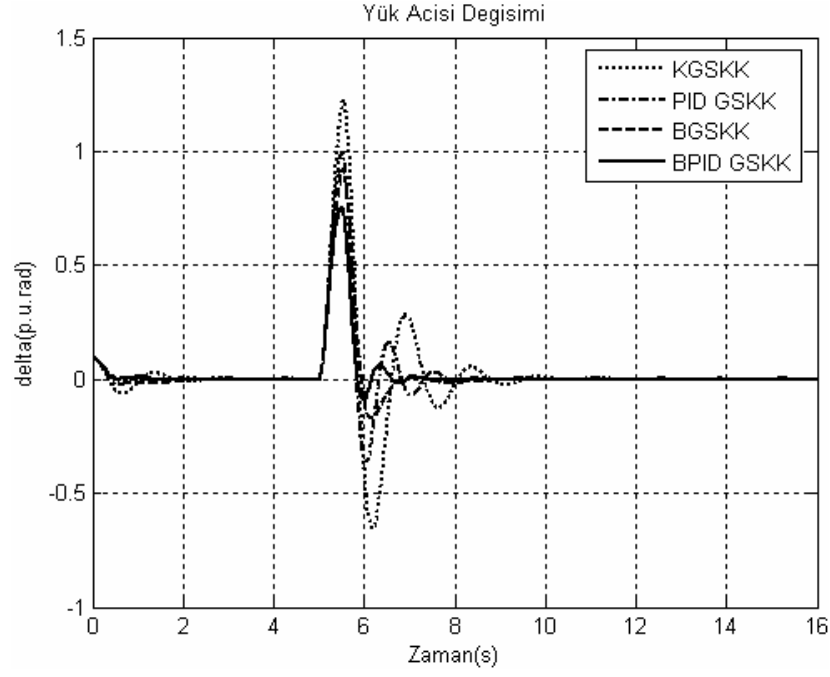
Şekil 4.19 2. çalışma durumuna göre Chung vd.(1999) tarafından gerçekleştirilen ve bu çalışmada gerçekleştirilen BPID denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

Chung vd. (1999) tarafından gerçekleştirilen 5 üyelik fonksiyonlu BPID denetleyici ve bu çalışmada gerçekleştirilen 7 üyelik fonksiyonlu BPID denetleyici ile elde edilen performans indeksleri (Çizelge 4.9) karşılaştırıldığında bu çalışmada gerçekleştirilen BPID denetleyicinin tüm çalışma noktaları için çok daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

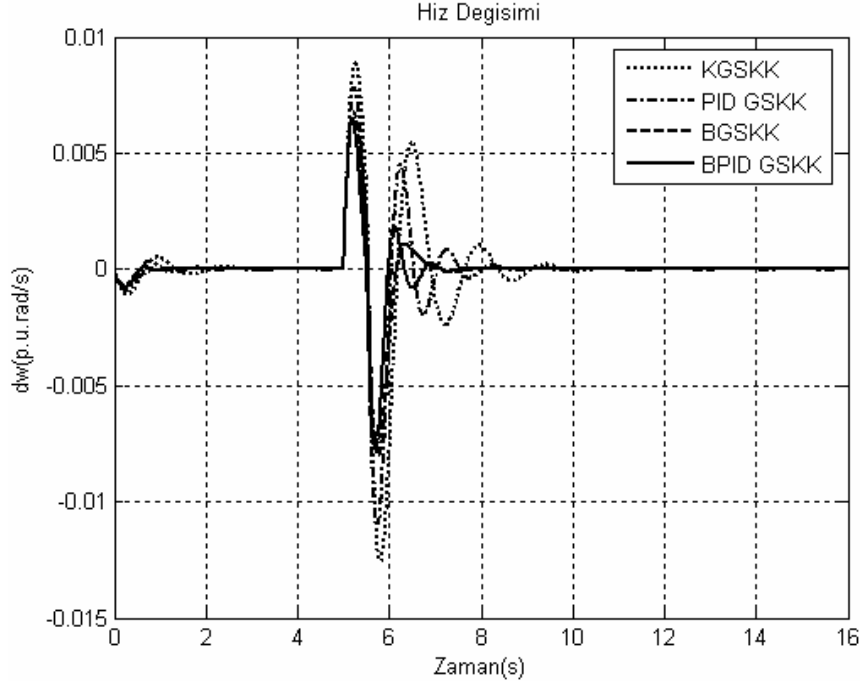
Çizelge 4.9 İki farklı BPID denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

Çalışma Durumları	Yük Açısı		Hız	
	ChungBPID GSKK	BPID GSKK	ChungBPID GSKK	BPID GSKK
1	69,2777	42,7147	0,9275	0,5286
2	115,1955	64,9002	1,4719	0,8109
3	65,3003	39,7199	0,9226	0,5191

