

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GERİLİM KARARLILIĞI İYİLEŞTİRİCİLERİNİN
AKILLI ALGORİTMA TABANLI KAYAN KIPLI
KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Elk.-Elktr. Y. Müh. Ercan KÖSE

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Saadettin AKSOY

Eylül 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GERİLİM KARARLILIĞI İYİLEŞTİRİCİLERİNİN
AKILLI ALGORİTMA TABANLI KAYAN KIPLI
KONTROLÜ

DOKTORA TEZİ

Elk.-Elktr. Y. Müh. Ercan KÖSE

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 11 / 09 / 2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

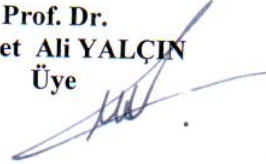
Prof. Dr.
Saadettin AKSOY
Jüri Başkanı



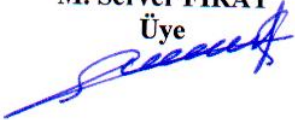
Prof. Dr.
Bekir ÇAKIR
Üye



Prof. Dr.
Mehmet Ali YALÇIN
Üye



Yrd. Doç. Dr.
M. Server FIRAT
Üye



Prof. Dr.
Nurettin ABUT
Üye



TEŞEKKÜR

Tez süresince manevi desteğini benden esirgemeyen eőim Nilüfer'e, akademik araőtırmalarımnda beni yönlendiren Prof.Dr. Saadettin AKSOY hocama, tez izleme sınavlarında tez kapsamında yeni araőtırma fikirleri veren Prof. Dr. M. Ali YALÇIN, Yrd. Doç. Dr. M. Server FIRAT, Yrd. Doç . Dr. Kadir ABACI hocalarıma, tez çalışmamda bana katkı sağlayan Yrd. Doç. Dr. Aydın MÜHÜRÇÜ, Arő. Gör. Hakan KIZMAZ, Öğr. Gör. Deniz ÜSTÜN'e ve tez çalışmamda mali destek sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri (BAP) Başkanlığına teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Daha Önce Yapılmış Çalışmalar.....	2
1.2. Tezin Kapsamı.....	8
BÖLÜM 2.	
FACTS CİHAZLARI.....	10
2.1. SVC (Static Var compensators).....	10
2.1.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)	12
2.1.2. Tristör Anahtarlı Kapasitör (TSC).....	13
2.1.3. SVC Sisteminin Karakteristiği	14
2.3.4. Gerilim Kontrolü İçin SVC Denetim Modeli.....	16
BÖLÜM 3.	
PID KONTROLÖR VE DOĞRUSALLAŞTIRMA.....	17
3.1. Kontrolör Yapıları.....	17
3.1.1. Açık Çevrim Kontrol.....	17
3.1.2. Kapalı Çevrim Kontrol.....	18

3.2. PID Kontrolör.....	18
3.2.1. Nichols -Ziegler Frekans Yanıtı Yöntemi.....	19
3.3. Taylor Serisi Açılımı ile Doğrusallaştırma.....	20
3.4. Test Sistemi.....	21
3.5. SVC’li Güç Sisteminin (Test Sisteminin) Karakteristiği.....	23
3.6. SVC’li Güç Sisteminin Doğrusallaştırması.....	24
3.7. Benzetim Çalışmaları	25
3.8. PID Kontrolör Tasarımı.....	33
3.8.1. Ziegler-Nichols Yöntemi İle PID Kontrolör Tasarımı.....	34
3.8.2. SVC’li Güç Sisteminin PID Tabanlı Kontrolü.....	36
(a) Düşük Talep Güçlerinde PID Tabanlı Kontrol.....	36
(b) Yüksek Talep Güçlerinde PID Tabanlı Kontrol.....	38
(c) Farklı Bir Referans Gerilimi İçin PID Tabanlı Kontrol.....	39

BÖLÜM 4.

KUTUP YERLEŞTİRME	41
4.1. Kutup Yerleştirme Yöntemleri.....	41
4.1.1. Klasik Çözüm Yöntemi.....	43
4.1.2. Bass ve Gura Çözüm Yöntemi.....	43
4.1.3. Ackermann Çözüm Yöntemi.....	44
4.2. Kendinden Ayarlamasız Kutup Yerleştirme	45
4.3. Kendinden Ayarlamalı Kutup Yerleştirme.....	46
4.4. SVC’li Güç Sisteminin Kutup Yerleştirme Tabanlı Kontrolü.....	46
4.4.1. Kendinden Ayarlamalı Kutup Yerleştirme Tekniği ile Kontrolü.....	46
4.4.2. Kendinden Ayarlamalı YSA (Yapay Sinir Ağı) Tabanlı Kutup Yerleştirme Tekniği ile Kontrol.....	51
4.5. Kendinden Ayarlamalı Kapalı Çevrim SVC’li Güç Sistemi Benzetimi	55

BÖLÜM 5.

KAYAN KİPLİ KONTROL	60
5.1. Faz Uzayı.....	60
5.2. Kayan Kipli Kontrol	63
5.2.1. Kayan kipli kontrole ilişkin temel kavramlar.....	64

5.2.1.1. Erişme Evresi	64
5.2.1.2. Kayma Evresi.....	65
5.2.1.3. Anahtarlama yüzeyi	66
5.2.1.4. Kayma yüzeyine erişim koşulları.....	66
Doğrudan anahtarlama fonksiyonu yaklaşımı.....	66
Erişim kuralı yaklaşımı.....	66
Lyapunov Kararlılığı	67
5.2.2. Kontrol kuralı.....	68
Doğrusal kontrol kuralı.....	68
Doğrusal olmayan kontrol kuralı.....	69
5.3. SVC’li Güç Sisteminin (Test Sisteminin) Kayan Kipli Kontrol Yöntemiyle Denetimi.....	71
5.3.1. Kararlılık Analizi.....	73
5.4. Benzetim Sonuçları.....	75
5.5. Genetik Algoritma	79
5.6. Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Benzetim Sonuçları.....	82
5.7. Kayan Kipli Kontrol Yönteminin SVC’li N-Baralı Sisteme Uygulanması.....	94
5.7.1. İki Kapılı Şebekenin İncelenmesi.....	94
5.7.2. WSCC (Western System Coordinating Council) Dokuz Baralı Sistem.....	96
N-Baralı Güç Sistemi İçin Genetik Algoritma Tabanlı Benzetim Sonuçları.....	101
5.7.3. Üç Makineli Dokuz Baralı WSCC Sistemi Simulink Yapısı	104
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	115
6.1. Sonuçlar.....	115
6.2. Öneriler.....	119
KAYNAKLAR.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	129

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	: Tetikleme açısı
σ	: İletim açısı
n	: Kontrolsüz sistemin derecesi
λ	: Reel sayılar kümesinde pozitif bir sabittir
ρ	: Reel sayılar kümesinde pozitif bir sabittir
δ_1	: Generatör bara gerilimi açısı
δ_2	: Yük bara gerilim açısı
τ	: Zaman sabiti
$B(\alpha)$: Tetikleme açısının fonksiyonu olarak etkin suseptans değeri
B_{svc}	: SVC'nin eşdeğer suseptansı
B_C	: İletim hattının toplam sönt kapasitesi
B_L	: İletim hattının toplam sönt endüktansı
C	: Kapasitans
D_G	: Generatör sönümlenme sabiti
E_{th}	: Thevenin eşdeğer gerilimi
F_x	: $n \times n$ boyutlu Jakobyen matrisi
F_u	: $n \times m$ boyutlu Jakobyen matrisi
H_x	: $r \times n$ boyutlu Jakobyen matrisi
H_u	: $r \times m$ boyutlu Jakobyen matrisi
I_{svc}	: SVC'nin reaktif akımı
I_S	: Norton eşdeğer akımı
I_1	: Efektif akım
J	: Jacobian matrisi
$J(.)$: Maliyet fonksiyonu

k	: Talep güç katsayısı
k	: Durum geri besleme kazanç matrisi
K	: P ile Q arasındaki yüklenme profili
K_P	: PID orantı katsayısı
K_I	: PID entegral katsayısı
K_d	: PID türev katsayısı
K_C	: Salınımsal kazanç
L	: Endüktans
M	: Generatörün eylemsizlik sabiti
P_d	: Sürekli halde talep edilen aktif güç
P_G	: Generatörün elektriksel çıkış gücü
P_M	: Generatör için mekanik giriş gücü
R	: Hattın direnci
Q_d	: Yük barasındaki reaktif güç
Q_G	: Generatör barasındaki reaktif güç
X	: Hattın reaktansı
X	: Durum vektörü
X_L	: Temel frekanstaki reaktörün reaktansı
X_{th}	: Thevenin eşdeğer reaktansı
T_C	: Salınım periyodu
V	: Efektif gerilim
V_0	: Yük barası geriliminin başlangıç değeri
V_1	: Generatör bara gerilimi
V_2	: Yük bara gerilimi
$G(s)$: Transfer fonksiyonu
$u(t)$: Kontrol işareti
$e(t)$: Hata ve kalıcı durum hatası
$g(x)$: Doğrusal aktivizasyon fonksiyonu

$r(t)$: Referans sinyali
$s(x)$: Kayma yüzeyi
$y(t)$: Çıkış sinyali
$\alpha(s)$: Amaçlanan polinom
$a_k(s)$: Karakteristik polinom
I	: Birim matris
Q_c	: Durum denetlenebilirlik matrisi
T	: Alt üçgen toeplitz matrisi
iw	: Giriş katman ağırlığı
b	: Bias
M_p	: Yüzdesel maksimum sıçrama
r_s	: Yükselme zamanı
s_t	: Durulma zamanı
η	: Alt dizi sayısı
FACTS	: Flexible Alternatif Current Transmission Systems (Esnek Alternatif Akım iletim Sistemleri)
FFT	: Hızlı fourier transformu
IEEE	: International Electrical Electronics Committee (Uluslararası Elektrik Elektronik Komitesi)
PWM	: Darbe Genlik Modülasyonu
SVC	: Static Var Compensator (Statik Var Kompansatör)
TCR	: Thyristor Controlled Reactors (Tristör Kontrollü Reaktör)
TCSC	: Thyristor Controlled Series Capacitors (Tristör Kontrollü Seri Kapasitör)
SMC	: Kayan Kipli Kontrol (Sliding Mode Control)
GA	: Genetik Algoritma
YSA	: Yapay Sinir Ağı
GASMC	: Genetik Algoritma Tabanlı Kayan Kipli Kontrol
PSAT	: Power System Analysis Toolbox

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	SVC temel modeli.....	11
Şekil 2.2.	Thevenin eşdeğer devresi ve gerilim-reaktif akım karakteristiği...	12
Şekil 2.3.	TKR V/I karakteristiği.....	13
Şekil 2.4.	TSC V/I karakteristiği.....	14
Şekil 2.5.	Basit bir SVC modeli.....	14
Şekil 2.6.	Belli sistem koşulları için, SVC çalışma noktasının grafik çözümü.....	15
Şekil 2.7.	SVC'nin Kontrol Modeli.....	16
Şekil 3.1.	Açık çevrim kontrol sistemine ilişkin blok gösterimi.....	17
Şekil 3.2.	Kapalı çevrim kontrol sistemine ilişkin blok gösterimi.....	18
Şekil 3.3.	PID kontrolörlü geri beslemeli kontrol sisteminin blok diyagramı	19
Şekil 3.4.	Hat sonunda SVC olan basit bir güç sistemi.....	21
Şekil 3.5.	Tek makineli doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin kapalı çevrim kontrol yapısı.....	22
Şekil 3.6.	Doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin genel blok gösterimi.....	23
Şekil 3.7.	Doğrusal olmayan SVC'li güç sistem karakteristiği.....	24
Şekil 3.8.	$G_2(s)$ transfer fonksiyonunun kutupları ve sıfırları.....	29
Şekil 3.9.	Doğrusallaştırılmış (3.13) eşitlikleri ile verilen sisteminin açık çevrim simulink benzetimi.....	30
Şekil 3.10.	Doğrusallaştırılmış (3.13) eşitlikleri ile verilen ve doğrusal olmayan (3.5) eşitlikleri ile verilen SVC'li güç sisteminin birim basamak cevap eğrileri.....	30
Şekil 3.11.	Doğrusallaştırılmış (3.17) eşitlikleri ile verilen sisteminin açık çevrim simulink benzetimi.....	31

Şekil 3.12.	Doğrusallaştırılmış (3.17) eşitlikleri ile verilen ve doğrusal olmayan (3.5) eşitlikleri ile verilen SVC’li güç sisteminin birim basamak cevap eğrileri.....	32
Şekil 3.13.	Doğrusallaştırılmış (3.19) eşitlikleri ile verilen sisteminin açık çevrim simulink benzetimi.....	33
Şekil 3.14.	Doğrusallaştırılmış (3.19) eşitlikleri ile verilen ve doğrusal olmayan (3.5) eşitlikleri ile verilen SVC’li güç sisteminin birim basamak cevap eğrileri.....	33
Şekil 3.15.	PID tabanlı bir geri beslemeli kontrol sistemine ilişkin benzetim diyagramı.....	34
Şekil 3.16.	3.7 ayrıtındaki (c) benzetim çalışma koşulları için oluşturulan PID kontrolör tasarımı blok gösterimi.....	35
Şekil 3.17.	Şekil 3.16’daki kontrol sisteminin ayarlanabilir oransal kazancına ilişkin basamak cevabı.....	35
Şekil 3.18.	Şekil 3.16’daki kontrol sisteminin K_c kritik kazancı için basamak cevabı	36
Şekil 3.19.	(3.19) eşitlikleri ile verilen doğrusal SVC’li güç sistemine ilişkin PID kontrol simulink benzetimi.....	37
Şekil 3.20.	(3.5) türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC’li güç sistemine ilişkin PID kontrol simulink benzetimi.....	37
Şekil 3.21.	Şekil 3.19 ve 3.20 ile verilen doğrusallaştırılmış ve doğrusal olmayan sistemlerin birim basamak cevap eğrileri.....	38
Şekil 3.22.	(3.5) türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC’li güç sistemine ilişkin yüksek talep güçlerde PID kontrol simulink benzetimi	38
Şekil 3.23.	Şekil 3.22 ile verilen doğrusal olmayan SVC’li ve SVC’siz sistemlerin birim basamak cevap eğrileri	39
Şekil 3.24.	Farklı bir referans gerilimi için (3.19) eşitlikleri ile verilen doğrusal SVC’li güç sistemine ilişkin PID kontrol simulink benzetimi	40
Şekil 3.25.	(3.5) türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC’li güç sistemine ilişkin farklı bir referans gerilimi için PID kontrol simulink benzetimi	40

Şekil 3.26.	Şekil 3.24 ve 3.25 ile verilen doğrusallaştırılmış ve doğrusal olmayan sistemlerin birim basamak cevap eğrileri	40
Şekil 4.1.	Tek girişli/ tek çıkışlı sistem için durum uzayı simulasyon diyagramı.....	41
Şekil 4.2.	Geri beslemeli kontrol sistemine ilişkin simulasyon diyagramı...	42
Şekil 4.3.	Kendinden ayarlamazsız kutup yerleştirilmeye ilişkin genel blok gösterimi.....	45
Şekil 4.4.	Kendinden ayarlamalı kutup yerleştirilmeye ilişkin genel blok gösterimi.....	46
Şekil 4.5.	Doğrusallaştırılmış SVC’li sistemin kutuplar.....	47
Şekil 4.6.	Doğrusallaştırılmış SVC’li güç sistemine ilişkin kararlılık aralığı	48
Şekil 4.7.	Doğrusal olmayan SVC’li güç sistemine ilişkin kontrol algoritması program akış diyagramı.....	49
Şekil 4.8.	Doğrusal olmayan (3.5) eşitliği ile verilmiş olan SVC’li güç sisteminin kendinden ayarlamalı kutup yerleştirme kapalı çevrim simulink benzetimi.....	50
Şekil 4.9.	Doğrusal olmayan (3.5) eşitliği ile verilen SVC’li güç sistem modelinde kullanılan geri yayımlı ağ yapısı.....	52
Şekil 4.10.	Online YSA kutup yerleştirme sistemine ilişkin SIMULINK blok diyagramı.....	54
Şekil 4.11.	Doğrusal olmayan kontrollü ve kontrolsüz SVC’li güç sisteminin $V_{2ref} = 0.8465$ basamak girişi cevap eğrileri.....	56
Şekil 4.12.	Doğrusal olmayan kontrollü ve kontrolsüz SVC’li güç sisteminin $V_{2ref} = 0.8465$ basamak girişi hata eğrileri.....	56
Şekil 4.13.	Doğrusal olmayan SVC’li güç sisteminin kontrol algoritmasında kullanılan kontrolörlerinin çıkışlarına ilişkin dalga şekilleri.....	57
Şekil 4.14.	SVC’li güç sisteminin kontrol algoritmasına ilişkin kutup değişimi.....	57
Şekil 4.15.	Yinelemeli YSA kutup yerleştirme için k kazanç vektörü değişimi.....	58
Şekil 4.16.	SVC’li güç sisteminin kontrolüne ilişkin durum değişkenlerinin zamana göre değişim eğrileri.....	58
Şekil 5.1.	Faz uzayı bölgeleri.....	60

Şekil 5.2.	Faz uzayında farklı elips yörüngelerinin elde edilmesi.....	62
Şekil 5.3.	Osilasyon yapan iki sistemden oluşan kararlı bir sistemin faz yörüngesi.....	62
Şekil 5.4.	İkinci dereceden doğrusal sistemlerin farklı durum yörüngeleri...	63
Şekil 5.5.	Kayma yüzeyi.....	64
Şekil 5.6.	Kayan kipli kontrol yapısı.....	71
Şekil 5.7.	(3.5) eşitliği ile verilen SVC'li kontrol sisteminin kayan kipli kontrol yapısına ilişkin Matlab/ SIMULINK blok gösterimi.....	74
Şekil 5.8.	Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sisteminin değişken basamak giriş cevap eğrisi.....	75
Şekil 5.9.	Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sisteminin değişken basamak girişi hata eğrisi.....	75
Şekil 5.10.	Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sisteminin talep güç değişimine bağlı çıkış gerilimi ve kontrol işareti değişimi.....	76
Şekil 5.11.	Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin anahtarlama işaretinin değişimi.....	76
Şekil 5.12.	Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri	77
Şekil 5.13.	Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin açısal hız ve açı değişimi arasındaki ilişki.....	77
Şekil 5.14.	Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin kayma yüzeyi değişimi.....	78
Şekil 5.15.	Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimi.....	79
Şekil 5.16.	Genetik algoritma akış şeması.....	81
Şekil 5.17.	Kayan kipli kontrole ilişkin optimizasyon yapısı.....	82
Şekil 5.18.	GASMC kontrolörün değişik genlikli referans sinyallerine ilişkin cevabı.....	83
Şekil 5.19.	GASMC kontrolörün değişik genlikli referans sinyallerine ilişkin hata eğrisi.....	83
Şekil 5.20.	GASMC kontrolör için faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri	84
Şekil 5.21.	GASMC kontrolör için kayma yüzeyi değişimi.....	84