4.6 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

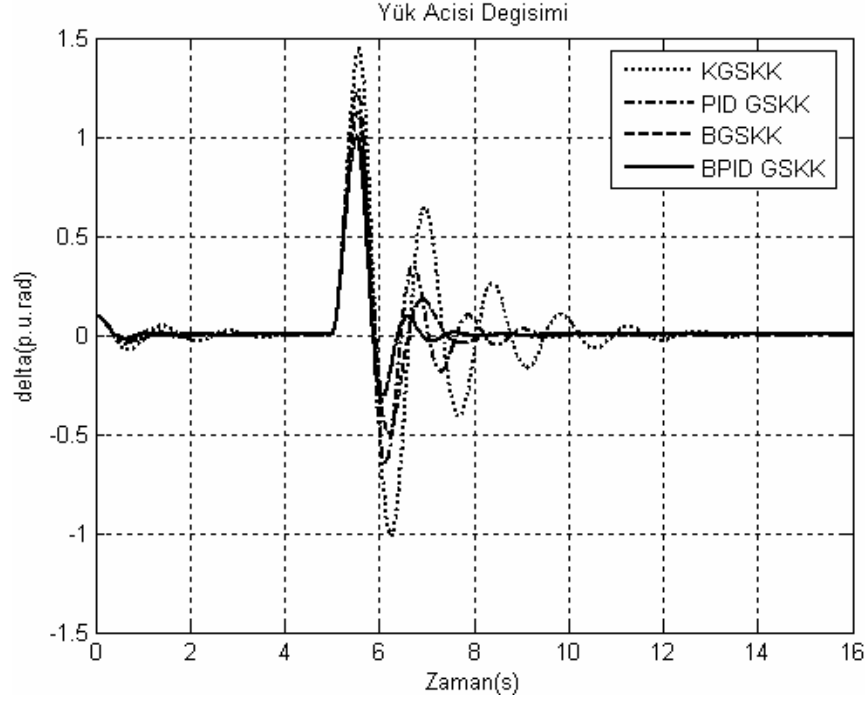


(a)

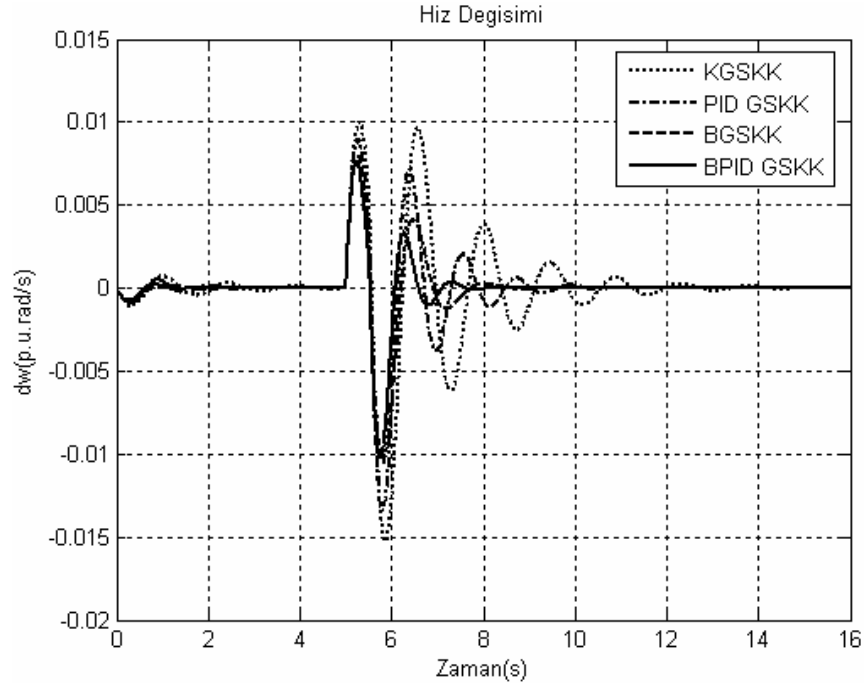


(b)

Şekil 4.20 1. çalışma durumuna göre 4 farklı denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi(a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

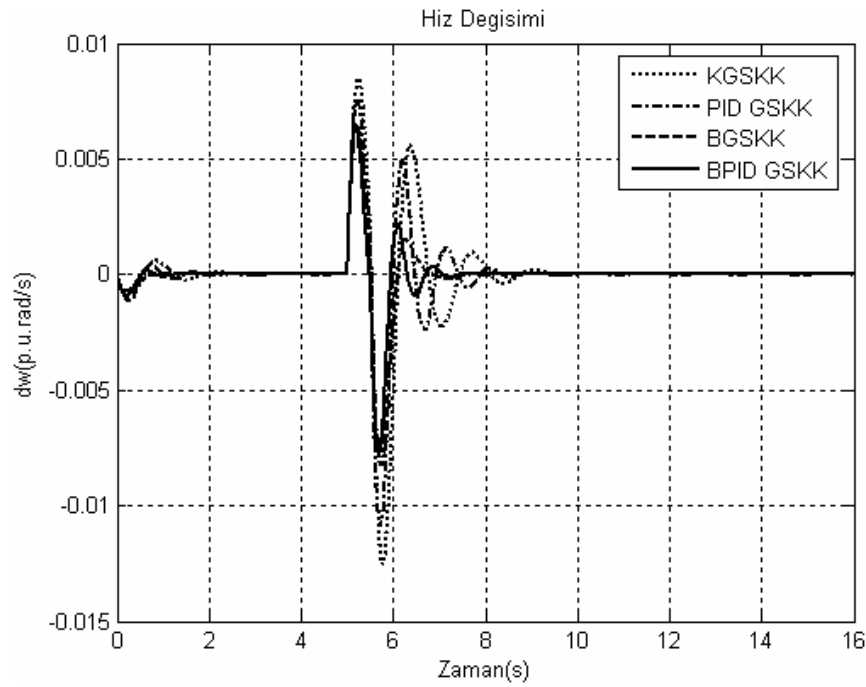
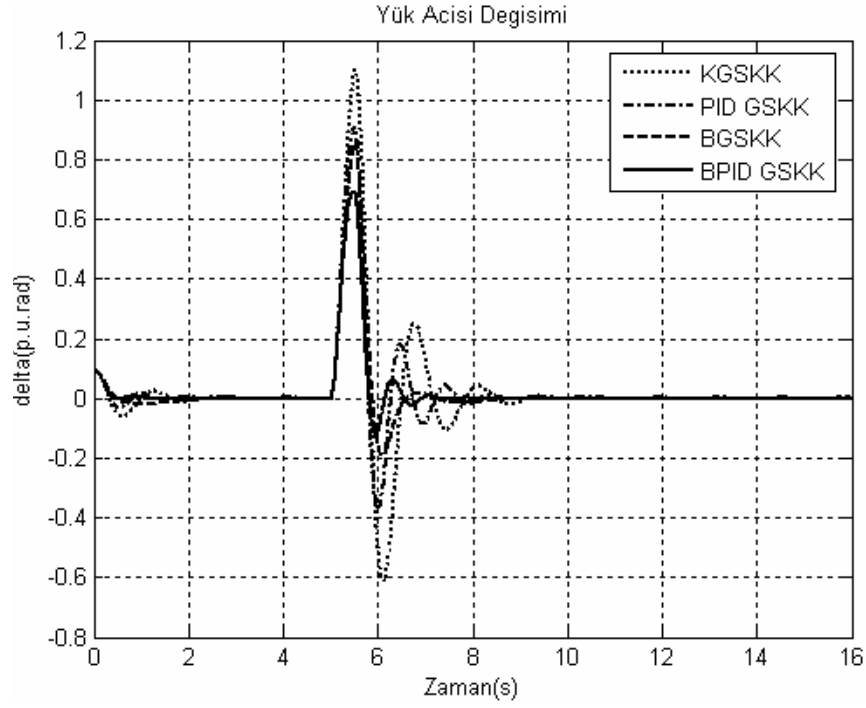


(a)



(b)

Şekil 4.21 2. çalışma durumuna göre 4 farklı denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları



Şekil 4.22 3. çalışma durumuna göre 4 farklı denetleyicili SMIB sisteme ait yük açısı değişimi (a) ve hız değişimi (b) simülasyon sonuçları

KGSKK'lı, PID denetleyicili, BM denetleyicili ve BPID denetleyicili SMIB sistemin Çizelge 3.2'de verilen çalışma durumlarına ait simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Sonuçlardan PID denetleyicinin KGSKK'ya göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. BM denetleyicinin ise KGSKK ve PID denetleyiciye göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Üç yük durumu için de en iyi performans BPID denetleyiciyle elde edilmiştir.

Çizelge 4.10 4 farklı denetleyicili SMIB sistem modeline ait performans indeksleri

Çalışma Durumları	Yük Açısı			
	KGSKK	PID GSKK	BGSKK	BPID GSKK
1	118,0338	70,4689	62,4201	42,7147
2	209,1853	115,9383	95,5168	64,9002
3	99,5580	66,2815	56,4739	39,7199
	Hız			
1	1,3529	0,9278	0,6541	0,5286
2	2,3858	1,4750	1,0580	0,8109
3	1,2221	0,9231	0,6283	0,5191

Tüm çalışma durumları için 4 farklı denetleyicili SMIB sisteme ait performans indeksleri Çizelge 4.10'da gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre tüm çalışma durumlarında en iyi performans bu çalışmada gerçekleştirilen BPID denetleyici ile elde edilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Güç sistemleri yüksek dereceden nonlinear sistemlerdir. Sürekli bozucu etkilerden kaynaklanan düşük frekanslı salınımlara maruz kalmaktadırlar. Enerji üretiminde kullanılan senkron generatörlerin iyi uyartım kontrolü ile bu düşük frekanslı salınımlar söndürülerek tehlikeli boyutlara ulaşması önlenmektedir. İyi bir uyartım kontrolü OGR döngüsüne ek olarak generatör çıkışlarından üretilecek bir kararlı kılıcı sinyalin kontrol döngüsüne geri beslemesi ile olmaktadır. İlave kontrol döngüsü olarak kullanılan denetleyiciler Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı (GSKK) olarak adlandırılmaktadır. KGSKK'lar bir çalışma noktası için tasarlanıp, o çalışma noktasında optimum çalışma sergileyen sabit parametrelili GSKK'lardır. Endüstride yaygın olarak kullanılan PID denetleyicinin ilave kontrol döngüsünde GSKK olarak kullanılması ile KGSKK'dan daha iyi bir performans elde edilmektedir. Ancak PID denetleyicide sabit parametrelili bir denetleyici olduğundan belli bir çalışma aralığında iyi performans göstermektedir. Alternatif kontrol yöntemlerinden BM'nin GSKK olarak kullanılması PID denetleyiciden daha iyi sonuç vermektedir. Sabit parametrelili olmadığından ve nonlinearlik özelliğinden dolayı literatür en çok tercih edilen kontrol yöntemidir. Çalışma aralığı KGSKK ve PID denetleyiciden daha geniştir.