Şekil 5.22.	Sabit talep güç altında GASMC ve PI kontrolöre ilişkin çıkış geriliminin birim basamak giriş cevap eğrileri.....	85
Şekil 5.23.	Talep güç değişimine göre PI ve GASMC kontrollü SVC’li güç sistemine ilişkin çıkış gerilimi değişimi.....	86
Şekil 5.24.	GASMC kontrolörlü SVC’li güç sistemine ilişkin çıkış gerilimi hata eğrisi.....	86
Şekil 5.25.	GASMC’nin ürettiği kontrol işareti.....	87
Şekil 5.26.	GASMC’ye ilişkin anahtarlama işaretinin zamana göre değişimi.	87
Şekil 5.27.	GASMC kontrollü SVC’li güç sistemine ilişkin x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimi.....	88
Şekil 5.28.	SMC ve GASMC kontrolör için faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri.....	89
Şekil 5.29.	SMC ve GASMC kontrolöre ilişkin çıkış gerilimi cevap eğrileri..	89
Şekil 5.30.	SMC ve GASMC kontrolörler için kayma yüzeyi değişimi.....	90
Şekil 5.31.	Sign(.) fonksiyonunun kullanıldığı SMC ve GASMC için anahtarlama giriş işareti $u_{sw}(t)$ nin zamana göre değişimi.....	90
Şekil 5.32.	Tansig(.) fonksiyonunun kullanıldığı SMC ve GASMC için anahtarlama giriş işareti $u_{sw}(t)$ nin zamana göre değişimi.....	90
Şekil 5.33.	Anahtarlama giriş sinyalinin FFT’sine ilişkin karmaşık Fourier katsayıları.....	91
Şekil 5.34.	Anahtarlama giriş sinyalinin FFT’sine ilişkin Frekans spektrumu	92
Şekil 5.35.	SMC ve GASMC kontrolörlü sistemin değişik genlikli referans girişine ilişkin cevap eğrileri.....	93
Şekil 5.36.	SMC ve GASMC kontrolörlü sistemin değişik genlikli referans girişine ilişkin çıkış hatasının zamana göre değişimi.....	94
Şekil 5.37.	Kontrol sinyallerinin değişimi.....	94
Şekil 5.38.	(a) N- Baralı güç sisteminin genelleştirilmiş gösterimi (b) İndirgenmiş eşdeğeri c) İki kapılı indirgenmiş sistemin pi eşdeğer devresi.....	95
Şekil 5.39.	Dokuz Baralı WSCC Sistemi.....	97
Şekil 5.40.	GASMC kontrolörlü N-baralı güç sistemine ilişkin faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri	101
Şekil 5.41.	GASMC kontrolörle N-baralı güç sistemine ilişkin birim basamak girişi cevap eğrisi.....	102

Şekil 5.42.	N-baralı Sistemde GASMC'ye ilişkin kontrol sinyali.....	102
Şekil 5.43.	GASMC kontrolörlü N-baralı güç sistemine ilişkin kayma yüzeyi değişimi.....	103
Şekil 5.44.	GASMC kontrolörlü N-baralı güç sistemine ilişkin anahtarlama işaretinin zamana göre değişimi.....	103
Şekil 5.45.	GASMC kontrolörlü N-baralı güç sistemine ilişkin yük açısının değişimi.....	104
Şekil 5.46.	N-baralı sistemde generatörün açısal frekansının zamana göre değişimi.....	104
Şekil 5.47.	Hat 5-7'nin Pi eşdeğer devresi.....	105
Şekil 5.48.	3- Makineli 9-Baralı WSCC Sistemi simulink yapısı.....	106
Şekil 5.49.	5. Bara PV eğrisi.....	107
Şekil 5.50.	Kompanzasyon yokken 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç.....	108
Şekil 5.51.	Kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi.....	108
Şekil 5.52.	Kompanzasyon uygulandığında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç.....	109
Şekil 5.53.	Farklı kompanzasyonlar uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi.....	109
Şekil 5.54.	Kompanzasyon yokken 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç değişimi.....	110
Şekil 5.55.	Dinamik akım yükü altında kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi değişimi.....	110
Şekil 5.56.	Dinamik akım yükü altında kompanzasyon uygulandığında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç.....	111
Şekil 5.57.	Dinamik akım yükü altında kompanzasyon uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi.....	111
Şekil 5.58.	Dinamik güç yükü altında kompanzasyon yokken 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç.....	112
Şekil 5.59.	Dinamik güç yükü altında kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi değişimi.....	112
Şekil 5.60.	Dinamik güç yükü altında kompanzasyon altında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç.....	113

Şekil 5.61. Dinamik güç yükü altında kompanzasyon uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi.....	113
Şekil 5.62. Dinamik ikili bozucu altında kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi değişimi.....	114
Şekil 5.63. Dinamik ikili bozucu altında kompanzasyon uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi.....	114
Şekil 5.64. Dinamik ikili bozucu altında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç değişimi.....	114

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Ziegler - Nichols frekans yanıtı yöntemine ilişkin kontrolör parametreleri.....	20
Tablo 4.1.	YSA geri yayımlı ağ yapısı için k satır vektörü bilgileri.....	52
Tablo 4.2.	Benzetim parametreleri.....	54
Tablo 4.3.	Değişik kontrol algoritmaları için optimum performans kriterleri.....	59
Tablo 5.1.	GASMC ve PI kontrolörlü sistem için elde edilen amaç ölçüt değerleri	85
Tablo 5.2.	Dokuz baralı WSCC sisteminin hat verileri.....	97
Tablo 5.3.	SVC'nin kullanılmadığı 9 baralı WSCC sisteminin güç akışına ilişkin bara gerilim ve açı değerleri.....	98

ÖZET

Anahtar Kelimeler: SVC, Taylor Serisi Açılımı, Lineerleştirme, PID Kontrolör, Kutup Yerleştirme, Yapay Sinir Ağı (ANN), Kayan Kipli Kontrol (SMC), Genetik Algoritma (GA), GASMC

Gerilim kararlılığı iyileştiricileri, iletim hatlarındaki gerilim düşümlerinde gerilimi nominal değerlere taşımada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle gerilim kararlılığı iyileştiricilerin sisteme hızlı ve etkin müdahalesi için etkili kontrolü öne çıkmaktadır. Gerilim kararlılığı iyileştiricilerinin en önemlilerinden biri SVC dir. SVC nin kontrolü için, lineerleştirme, bulanık mantık, yapay sinir ağları gibi çeşitli tekniklerle kullanılmıştır. SVC'nin yapısında tristörler bulunmaktadır. Tristörlerin iletme geçirilerek SVC kontrol edilmektedir. Bu nedenle SVC nin anahtarlı kontrolü kaçınılmaz olarak önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında öncelikle non-linear SVC sistem Taylor Serisi açılımı ile çeşitli noktalarda lineerleştirilerek durum uzay modeli elde edilmiş ve PID ile kapalı döngü denetimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, referans bir nokta seçilerek, Acermann kutup yerleştirme yöntemi için geliştirilen algoritmayla test sisteminin on-line denetimi sağlanmıştır. On-line denetimin, algoritma hesaplamalarını daha hızlı yapabilmesi için YSA modelleme yapılarak, sistemin denetimi gerçekleştirilmiştir. öncelikle iki baralı test sisteminin SMC ile kontrolü için, sistemin SMC matematiksel modeli elde edilmiştir. Bu modelden yararlanarak, Matlab-Simulink ortamında SMC başarımları elde edilip gösterilmiştir. SMC başarımlarının daha iyi performans göstermesi için, SMC katsayıları GA algoritmasıyla elde edilmiştir. Bu katsayılardan yararlanarak GASMC başarımları elde edilerek, SMC ve PI kontrolörlerin başarımlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca N-Baralı sistemin GASMC matematiksel modeli elde edilerek, başarımların simülasyon sonuçları verilmiştir.

VOLTAGE STABILITY IMPROVER OF INTELLIGENT ALGORITHM BASED SLIDING MODE CONTROL

SUMMARY

Key Words: SVC, Taylor Series Expansion, Linearisation, PID Controller, Pole Placement, Artificial Neural Network (ANN), Sliding Mode Control (SMC), Genetic Algorithm (GA), GASMC

Voltage stability improver is commonly used to carry the voltage to nominal values in case of a voltage drop. For this reason, the effective control of the voltage stability improvers becomes prominent for a rapid and effective intervention in the system. SVC is one of the important voltage stability improvers. Various techniques such as linearisation, fuzzy logic, artificial neural networks are used to control the SVC. SVC has thyristors within its structure. SVC is controlled by taking the thyristors into transmission. Because of that, SVC control with switches bears an inevitable significance.