Bu çalışmada BM denetleyici performansını iyileştirmek için BM denetleyici ve PID denetleyici bir arada kullanan BPID denetleyici kontrol döngüsü gerçekleştirilmiştir. Böylece PID denetleyici sabit parametrelili denetleyici olmaktan çıkarılmıştır. Giriş değişkenleri olarak generatör hız bilgisi ve türevi kullanılmıştır. Her giriş değişkeni nonlinear bağıntıları arttırmak, aynı zamanda hesap yükünü çok fazla arttırmamak için 7 adet üyelik fonksiyonuyla tanımlanmıştır. Üç ayrı PID denetleyici katsayısı için üç ayrı BM kural tablosu oluşturulmuştur. Denetleyici çıkış ölçeklendirilmesi PID denetleyici temel alınarak yapılmıştır. Denetleyici performansını değerlendirmek için sisteme bozucu sinyal uygulanmış; yük açısı ve hız sinyalleri gözlenmiş ve sayısal olarak değerlendirilmiştir. Bu sonuçlar KGSKK, PID denetleyici ve BM denetleyici sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve en iyi performansın BPID denetleyici ile elde edildiği görülmüştür. Daha sonraki çalışmalarda kural tablosu ve diğer parametreler GA ve YSA yöntemleri kullanılarak optimize edilirse daha iyi performans elde edilebilir.

6. KAYNAKLAR

Abdelazim, T. Ve Malik, O.P., 2003, “An Adaptive Power System Stabilizer Using On-line Self-Learning Fuzzy Systems”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 13-17 Temmuz, Vol.3, pp.1715-1720.

Abido, M.A. ve Abdel-Magid, Y.L., 1997, “Tuning of a Fuzzy Logic Power System Stabilizer Using Genetic Algorithms”, IEEE International Conference on Evolutionary Computation, 13-16 Nisan, pp.595-599.

Anderson, P.M. ve Fouad, A.A., 1994, “Power System Control and Stability”, IEEE pres, New York.

Ang, K.H., Chong, G., Li, Y., 2005, “PID Control System Analysis, Design and Technology”, IEEE Transactions on Control System Technology, vol.13, pp.559-576.

Arifoğlu, U., 2002, “Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi”, Alfa, İstanbul.

Arrifano, N.S.D., Oliveira, V.A., Ramos, R.A., 2004, “Design and Application Fuzzy PSS for Power Systems Subject to Random Abrupt Variations of the Load”, American Control Conference 30 Haziran- 2 Temmuz, Vol.2, pp.1085-1090.

Ateş, H. ve Peşint, M.A., 1990, “Elektrik Makinalarının Esasları”, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Bandal, V., Bandyopadhyay, B., Kulkarni, A.M., 2005, “Output Feedback Fuzzy Sliding Mode Control Technique Based Power System Stabilizer (PSS) for Single Machine Infinite Bus (SMIB) System”, IEEE International Conference on Industrial Technology, 14-17 Aralık, pp.341-346.

- Bandemer, H. Ve Gottwald, S., 1995, "Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods: with Applications", John Willey&Sons, New York.
- Baykal, N. ve Beyan, T., 2004 "Bulanık Mantık Temel İlkeleri", Bıçaklar Kitabevi, Ankara.
- Bera, P., Das, D., Basu, T.K., 2004, "Design of P-I-D Power System Stabilizer for Multimachine System", IEEE India Annual Conference, 20-22 Aralık, pp.446-450.
- Birdwell, J.D ve Wang, Y., 1994, "Lyapunov Stability Analysis of Systems Using the Fuzzy-PID Controller", American Control Conference, Baltimore, Maryland, 29 Haziran-1 Temmuz, Vol.1, pp.966-970
- Boduroğlu, T., 1988, "Elektrik Makinaları Dersleri", Beta, İstanbul.
- Caner, M., 2006, "Hiyerarşik Fuzzy Yöntemiyle Senkron Generatörlerde Uyarım Kontrolü", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cathey, J.J., 2001, "Electric Machines Analysis and Design Applying Matlab", McGraw-Hill, Boston.
- Chapman, S.J., 2002, "Electric Machinery and Power System Fundamentals", McGraw-Hill, New York.
- Chen, G.P., Malik, O.P., Hope, G.S., Qin, Y.H., Xu, G.Y., 1993, "An Adaptive Power System Stabilizer Based on the Self-Optimizing Pole Shifting Control Strategy", IEEE Transactions on Energy Conversion, Aralık, Vol.8, pp.639-645.

- Chung, H., Lee, J., Joo, S., Chung, D., Kim, S., Chung, M., 1999, "Application of Fuzzy PID Controller for Stabilization of Power System", Fuzzy Systems Conference Proceedings, FUZZ-IEEE, 22-25 Ağustos, Vol.3, pp.1729-1733.
- Costa Jr., C.T., Barreiros, J.A.L., Oliveira, R.C.L., Pedreira, C.T.L., 2001, "Generalized Predictive Power System Stabilizer with Fuzzy Supervision from a Local Model Network", IEEE Porto Power Tech Conference, 10-13 Eylül, Vol.2, pp.4.
- Çiftçi, T., 2006, "Bulanık Karar Mekanizmalarında Hatanın Saptanması", Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 6-8 Kasım, pp.11-15.
- Demirören, A. ve Zeynelgil, L., 2004, "Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması", Birsen, İstanbul.
- Dobrescu, M. ve Kamwa, I., 2004, "A New Fuzzy Logic Power System Stabilizer Performances", IEEE Power Systems Conference and Exposition, 10-13 Ekim, Vol.2, pp.1056-1061.
- Dorf, R.C. ve Bishop, R.H., 1995, "Modern Control Systems", Addison-Wesley Publishing Company, America.
- Elmas, Ç., 2003, "Bulanık Mantık Denetleyiciler", Seçkin, Ankara.
- Elshafei, A.L., El-Metwally, K., Shaltout, A., 2000, "Design and Analysis of a Variable Structure Adaptive Fuzzy-Logic Power System Stabilizer", American Control Conference, 28-30 Haziran, Vol.6, pp.3959-3963.
- Erentürk, K., 2006, "Farklı Tip Bulanık Mantık Denetleyicilerin PMDC Motor Denetimine Etkisi", Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 6-8 Kasım, pp.50-55.