In this thesis study, state space model is first obtained by linearising the non-linear SVC system by Taylor Series expansion in various points and closed loop control is carried out with PID. Later, by choosing a reference point, an on-line control is realised for the testing system with the algorithm developed for the Acermann pole arrangement method. The control of the system is realised by ANN modeling for the on-line control to perform the algorithmic calculations faster. First, an SMC mathematical model is achieved for the control of the 2-bus testing system with SMC. With the usage of this model, SMC achievements are shown in Matlab-Simulink. SMC coefficients are obtained by the GA algorithm for the SMC achievements to perform more efficiently. GASMC achievements are obtained by using these coefficients and compared to the achievements of SMC and PI controllers. Also, the achievement simulation outcomes are given by getting the GASMC mathematical model of an N-bus system.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son yıllarda yeni yapılan tesislerle beraber, iletim hatlarının kapasite kullanımları sınırları zorlamaktadır. Hatların yüksek kapasitelerde kullanımı ve sürekli değişen talep güçler nedeniyle yük baralarında gerilim değişimleri olur. Bu gerilim değişimlerinin en önemli nedenlerinden biri, yük baralarındaki reaktif güç talepleridir. Gerilim kararlılığı problemi modern güç sistemlerinin işletilmesi ve planlanmasında önemli bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle, elektrik iletim sistemlerinin dinamik ve doğrusal olmayan bir yapıya sahip olması kontrolünü güçleştirmektedir.

Elektrik iletim sisteminin, aktif ve reaktif güçte süreklilik gösteren yük değişimlerini karşılaması gereklidir. Elektrik enerji sisteminin besleme gücünün kalitesi; frekans gerilim sabitliği ve güvenilirlik seviyesi faktörlerine bağlıdır. Bir güç sistemi, çeşitli alt sistemler ve bunlarla ilgili üretim ve iletim kontrol düzeneklerinden oluşur. Üretim sistemlerindeki kontrolörler, elektrik enerjisinin hidro, termal gibi hangi güçle üretildiğine bağlı olarak değişmektedir. Söz konusu kontrol düzenekleri ise statik var kompanzatorleri (FACTS cihazı), seri kapasitörler, senkron kondansörler, anahtarlı kapasitörler ve reaktörler, kademeli transformatörler, faz kaymalı transformatörler ve yüksek gerilim doğru akım iletim kontrol düzenleri gibi güç ve gerilim kontrol cihazlarından oluşurlar. Kontrolün amacı gerilim ve frekansı mümkün olduğu kadar nominal değerlere yakın tutmaktır. Kontrol teorisi açısından, güç sistemi yüksek dereceden doğrusal olmayan çok değişkenli bir yapıya sahiptir. Sistemin kararlılığının farklı bakış açılarıyla ele alınması gerekir. Güç sistem kararlılığı, açılal ve gerilim kararlılığı olarak iki temel yapı ve bunların alt yapılarından oluşur. Gerilim kararlılığının en önemli yapısı reaktif güç dengesidir [1]. Bunun için FACTS cihazları kullanılmaktadır.

Güç elektroniğindeki hızlı gelişmeler, esnek AC iletim sistemlerinin (Flexible AC Transmission Systems-FACTS) ortaya çıkarılmasına neden olmuştur. FACTS cihazları güç akış kontrolünde ve sistemlerin geçici ve kalıcı kararlılığını iyileştirmede kullanılabilir. Söz konusu cihazlar ayrıca elektrik iletim maliyetini düşürmekte, güç osilasyonlarını ve reaktif güç akışını azaltmakta ve bunun sonucunda hattın daha fazla aktif güç taşınmasını sağlamaktadır [2]. FACTS cihazları güç elektroniği temelli olduğundan, sistemlerin davranışlarındaki hızlı değişimleri karşısında hızlı cevap verebilme özelliğine sahiptirler.

Yapılan kaynak araştırması sonucunda, incelenen kaynaklar arasında, SVC'li lineer olmayan güç sisteminin denetiminde, kayan kipli kontrol yönteminin uygulanmadığı görülmüştür. Söz konusu sisteme ilk kez bu tezde kayan kipli kontrol yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca kayan kipli kontrolün daha iyi performans göstermesi için, katsayılar genetik algoritmayla optimize edilmiştir. Elektrik tesislerinde, genetik algoritma uygulanmıştır. Benzetim çalışmaları ile GA'lı sonuçların daha iyi cevaplar verdiği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı SVC cihazının, sistemlere daha hızlı ve daha etkili müdahale edebilmesi için kayan kipli kontrol ve yapay sinir ağı gibi farklı kontrol teknikleri ile denetimi gerçekleştirmektir. Çalışmada SVC'li güç sisteminin gerilim kararlılığının iyileştirilmesi ve aşırı yüklenen güç sistemlerinin kontrolü amaçlanmaktadır.

1.1. Daha Önceden Yapılan Çalışmaların İncelemesi

FACTS cihazları ilk kez 1980'li yıllarda EPRI(The Electric Power Research Institute) tarafından önerilmiştir. Burada iki ana hedef vardır. İletim sistemlerinde güç transfer kapasitesinin artırılması ve güç akışının belirli kurallar çerçevesinde yapılmasının sağlanmasıdır [3].

FACTS cihazlarının en önemlilerinden biri olan SVC ile ilgili literatürde bir çok çalışma yapılmıştır.

IEEE Özel kararlılık Kontrol çalışma grubu tarafından 1993 yılında yapılan çalışmada, SVC'nin elektrikle ilgili ihtiyaç duyulan, endüstriyel temel modellerinin standardizasyonu ve modeli gereksinimleri için ilave işlev modülleri de dahil olmak üzere daha detaylı tanımları sunulmuştur. Buna ilaveten, güç akışı ve uzun dönemli dinamik programların gereksinimleri geçici kararlılık modeli için verilmiştir [4].

Wang ve arkadaşları, güç sistem gerilim kararlılığını geliştirmek için SVC'ye yönelik bir nonlinear kontrolör dizaynı önermişlerdir. Bu önermede, SVC sistemi için üçüncü derece bir nonlinear dinamik tanımlama geliştirilmiştir. Nonlinear kontrolör tasarımı için, doğrudan geri beslemeli lineerleştirme (DFL) tekniği işletilmiştir. Bazı durumlarda nonlinear SVC kontrolörü, sistemi kararlı kılabilirken, geleneksel kontrol yöntemlerinin gerilim çökmesini önleyemediği ortaya çıkmıştır [5].

Fang ve arkadaşları, verimli bir SVC (statik var compensator) denetleyicisi geliştirmek için enerji fonksiyonundaki salınımları azaltma yaklaşımı önermişlerdir. Bunun için bir adaptif bulanık mantık SVC denetim düzeni geliştirilmiştir. Düzeltme denetleyicisinin performansını artırmak için ek bir bulanık mantık kumanda sistemi salınının büyüklüğüne göre gerçek zamanlı denetim kazanç faktörü her an adaptif şekilde ayarlanabilmektedir [6].

Bian ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma içerisinde, SVC için bir olasılık algoritması sunulmuştur. Geleneksel özdeğer analizi, yük zaman eğrisine uygun olarak, istatistiksel onların beklentilerini ve farklarını dikkate alarak olasılıkçı çevreye genişletilir. Olasılıkçı duyarlılığı Index (PSI) ile SVC düzeltme denetleyicisi geribildirim sinyali ve parametre seçimi yapıldıktan sonra bölgesel olarak türetilir ve başarıyla uygulanır. Yük değişimleri olasılıksal olarak hesaplamalara alındığı için sistem sağlamlığı, garanti verilebilir. Teklif edilen yaklaşımın etkililiği, bir iki-alan dört-makine sistemde gösterilmiştir [7].

Rahim ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, bir SVC kapalı döngü yardımcı kontrolör kullanılarak bir güç sisteminin dinamik ve geçici kararlılığının

iyileştirilmesinde kullanılabilceği gösterilmiştir. SVC'yi kontrol etmek için kendinden ayarlamalı kontrol algoritmasının kullanımı sunulmuştur. Kontroller, bir kutup kaydırma tekniğini işletmektedir. Kontroller değişik bozucu koşullarında test edilmiştir [8].

You ve arkadaşlarının makalesinde, güç sistemi salınımlı modları sönümlemeyi geliştirmek için, SVC ve Tiristor kontrollü serisi kapasitörler (TCSC)'lü tamamlayıcı denetleyici tasarımı için sistematik bir yaklaşım anlatılmaktadır. Sorun, Denetim açısından analiz edilir. Güç sistemi derecesi düşürülmüş modeli, Prony tanımlama yöntemi kullanarak elde edilir; sonra, residü ve root locus yöntemleri denetleyici tasarımı için kullanılır. Denetleyici, çalışma durumuna göre kazancı ayarlayarak, daha iyi sönümleme elde edilebildiği görülmüştür. Dinamik simülasyonlar, düzeltme denetleyicisinin sistem dinamik kararlılığı arttırmadaki etkisini araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, tasarlanan denetleyicinin düşük frekanslı güç salınımlarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir [9].

Yan, R. ve arkadaşları, SVC sistemi için üçüncü derecede doğrusal olmayan dinamik denklemler denetleyici tasarımında kullanılmak için geliştirmişlerdir. SVC'li güç sistemlerinde, uyarlanabilir ve güçlü kontrol teknikleri hem sabit hem de zaman değişimi belirsiz durumlarla başa çıkmak için işletilmektedir. Kontrolörün gerilim kararlılığını arttırmadaki etkinliği, üç fazlı bir güç sistemi üzerinde gösterilmiştir [10].