Fitzgerald, A.E., Kingsley, C., Umans, S.D., 2003, "Electric Machinery", McGraw- Hill, 6. edition, Boston, Mau.

Glover, J.D. ve Sarma, M., 1986, "Power System Analysis and Design", PWS-Kent Publishing Company, Boston.

Gupta, R., Bandyopadhyay, B., ve Kulkarni A.M., (2002), "Design of PSS for single machine system using robust fast output sampling feedback technique", Elsevier, Electric Power Systems Research 65, 247_/257.

Gupta, R. ve Bhatia, D., 2006, "Comparison of Robust Fuzzy Logic and Fast Output Sampling Feedback Based Power System Stabilizer for SMIB", IEEE, pp.1031-1036.

Gu, W. ve Bollinger, K.E., 1989, "A Self-Tuning Power System Stabilizer for Wide-Range Synchronous Generator Operation", IEEE Transactions on Power Systems, Ağustos, Vol.4, pp.1191-1199.

Güzelbeyoğlu, N., 1998, "Elektrik Makinaları I,II", İ.T.Ü., İstanbul.

Hariri, A. ve Malik, O.P., 1996, "A Fuzzy Logic Based Power System Stabilizer with Learning ağabeylity", IEEE Transactions on Energy Conversion, Aralık, Vol.11, pp.721-727.

- Hassan, M.A.M. ve Malik, O.P., 1993, "Implementation and Laboratory Test Results for a Fuzzy Logic Based Self-Tuned Power System Stabilizer", IEEE Transactions on Energy Conversion, Haziran, Vol.8, pp.221-228.
- Hiyama, T., 1993, "Application of Neural Network to Real Time Tuning of Fuzzy Logic PSS", Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, pp.421-426.
- Hiyama, T., 1994, "Real Time Control of Micro-Machine System Using Micro-Computer Based Fuzzy Logic Power System Stabilizer", IEEE Transactions on Energy Conversion, Aralık, Vol.9, pp.724-731.
- Hiyama, T. ve Kugimiya, M., 1994, "Advanced PID Type Fuzzy Logic Power System Stabilizer", IEEE Transactions on Energy Conversion, Eylül, Vol.9, pp.514-520.
- Hiyama, T., Oniki, S., Nagashima, H., 1993, "Experimental Studies on Micro-Computer Based Fuzzy Logic Power System Stabilizer", Proceedings of the Second International Forum on Applications of Neural Networks to Power Systems, pp.212-217.
- Hosseinzadeh, N., Kalam, A., 1998, "On-line Tuning of a Fuzzy Power System Stabiliser", Energy Management and Power Delivery International Conference, 3-5 Mart, pp.13-18.
- Hosseinzadeh, N. ve Kalam, A., 1999, "A Rule-Based Fuzzy Power System Stabilizer Tuned by a Neural Network", IEEE Transactions on Energy Conversion, Eylül, Vol.14, pp.773-779.
- İbrahim, A.M., 2004, "Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications", Amsterdam, Boston, Mass.

IEEE Standart 421.4-1990, IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications.

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

Jantzen, J., 1998, "Tuning of Fuzzy PID Controllers", Technical University of Denmark, 30 Eylül, Tech. Report No. 98-H 871.

Karaköse, M., 2006, "Ayrık Kural Tabanlı Dinamik Bulanık Kontrol Algoritması", Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 6-8 Kasım, pp.7-10.

Karanfil, S., 1997, "Fuzzy Lojik Problemlerinde Üyelik Fonksiyonunun Belirlenmesinde Deneysel Verilere Dayanarak Bir Yöntem Geliştirilmesi", Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Kızır, S. ve Ertunç, H.M., 2006, "Mikro Kontrolör Tabanlı PID Kontrol Sistemi Eğitim Seti", Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 6-8 Kasım, pp.474-479.

Knospe, C., 2006, "PID Control", IEEE Control System Magazine, Vol. 26, pp.30-31.

Kundur, P., 1993, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York.

Machowski, J., Bialek, J.W., Bumby, J.R., 1997, "Power System Dynamics and Stability", John Willey&Sons, West Sussex, England.

Majid, M.S., Rahma, H.A., Jais, O.B., 2002, "Study of Fuzzy Logic Power System Stabilizer", Student Conference on Research and Development Proceedings, Shah Alam, Malaaysia, 16-17 Temmuz, pp.335-339.

- Mann, G.K.I., Hu, B.G., Gosine, R.G., 1999, "Analysis of Direct Action Fuzzy PID Controller Structures", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B, Haziran, Vol.29, pp.371-388.
- Mao, C.X., Prakash, K.S., Malik, O.P., Hope, G.S., Fan, J., 1990, "Implement Laboratory Test Results for an Adaptive Power System Stabilizer Based on Linear Optimal Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Aralık, Vol.5, pp.666-672.
- Moodley, G.V., Jennings, G.D., Harley, R.G., Wishart, M.T., 1996, "Fuzzy Logic Power System Stabilizer in Multimachine Stability Studies", IEEE Africon 4th, 24-27 September, Vol.2, pp. 843-848.
- Ong, C.M., 1997, "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice-Hall, New Jersey.
- Oonsivilai, A., El-Hawary, M.E., 1998, "A Self-organizing Fuzzy Power System Stabilizer", Electrical and Computer Engineering Canadian Conference, 24-28 Mayıs, Vol.1, pp.197.
- Özarlan, M. ve Bay, Ö.F., 2006, "Gunt Rt 512 Sıvı Seviye Denetim Cihazının Bulanık Mantık Denetleyicisi ile Denetimi", Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 6-8 Kasım, pp.56-61.
- Pahalawaththa, N.C. ve Annakkage, U.D., 1991, "An Optimum Gain Scheduling Power System Stabilizer", International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 5-8 Kasım, Vol.1, pp.211-216.
- Park, Y.M. ve Lee, K.Y., 1996, "A Self-Organizing Power System Stabilizer Using Fuzzy Auto-Regressive Moving Average (FARMA) Model", IEEE Transactions on Energy Conversion, Haziran, Vol.11, pp.442-448.

- Peşint, M.A., 2004, “Elektrik Makinaları IV- Senkron Makinalar ve Alternatif Akımın Doğrultulması”, MEB, 14. baskı, Ankara.
- Qin, S.J., 1994, “Auto-Tuned Fuzzy Logic Control”, American Control Conference Baltimore, Maryland, 29 Haziran-1 Temmuz, Vol.3, pp.2465-2469.
- Ramdan, G. ve Smaili, Y., 1988, “Performance Evaluation of PID Power System Stabilizer for Synchronous Generator”, Southeastcon’88, IEEE Conference, 11-13 Nisan, pp.597-601.
- Rashidi, F., Rashidi, M., Amiri, H., 2003, “An Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for Power System Stabilizer”, 29th Annual Conference of the IEEE, Industrial Electronics Society, 2-6 Kasım, Vol.1, pp.626-630.
- Reza, M.A. ve Choudhry, M.A., 1990, “Design of a Robust Power System Stabilizer Over a Wide Range of Load Characteristics”, Power Symposium, Proceedings of the Twenty-Second Annual North American, 15-16 Ekim, pp.8-13
- Rogers, G., 2000, “Power System Oscillations”, Kluwer Academic, Boston.
- Saadat, H., 2002, “Power System Analysis”, McGraw Hill, 2.edition, Boston.
- Salam, M.A., 2005, “Fundamentals of Electrical Machines”, Alpha Science, Oxford.
- Sarioğlu, M.K., 1987, “Elektrik Makinalarının Temelleri II–Senkron Makinalar”, İTÜ, 3. baskı, İstanbul.
- Shi, J., Herron, L.H., Kalam, A., 1992, “A Fuzzy Logic Controller Applied to Power System Stabilizer for a Synchronous Machine Power System”, International Conference, Technology Enabling Tomorrow: Computers, Communications and Automation Towards the 21st Century, 11-13 Kasım, Vol.1, pp.346-350.

- Sumina, D., Idzotic, T., Erceg, G., 2006, "The Appliace of the Estimated Load Angle in the Fuzzy Power System Stabilizer", Electrotechnical Conference, Melecon, IEEE Mediterranean, 16-19 Mayıs, pp.1020-1023.
- Şen, Z., 2001, "Bulanık Mantık ve Modelleme İlkeleri", Bilge Kültür Sanat, İstanbul.
- Tacer, M.E., 1990, 'Enerji Sistemlerinde Kararlılık', İ.T.Ü., İstanbul.
- Wildi, T., 2002, "Electrical Machines, Drives, and Power Systems" , Prentice Hall, 5. edition, Ohio.
- Yadıpour, R., 1989, "Representation of IEEE AVR Models for Transient Stability Studies", Mater Thesis, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Ankara.
- 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, pp.512-522.
- You, R., Eghbali, H.J., Nehrir, M.H., 2003, "An Online Adaptive Neuro-Fuzzy Power System Stabilizer for Multimachine Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Şubat, Vol.18, pp.128-135.
- Yüksel, İ., 2006, "Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri", Nobel, 5. baskı, Ankara.
- Zhang, Y., Chen, G.P., Malik, O.P., Hope, G.S., 1993, "An Artificial Neural Network Based Adaptive Power System Stabilizer", IEEE Transactions on Energy Conversion, Mart, Vol.8, pp.71-77.

6.1 İnternet Kaynakları

1- <http://coursemain.ee.ukzn.ac.za/enel4ssh2/index.asp?Code=ENEL4SSH2>
(05.09.2006)

2- <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/PID/PID.html> (15.08.06)

3- http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy.pdf
(17.12.2007)

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Seçil VARBAK NEŞE

Doğum Yeri : Kadıköy

Doğum Tarihi : 28.08.1982

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : S.T.F.A. Anadolu Meslek Lisesi , 2000