Sylwester Robak yaptığı çalışmada, elektromekanik salınımları(osilasyonları) azaltmayı başarmak için sistem teorisi ve Kharitonov's teoremi temelli sistematik bir yaklaşım düşünülmüştür. Bu yöntem verilen kararlı dereceli bir sistemde, sabit parametrelere ve düşük dereceli kontrolöre izin vermektedir. SVC kontrolörün iki görevi vardır. Birincisi, kararlılık sınırlarını çizip kararlılık bölgelerindeki kontrolör parametrelerinin hesaplanmasıdır. İkinci görevi, ilk görevdeki seçili denetleyici parametreleri ile elde edilen çözümlerin optimizasyonudur [11].

Ademoye, T. ve arkadaşları bu makalede, güç sistem kararlılığını arttırmak için uyarıcı alt kontrolü ve SVC tabanlı alt kontrolünün eş zamanlı kullanımı simüle

edilmiştir. Her makine ya da jeneratör bir biriyle etkileşim içerisinde olan bir sistemin parçası olan bir alt sistem olarak düşünülebilir. SVC içeren aktif güç dağıtım jeneratör sistemi bir çift fonksiyonla modellenmiştir. SVC için ileri-geri kompanzasyon işletilmiştir. Kontroller parametrelerinin ayarlanması için parçacık sürü optimizasyonu kullanılmıştır [12].

Khandani, F. ve arkadaşları bu makalede, güç sistemi için yeni bir algoritma olan Genetik Algoritma temelli sıralı kuadratik programlama kullanılarak SVC kontrolörün alıcı ve verici arasındaki toplam transfer kapasitesini arttırmada kullanılmasını sağlamaktır. Bu algoritma SVC kontrolörün optimal yerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu algoritmanın kapasite artırımı etkileri bir 5 baralı sistem üzerinde gösterilmiştir [13].

Eslami, M. ve arkadaşları, çok makineli güç sistemi içinde yer alan güç sistem sabitleyicinin ve bir alt kontrolör olan statik var kompensatör (SVC)'nin eşzamanlı koordinasyon dizaynı için yeni bir optimizasyon tekniği önermişlerdir. PSS ve SVC denetleyiciler üzerinde geniş bir aralıktaki yüklenme koşulları eşgüdümlemiş tasarım sorunu düzeltme oranı ve düzeltme etmeni ile ilgili iki hedefli bir çok amaçlı optimizasyonu sorun olarak formüle edilmiştir. Önerilen kontrolörlerin etkileri özdeğer analizleriyle ve non-linear zaman domeyn analizleriyle gösterilmiştir [14].

Tarık Zabaiou ve arkadaşları, jeneratör uyarı ve SVC yardımcı kontrolleri koordine etmek için geniş alan ölçümlerinin temel alındığı yeni bir kontrol tasarım metodu önerilmiştir. SVC içeren çok makineli bir güç sisteminin ilk olarak durum uzay modeli türetilmiştir. Bu model, SVC ve jeneratör değişkenleri arasındaki etkileşimleri açıkça göstermektedir. Uzak ölçümler, SVC ve jeneratör uyarıcı koordinasyon sinyalleri üretmek için kullanılmıştır [15].

Tez çalışmasında kullanılan kayan kipli kontrol yöntemi üzerine birçok çalışma mevcuttur.

Kayan kipli kontrol 1950'lerin sonlarında Sovyetler Birliği'nde ortaya atılmış ve bununla ilgili ilk çalışmalar 1960'ın başlarında Emelyanov tarafından yapılmıştır.

1970'li yılların ortasında Utkin'in İngilizce kitap ve makaleleri ile bütün dünyaya duyurulmuştur [16]. Utkin 1992' yılında kesikli zaman kayan kipli kontrol ile yeni bir kontrol yaklaşımı sunmuştur [17]. Hung, kontrol stratejisinin doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için incelemiş, değişik anahtarlama mekanizmaları, diferansiyel denklemlerin kanonik formlarda gösterilmesi ve basit kayan kipli kontrol kurallarının oluşturulması üzerinde durmuştur [18]. Bekiroğlu, uyarlamalı kayma yüzeyinin üzerinde durmuş, Young ise kayma kipli kontrolün uygulamadaki güçlüklerinin nasıl aşılabileceği üzerinde durmuştur [19].

V.Utkin, J.Guldner, j.Shi Elektromekanik Sistemlerde Sliding Mode Control kitabıyla, kayan kipli kontrolün elektromekanik sistem uygulamalarının temelleri atılmıştır. Daha sonra SMC ile ilgili elektriksel ve elektromekanik sistemlere uygulamaları incelendiğinde, robot uygulamalarını; Utkin 1999 [20], Amer 2011 [21], Corradini 2012 [22], motor sürücüleri uygulamalarını; Benchaib 1999 [23], Vaez 2003 [24], Huang 2009 [25], Hsu 2011 [26], Lavaya 2012 [27], Rath 2012 [28], AD/DC dönüştürücü uygulamalarını; Shtessel 2008 [29], Hu 2011 [30], nükleer güç reaktör uygulamaları; Huang 2004 [31], Dong 2011 [32], havacılık ve motorsal araç uygulamaları; Jafarov 2001 [33], Singh 2002 [34], Hess 2004 [35], Promptun 2008 [36], Partovi 2011 [37], Wang 2012 [38], DC/DC dönüştürücü uygulamaları; M.Ahmed 2005 [39], rüzgar enerji sistem uygulamaları; Beltran 2011 [40], Kimyasal proses uygulamaları; Chen 2011 [41], hard disk sürücü uygulamaları; Zhou 2002 [42], yıllarında yapılmıştır.

Kayan kipli kontrol ve FACTS cihazlarının birlikte kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde; [43]'de bir güç sisteminde STATCOM reaktif elemanlarıyla, akım kontrolü için iki yeni değişken yapıli bulanık kontrol algoritması geliştirmiştir. Kontrol sinyalleri generatör hız seviye sapmasının ve STATCOM gerilim seviye sapmasının birleşiminden elde edilir ve bu değişken yapıli bulanık kontrolü besler. [44]'de Çok makineli(generatörlü) güç sisteminde, sonlu zamandaki bir noktadaki kararlılık için yüksek dereceli kayan kipli kontrolör önerilmiştir. [45]'de geri adımlı kayan kipli kontrol metodu kullanarak, sonsuz baralı tek makineli ve TCSC'li bir sistem için non-linear kontroller dizayn edilmiştir. [46]'da Sonsuz baraya bağlı tek makineli sistem için SMC güç sistem kararlayıcı tasarlamıştır. [47]'de jeneratör

tarafında bulunan bir SVC için bulanık tabanlı sliding mode control algoritması geliştirilmiştir. [48]'de seri kompanzasyon yoluyla değişken yapıli kontrol kullanarak elektriksel güç sistem kararlayıcısı tasarımı gerçekleştirmiştir. [49]'da güç sistemlerdeki osilasyonları çatırdamayı yok etmek (azalmak) amacıyla tam uyarlamalı sinirsel kayan modlu kontrol (Robust Adaptive Neuro Sliding Mode Control) algoritması geliştirilmiştir.

Kayan kipli kontrol ile ilgili olarak, ülkemizde yaklaşık olarak 65 civarında yüksek lisans ve doktora tez araştırması yapılmıştır. Yapılan tez araştırmalarını incelediğimizde; [50]'de sistem parametrelerindeki değişmeler, sistemdeki bozucu etkiler ve kararsız sistem denetimi açısından; model dayanaklı kayan kipli denetim ile model dayanaklı öz ayarlamalı denetim yöntemleri açısından başarımlı değerlendirilmeleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. [51]'de asılı bir sarkaç sisteminin kayan kipli kontrolü deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve Matlab/Simulink simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. [52]'de izci insansız kara aracının hız denetimi için kayan kipli denetim yöntemleri kullanılmıştır. Denetim yöntemlerinin ilk deneme ve geliştirme çalışmaları için benzetim modeli geliştirilmiştir. Benzetim modelindeki denemelerde başarılı olan denetim yöntemleri araç üzerinde de denenmiştir. [53]'de 2E helikopteri, Lagrange modellemesiyle birlikte verimekte ve ardından kayan kipli kontrolü de içeren birkaç kontrol tekniğinin deneysel uygulamaları, detaylı tasarım adımlarını da içerecek şekilde bu test düzeneği kullanılarak sunulmuştur. [54]'de bir serbest uyarımlı doğru akım motoru ile sürülen dört kol mekanizmasının krank açısall hızının akıllı ve dayanıklı yöntemlerle kontrolü gerçekleştirilmiştir. [55]'de elektromekanik eyletimli bir kanat tahrik sisteminin matematiksel modeli kullanılarak PID ve kayan kipli denetleyicinin ilgili parametrelerinin bulanık mantıklı bir algoritma aracılığıyla değişen uçuş koşullarına göre güncellendiği uyarlamalı kayan kipli denetim sistemi tasarımı yapılmıştır. [56]'da üç faz sürekli mıknatıslı senkron jeneratör (PMSG) tabanlı direkt sürülen değişken hızlı rüzgar türbin sisteminin kontrolü ve şebeke bağlantısı anlatılmıştır. [57]'de klasik evirici sistemlerinin şebekeden çektikleri giriş akımını düzeltmek amacıyla eviricinin DA-link gerilimi bir Güç Faktörü Düzeltme (GFD) devresi üzerinden sağlanmışır. GFD işleml esnasında, giriş gerilimi, çıkış gerilimi, yük ve çekilen akımdaki değişimlerden ötürü dayanıklı bir akım denetleyiciye ihtiyaç

duyulur. Bu çalışmada akım için hızlı ve daha dayanıklı olan Kayma Mod Denetleyici yapısı tercih edilmiştir.

Kayan kipli kontrol ile ilgili olarak, ülkemizde yapılan çalışmalar incelendiğinde; [58]'de düzlemsel bir elastik robot kolunun kayan kipli kontrolü gerçekleştirilmiştir. [59]'da öncelikle çatırtısız kayan kipli kontrolcü tanıtılmış, ardından tasarlanan kontrolcüler üç serbestlik derecesine sahip robotun yörünge takibinde uygulanmış ve önerilen bulanık mantıklı kayan kipli kontrolcüler ile sabit kayma yüzeyi eğimi ve sabit kontrol kazancına sahip kayan kipli kontrolcüye göre daha küçük yörünge izleme hataları elde edilmiştir. [60]'da çok erkinli sistemlerde denetim için yöntem geliştirilmiştir. Mobil robotlar kullanılarak dört farklı problem incelenmiştir. [61]'de sonsuz baraya bağlı bir senkron generatör için güç sistem kararlılığını iyileştiren dayanıklı bir uyarma kontrolörü sunulmaktadır. [62]'de Kayan Kipli Denetim (KKD) metodunun analog elektronikte uygulanması ve geliştirilen denetleyicinin piezoelektrik aktüatörlere uygulanması incelenmiştir. [63]'de doğrusal bir kesir dereceli sisteme kayan kipli denetim yaklaşımı uygulanmaktadır. Sistem çıkışının gürültülü olduğu durum ele alınmış, bir gözleyici ile sistem durumları elde edilmiş, kararlılık için kesir dereceli durumda koşulların ne olması gerektiği verilmiştir. [64]'de bir elektromekanik sistemin kayan kipli kontrol yöntemi ile, PID kayma yüzeyli hız kontrolü yapılmıştır. [65]'de kayan kipli denetim çerçevesinde zaman kayışlı elektromekanik doğrusal kasmağın denetimine yönelik bir çözüm sunulmaktadır. [66]'da bir DC motorun gerçek zamanlı kontrolünde; kutup atama yöntemi, kayan kipli denetim ve bulanık denetim yöntemleri kullanılmış ve performans sonuçları karşılaştırılmıştır. [67]'de dönen ters sarkacın simülasyon ortamında ve gerçek zamanlı kayan kipli kontrolü gerçekleştirilmiştir. Kayan kipli kontrolde entegral ve türev olarak iki adet kayma yüzeyi kullanılmıştır.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tez çalışmasında, SVC içeren İki-Baralı ve N-Baralı bir elektrik sisteminin farklı kontrol tekniklerini kullanarak bara çıkış geriliminin istenilen düzeyde tutulması amaçlanmaktadır. Çalışması 6 bölümden oluşmaktadır.

1. bölümde, problemin tanıtımı, konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalar ve tezin kapsamı sunulmuştur.

2. bölümde, SVC sisteminin temel bileşenleri, genel yapısı, çalışma karakteristiği ve kontrol yapısı ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3. bölümde, açık çevrim, kapalı çevrim ve PID kontrolör yapısı, PID katsayılarının belirlenmesini sağlayan yöntemlerden biri olan Ziegler-Nichols yöntemi ve Taylor Serisi açılımı ile doğrusallaştırma ele alınmıştır. İki baralı SVC'li dinamik sistemin matematiksel modeli verilerek dinamik sistemin karakteristiği elde edilmiştir. Dinamik sistemin matematiksel modelinden yararlanarak, sistem Taylor serisel açılım yöntemiyle çeşitli noktalarda doğrusallaştırılmıştır. Doğrusallaştırma noktalarında sistemin PID ile denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu noktalar için PID kontrolörlü doğrusal ve doğrusal olmayan uygulamalar verilmiştir.

4. bölümde, kutup yerleştirme yöntemleri verilerek, seçilen bir referans noktası için, Acermann kutup yerleştirme yöntemi için geliştirilen algoritmayla iki baralı ve N baralı test sisteminin on-line denetimi gerçekleştirilmiştir. On-line denetim algoritmasının daha hızlı yürütülmesi için sistem denetiminde Yapay Sinir Ağı (YSA) tabanlı modelleme kullanılmıştır.

5. bölüm, öncelikle iki baralı test sisteminin SMC ile kontrolü için, sistemin SMC matematiksel modeli elde edilmiştir. Bu modelden yararlanarak, Matlab-Simulink ortamında SMC başarımları elde edilmiştir. SMC'nin daha iyi performans gösterebilmesi için, SMC katsayıları GA algoritmasıyla optimize edilmiştir. Bu katsayılar ile GASMC başarımları elde edilerek, SMC ve PI kontrolörlerin başarımlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca N-Baralı sistemin GASMC matematiksel modeli elde edilerek, benzetim sonuçları verilmiştir.

6. bölümde, elde edilen farklı kontrolörlerin başarımlarına ilişkin gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır.

BÖLÜM 2. FACTS CİHAZLARI

Güç transferlerinin artması ile, güç sistemi ağır şartlar altında daha yüksek kayıplar vererek çalışmaya başlamıştır. Bununla birlikte düzenli olmayan yük akışı ile güvenilir olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu bağlamda FACTS olarak isimlendirilen yeni bir teknoloji güç sistemlerinde yerini almaya başlamıştır. FACTS teknolojisinin ana hedefi sistemi kontrol altında tutarak güç transferinin düzenlenmesini ve ayrıca taşıma kapasitesinin belirli sınırlar dahilinde artırılmasını sağlamaktır. Günümüzün güç sistemleri büyük ve mekanik kontrollüdür. FACTS teknolojisi yüksek güç elektroniğine dayalı çeşitli tristör cihazlarından oluşmuş mikro elektronik, haberleşme ve ileri kontrol uygulamaları içeren bir teknolojidir. FACTS cihazları ile seçilen baradaki gerilimin büyüklüğü ve faz açısı kontrol edilebilir. Güç akışı, kontrol merkezi tarafından devamlı bir şekilde takip edilmektedir. Bilinen FACTS cihazları aşağıdadır [68,69].

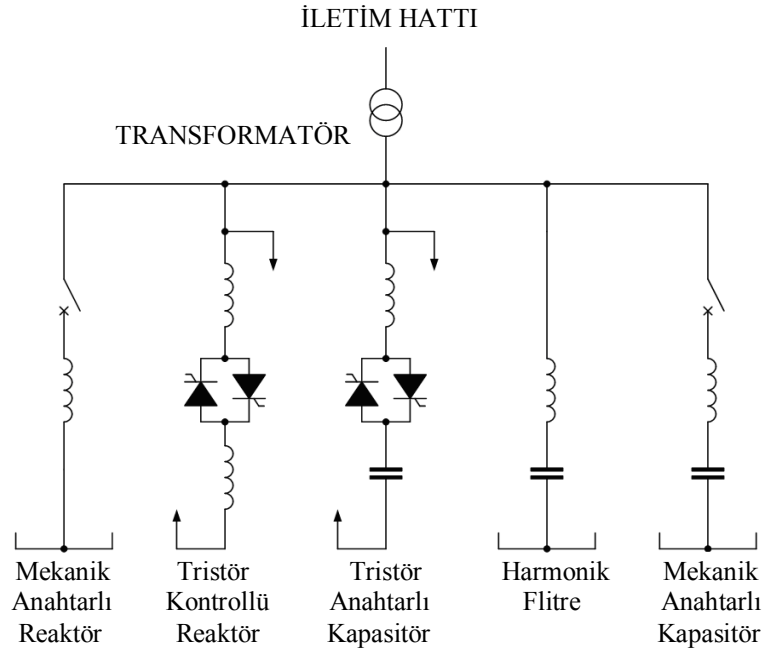
- a) Statik Var Kompanzatör (SVC)
- b) Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)
- c) Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)
- d) Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)
- e) Statik Senkron Seri Kapasitör (SSSC)

2.1. SVC (Static Var compensators)

SVC sisteminin bir elektrik iletim sisteminde sağladığı faydalar şunlardır.

- a) Güç sisteminin kalıcı ve geçici kararlılığını artırır.
- b) Sistem geriliminin regülasyonunu sağlar.
- c) Geçici aşırı gerilimleri azaltır.

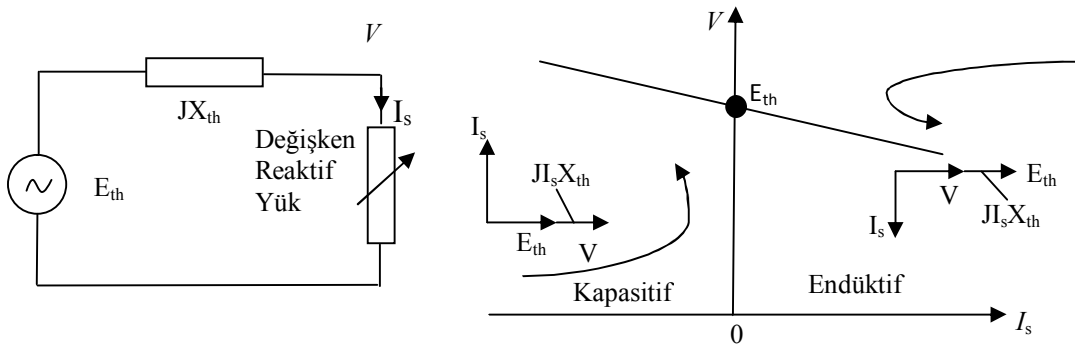
- d) İletim hattı kapasitesini artırır ve enerji kayıplarını azaltır.
- e) Güç osilasyonlarını ve alt senkronların rezonansını bastırır.
- f) Üç fazlı gerilimi dengeler.
- g) Reaktif güç sağlar ve güç faktörünü iyileştirir.