Lisans : Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, 2004

Yüksek Lisans

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl aralığı

AKÜ Teknik Eğitim 2005

Fakültesi

8. EKLER

EK-1 Çalışmada kullanılan gskk adlı yazılım

```
%%PROGRAM%%
```

```
% Hafızadaki değişkenlerin ve çalışma ekranının temizlenmesi
```

```
clear all;
```

```
close all;
```

```
bdclose all; set_param(0, 'CharacterEncoding', 'ISO-8859-1');
```

```
clc
```

```
%-----
```

```
% Sistem parametrelerinin girilmesi
```

```
%Sistem=[ D f M Tdo Ka Ta T T1 T2 Kc ]
```

```
sistem=[ 0 60 9.26 7.76 50 0.05 3.0 0.685 0.1 7.09 ];
```

```
%-----
```

```
% Çalışma durumlarına göre K katsayılarının girilmesi
```

```
durum =
```

```
% P Q K1 K2 K3 K4 K5 K6
```

```
1 1.0 0.015 0.5423 1.2068 0.6584 0.6982 -0.0955 0.8159
```

```
2 0.7 0.4 0.4739 0.8359 0.6584 0.6982 -0.1272 0.8598
```

```
3 1.3 0.8 0.6313 1.2105 0.6584 0.6982 -0.1004 0.8239];
```

```
%-----
```

```
% Hangi çalışma noktasında simülasyon yapılacağını belirlenmesi
```

```
ddegeri=input('Çalışma durumunuz :')  
durum=durum(ddegeri,:);
```

```
%-----
```

```
% Aynı anda çalışacak denetleyici sayısının belirlenmesi
```

```
dsayisi=input('1,2,4 olmak üzere Aynı anda çalışacak denetleyici sayısı sayisi:')
```

```
%-----
```

```
% Simülasyon süresinin belirlenmesi
```

```
bzamani=0;  
btzamani=16;
```

```
%-----
```

```
% İlk rotor açısının belirlenmesi
```

```
bdegeri=0.1;
```

```
%-----
```

```
% Sisteme bozulma uygulanması
```

```
genlik=0.5;  
periyot=20;  
sure=2.5;  
gecikme=5;
```

```
%-----
```

```
%Sistem parametrelerinin okutulması
```

```
D=sistem(1);
```

```
f=sistem(2);
```

```
M=sistem(3);
```

```
Tdo=sistem(4);
```

```
Ka=sistem(5);
```

```
Ta=sistem(6);
```

```
T=sistem(7);
```

```
T1=sistem(8);
```

```
T2=sistem(9);
```

```
%-----
```

```
%Seçilen çalışma durumuna göre k katsayılarının okutulması
```

```
K1=durum(1,4);
```

```
K2=durum(1,5);
```

```
K3=durum(1,6);
```

```
K4=durum(1,7);
```

```
K5=durum(1,8);
```

```
K6=durum(1,9);
```

```
%-----
```

```
%Çalışacak denetleyici çeşidinin belirlenmesi
```

```
if dsayisi==1
```

```
    dcesidi=input('1:GSKKsız,2:KGSKK,3:PID   GSKK,4:BGSKK,5:BPID   GSKK,
```

```
D.Çesidi:')
```

```
else if dsayisi==2
```

```
dcesidi=input('6:KGSKK+PID GSKK, 7:KGSKK+BGSKK, 8:KGSKK+BPID  
GSKK, D.Çesidi:')
```

```
else dsayisi==4
```

```
    dcesidi=input('9:KGSKK+PID GSKK+BGSKK+BPID GSKK, D.Çesidi:')  
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
%-----
```

```
%Seçilen denetleyiciye göre simülasyonun yaptırılması
```

```
if dcesidi==1
```

```
    Kc=0
```

```
    sim('chunggskk')
```

```
    figure(1)
```

```
    plot(time,yukacisi,'k')
```

```
    title('Yük Acisi Degisimi')
```

```
    xlabel('Zaman(s)')
```

```
    ylabel('delta(p.u.rad)')
```

```
    axis([0 16 -5 5])
```

```
    grid on
```

```
    figure(2)
```

```
    plot(time,w,'k')
```

```
    title('Hiz Degisimi')
```

```
    xlabel('Zaman(s)')
```

```
    ylabel('dw(p.u.rad/s)')
```

```
    axis([0 16 -0.06 0.06])
```

```
    grid on
```

```
A=sum(abs(yukacisi));  
B=sum(abs(w));  
z=[A B]
```

```
else if dcesidi==2
```

```
Kc=sistem(10)  
sim('chunggskk')
```

```
figure(1)  
plot(time,yukacisi,'k')  
title('Yük Acisi Degisimi')  
xlabel('Zaman(s)')  
ylabel('delta(p.u.rad)')  
grid on
```

```
figure(2)  
plot(time,w,'k')  
title('Hiz Degisimi')  
xlabel('Zaman(s)')  
ylabel('dw(p.u.rad/s)')  
grid on
```

```
A=sum(abs(yukacisi));  
B=sum(abs(w));  
z=[A B]
```

```
else if dcesidi==3
```

```
Kp=30;Ki=1.569;Kd=2.159;
```

```
sim('PID')
```

```
figure(1)  
plot(time,yukacisi,'k')  
title('Yük Acisi Degisimi')  
xlabel('Zaman(s)')  
ylabel('delta(p.u.rad)')  
grid on
```

```
figure(2)  
plot(time,w,'k')  
title('Hiz Degisimi')  
xlabel('Zaman(s)')  
ylabel('dw(p.u.rad/s)')  
grid on
```

```
A=sum(abs(yukacisi));  
B=sum(abs(w));  
z=[A B]
```

```
else if dcesidi==4
```

```
    fis=readfis('abdelazim');  
    sim('bm')
```

```
    figure(1)  
    plot(time,yukacisi,'k')  
    title('Yük Acisi Degisimi')  
    xlabel('Zaman(s)')  
    ylabel('delta(p.u.rad)')  
    grid on
```

```
figure(2)
plot(time,w,'k')
title('Hiz Degisimi')
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('dw(p.u.rad/s)')
grid on
```

```
A=sum(abs(yukacisi));
B=sum(abs(w));
z=[A B]
```

```
else if dcesidi==5
```

```
    fis=readfis('kpd');
    fis1=readfis('kid');
    fis2=readfis('kpd');
    sim('bpid')
```

```
figure(1)
plot(time,yukacisi,'k')
title('Yük Acisi Degisimi')
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('delta(p.u.rad)')
grid on
```

```
figure(2)
plot(time,w,'k')
title('Hiz Degisimi')
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('dw(p.u.rad/s)')
grid on
```



```
A=sum(abs(yukacisi));  
B=sum(abs(w));  
z=[A B]
```

```
else if dcesidi==6
```

```
Kc=sistem(10)  
sim('chunggskk')
```

```
figure(1)  
plot(time,yukacisi,'k--')  
title('Yük Acisi Degisimi')  
xlabel('Zaman(s)')  
ylabel('delta(p.u.rad)')  
hold on  
grid on
```

```
figure(2)  
plot(time,w,'k--')  
title('Hiz Degisimi')  
xlabel('Zaman(s)')  
ylabel('dw(p.u.rad/s)')  
hold on  
grid on
```

```
A=sum(abs(yukacisi));  
B=sum(abs(w));
```

```
Kp=30;Ki=1.569;Kd=2.159;  
sim('PID')
```

```
figure(1)
plot(time,yukacisi,'k')
legend('KGSKK','PID GSKK')
```

```
figure(2)
plot(time,w,'k')
legend('KGSKK','PID GSKK')
```

```
A1=sum(abs(yukacisi));
B1=sum(abs(w));
z=[A B;A1 B1]
```

```
else if dcesidi==7
```

```
Kc=sistem(10)
sim('chunggskk')
```

```
figure(1)
plot(time,yukacisi,'k--')
title('Yük Acisi Degisimi')
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('delta(p.u.rad)')
hold on
grid on
```

```
figure(2)
plot(time,w,'k--')
title('Hiz Degisimi')
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('dw(p.u.rad/s)')
```

```
hold on
grid on
```

```
A=sum(abs(yukacisi));
B=sum(abs(w));
```

```
fis=readfis('abdelazim');
sim('bm')
```

```
figure(1)
plot(time,yukacisi,'k')
legend('KGSKK','BGSKK')
```

```
figure(2)
plot(time,w,'k')
legend('KGSKK','BGSKK')
```

```
A1=sum(abs(yukacisi));
B1=sum(abs(w));
z=[A B;A1 B1]
```

```
else if dcesidi==8
```

```
Kc=sistem(10)
sim('chunggskk')
```

```
figure(1)
plot(time,yukacisi,'k--')
title('Yük Acisi Degisimi')
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('delta(p.u.rad)')
```

```

hold on
grid on

figure(2)
plot(time,w,'k--')
title('Hiz Degisimi')
xlabel('Zaman(s)')
ylabel('dw(p.u.rad/s)')
hold on
grid on

A=sum(abs(yukacisi));
B=sum(abs(w));

fis=readfis('kpd');
fis1=readfis('kid');
fis2=readfis('kpd');

sim('bpid')

figure(1)
plot(time,yukacisi,'k')
legend('KGSKK', 'BPID GSKK')

figure(2)
plot(time,w,'k')
legend('KGSKK', 'BPID GSKK')

A1=sum(abs(yukacisi));
B1=sum(abs(w));
z=[A B; A1 B1]