Şekil 2.1. SVC temel modeli[70]

Şekil 2.1’de gösterilmiş olan bir SVC sistemi, mekanik anahtarlı reaktör (MSR), tristör kontrollü reaktör (TCR), tristör anahtarlı kapasitör (TSC), harmonik flitre (HF), mekanik anahtarlı kapasitör (MSC) den oluşur.

Yüksek Gerilim Alternatif Akım şebekesinin, baradan bakılarak Thevenin eşdeğer devresi ve reaktif akıma karşı düşen gerilim Şekil 2.2 deki gibi elde edilebilir. Sistemin V/I özelliği Thevenin eşdeğer devresi göz önüne alınarak incelenebilir. Thevenin empedansı endüktif bir reaktanstır. V gerilimi kapasitif yük akımı ile doğrusal olarak artar ve endüktif yük akımıyla doğrusal olarak azalır [1].



Şekil 2.2. Thevenin eşdeğer devresi ve gerilim-reaktif akım karakteristiği[1]

2.1.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

TKR nin temel elemanları Şekil 2.1’de gösterildiği gibi iki yönlü tristör anahtarla seri bağlı bir reaktördür. Tristör, simetrik olarak tetiklenir. Bu durumda maksimum tetiklenme açısı 180° olur. Tetiklenme açısı 90° olduğunda TCR sürekli iletimde kalmaktadır, eşdeğer reaktansı X_L ye eşit olur ve akım sinüsoidal ve reaktiftir. Tetikleme 90° yi geçtikten sonra akım bileşeni azalır ve TCR eşdeğer reaktansı X_L den büyük olur. Tetikleme 180° olması durumunda akım sıfır ve reaktans değeri sonsuz olur. İletim açısı σ ile tetikleme açısı α arasında aşağıdaki bağıntı vardır:[71]

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.1)$$

Ani akım i aşağıdaki bağıntı ile verilir:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2V}}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t); & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0; & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (2.2)$$

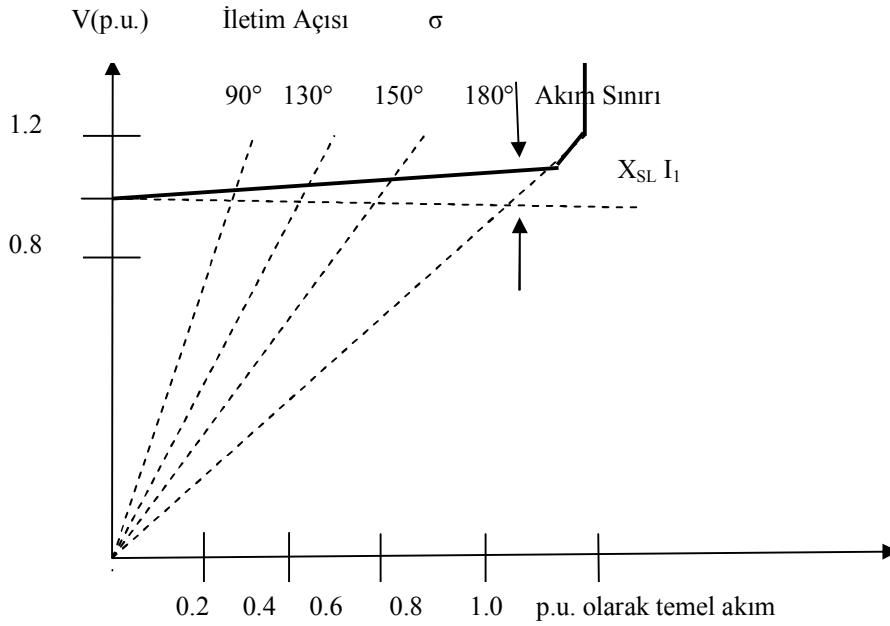
Akım Dalgasının Fourier analizinin temel bileşeni,

$$I_1 = \frac{V}{X_L} \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \quad (2.3)$$

burada I_1 ve V efektif değerlerdir, X_L temel frekansındaki reaktörün reaktansıdır. Ateşleme açısının bir fonksiyonu olarak etkin süseptans değeri şöyle verilir.

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (2.4)$$

X_{SL} kontrol sistemi kazancıyla belirlenen kayma reaktansı olmak üzere sistemin V/I karakteristiği Şekil 2.3 deki gibi verilebilir [1].



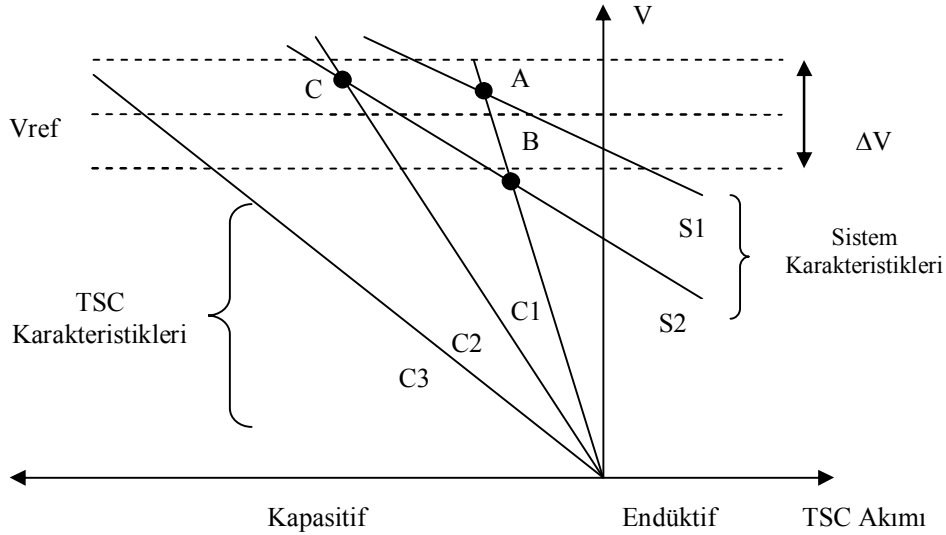
Şekil 2.3. TKR V/I karakteristiği[1]

2.1.2. Tristör Anahtarlı Kapasitör (TSC)

TSC nin temel elemanları Şekil 2.1 de gösterildiği gibi bir kapasitör, ona seri iki yönlü tristör anahtarı ve küçük değerli endüktanstan oluşmaktadır. Genel olarak TSC, tristör anahtarı kullanılarak devreye alınıp çıkartılan bir kapasitör grubundan oluşur. Endüktansın amacı anahtarlama geçişlerini sınırlamak, ani olmayan akımları söndürmek, ve şebekedeki rezonansı önlemektir. Tristörlerin tetiklenmesinin kontrolü önemlidir. Kapasitörlerin rezonans frekansına bağlı olarak geçici oluşan osilasyonlar dış sistemi etkilerler. Bu nu önlemek için tristörler üzerindeki gerilimin minimum olduğu anda tetiklenmelidirler.

Şekil 2.4'de TSC nin V/I özelliği gösterilmektedir. Sağlanan gerilim kontrolü

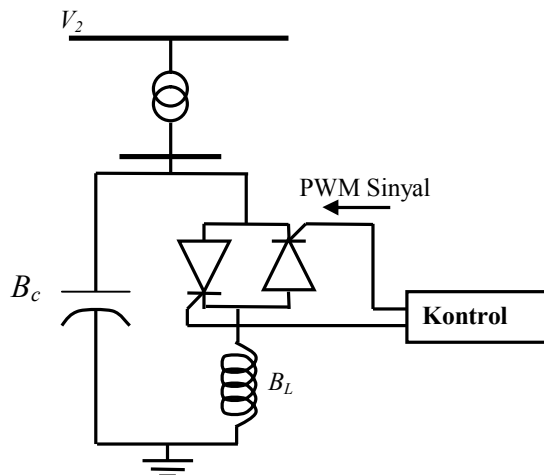
sürekli. Sistem özellikleri S_1 doğrusu ile ifade edilecek şekilde çalıştığında, C_1 kapasitörü devrede olacaktır ve A çalışma noktası geçerlidir. Eğer sistem karakteristiği aniden S_2 olursa, bara gerilimi başlangıçta B çalışma noktası tarafından belirlenen değere düşer. TSC kontrolü C_2 grubunu devreye alarak çalışma noktasını C ye getirir, bu şekilde gerilim istenen bölge dahilinde yer almış olur [1].



Şekil 2.4. TSC V/I karakteristiği[1]

2.1.3. SVC Sisteminin Karakteristiği

SVC sisteminin kolay analiz edilebilmesi için sistem Şekil 2.5 deki gibi basitleştirilir. Tristörler simetrik bir şekilde ateşlenirler, α açısı 90^0-180^0 arasında kontrol edilerek kapasitör gerilimi ayarlanır. SVC iletim hattına, 50kV ve daha yüksek gerilimlerde genellikle kademe düşürücü transformatör üzerinden bağlanır [69,72].