```

```

else if dcesidi==9

    Kc=sistem(10)
    sim('chunggskk')

    figure(1)
    plot(time,yukacisi,'k--')
    title('Yük Acisi Degisimi')
    xlabel('Zaman(s)')
    ylabel('delta(p.u.rad)')
    grid on
    hold on

    figure(2)
    plot(time,w,'k--')
    title('Hiz Degisimi')
    xlabel('Zaman(s)')
    ylabel('dw(p.u.rad/s)')
    grid on
    hold on

    A=sum(abs(yukacisi));
    B=sum(abs(w));

    Kp=30;Ki=1.569;Kd=2.159;
    sim('PID')

    figure(1)
    plot(time,yukacisi,'k-.')
    hold on

```

```
figure(2)
plot(time,w,'k-')
hold on
```

```
A1=sum(abs(yukacisi));
B1=sum(abs(w));
```

```
fis=readfis('abdelazim');
sim('bm')
```

```
figure(1)
plot(time,yukacisi,'k--')
hold on
```

```
figure(2)
plot(time,w,'k--')
hold on
```

```
A2=sum(abs(yukacisi));
B2=sum(abs(w));
```

```
fis=readfis('kpd');
fis1=readfis('kid');
fis2=readfis('kpd');
sim('bpid')
```

```
figure(1)
plot(time,yukacisi,'k')
hold on
legend('KGSKK','PID GSKK','BGSKK','BPID GSKK')
figure(2)
plot(time,w,'k')
```

```
hold on
legend('KGSKK','PID GSKK','BGSKK','BPID GSKK')

A3=sum(abs(yukacisi));
B3=sum(abs(w));
z=[A B; A1 B1; A2 B2; A3 B3]
end
end
end
end
end
end
end
end
end
```