Şekil 2.5. Basit bir SVC modeli

Sistemin Thevenin eşdeğer devresinden yararlanarak V/I özelliği elde edilebilir. Bunun için öncelikle sistem gerilimi,

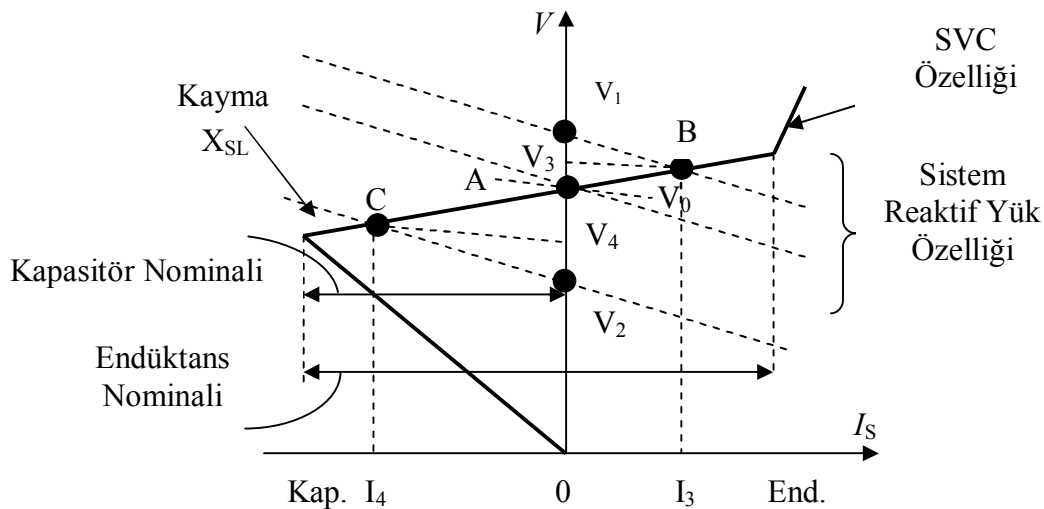
$$V = E_{th} - X_{th} I_s \quad (2.5)$$

Kayma reaktansı X_{SL} ile belirlenen kontrol bölgesinde SVC özelliği,

$$V = V_o - X_{SL} I_s \quad (2.6)$$

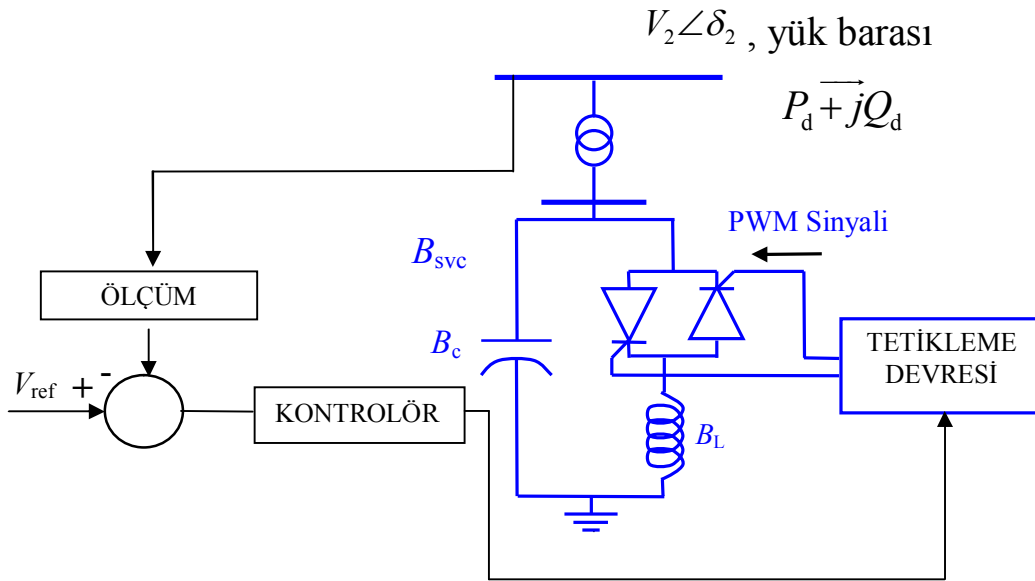
ile verilir. Kontrol bölgesinin dışındaki gerilimler için, V/I_s oranı iki uç kısmın kaymalarına eşittir. Bunlar endüktans ve kapasitans nominaleri ile verilir.

SVC ve güç eşitliklerinin çözümü grafik olarak Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Şekilde kaynak geriliminin uç değerine karşı düşen sistem özelliği göz önüne alınmıştır. Ortadaki karakteristik $V=V_0$ ve $I_s=0$ olduğu A noktasındaki SVC karakteristiğini kestiği varsayılan nominal sistem çalışma koşullarını gösterir. Eğer sistem gerilimi (Delta) E_{th} kadar arttırılırsa (örneğin sistem yük seviyesindeki bir azalma yüzünden) V gerilimi, bir SVC olmadığı durumda V_1 e yükselecektir. SVC nin var olması durumunda çalışma noktası I_3 akımını çekerek B noktasına kayar, SVC gerilimi V_3 değerinde tutar. Benzer şekilde, kaynak gerilimi azalır (sistem yükündeki bir artmadan dolayı), SVC yoksa gerilimin alacağı değer V_2 dir; SVC varsa gerilim V_4 de tutulur. Eğer, SVC karakteristiğinin kayması K_0 sıfırda, yukarıda göz önüne alınan her iki durum için de gerilim V_0 da sabit kalacaktır[1].



Şekil 2.6. Belli sistem koşulları için, SVC çalışma noktasının grafik çözümü [1]

2.1.4. Gerilim kontrolü için SVC denetim modeli



Şekil 2.7. SVC'nin Kontrol Modeli

Kontrolör, referans geriliminden yük barasındaki ölçülen bara geriliminin farkını alarak tetikleme açısı α 'yı üretir. α tetikleme devresi vasıtasıyla uygun PWM (darbe genişlik modülasyonu) sinyalin üretilmesini sağlar. Tristörler PWM sinyalleri yardımıyla tetiklenirler ve bunun sonucunda kontrollü reaktif güç üretilerek sisteme verilir. TCR eşdeğer süseptansı B_{TCR} olmak üzere toplam süseptans değeri B_{SVC} ise,

$$\left. \begin{aligned} B_{TCR} &= \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi X_L} \\ B_{SVC} &= \frac{X_C [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] - \pi X_L}{\pi X_C X_L} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

2.7 eşitliğiyle tanımlanmıştır.

BÖLÜM 3. PID KONTROLÖR ve DOĞRUSALLAŞTIRMA

3.1. Kontrolör Yapıları

Bir kontrol sisteminde, referans girişleri değişikçe çıkış büyüklüklerinin de belirlenen amaç ölçütleri doğrultusunda referans değerlerini yakalaması ve sistemin bozucu büyüklüklerden minimum düzeyde etkilenmesi arzu edilir. Eğer bu özellikler sağlanmıyorsa, sisteme kontrol düzeneği ilave edilerek arzu edilen koşulların gerçekleşmesine çalışılır [73].

Matematiksel modeli mevcut olan bir sistemin kontrolüne ilişkin yöntemler açık çevrim kontrol ve kapalı çevrim kontrol olmak üzere iki ana grupta incelenebilir [74,75].

3.1.1. Açık çevrim kontrol

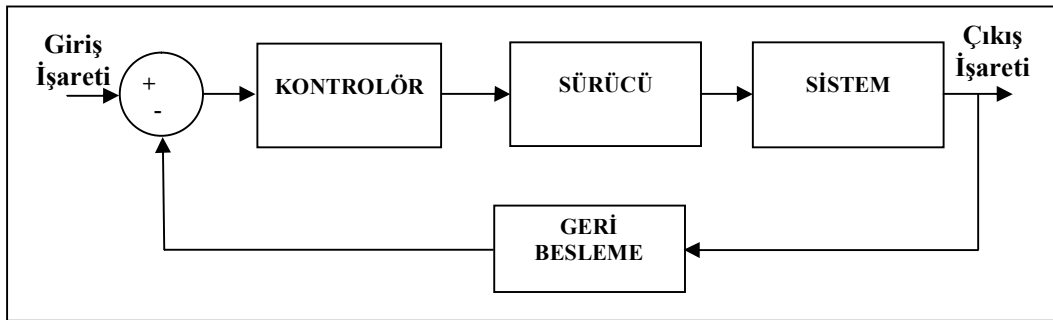
Bu kontrol yönteminde sisteme uygulanan kontrol işareti, sistemin durumuyla ilgili işaretlerden ya da çıkış işaretlerinden etkilenmez. Sistem parametrelerindeki değişimlerden ya da sisteme etkileyen bozucu büyüklüklerden etkilenmeyen açık çevrimli kontrol yöntemi, sistemi istenilen referans düzeyinde tutma eğiliminde değildir. Bu yüzden açık çevrimli kontrol yöntemi basit uygulamalarda kullanılır. Şekil 3.1'de açık çevrimli kontrol sistemine ilişkin genel blok gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1. Açık çevrim kontrol sistemine ilişkin blok gösterimi

3.1.2. Kapalı çevrim kontrol

Geri beslemeli kontrol olarak da adlandırılan kapalı çevrim kontrolde, sistemin giriş işareti, çıkış işaretinden etkilenir. Bu tür kontrol sistemlerinde, sistemin çıkışından alınan geri besleme bilgisi ile referans giriş değeri arasındaki fark olan hata değeri kontrolör girişine uygulanır. Kontrolör çıkışından sürücü girişine uygulanan kontrol işaretine bağlı olarak sistem için gerekli olan enerji ayarlanır [76].



Şekil 3.2. Kapalı çevrim kontrol sistemine ilişkin blok gösterimi

Kontrol yöntemlerinin birçoğu kapalı çevrim kontrol sınıfına girer. Endüstride yaygın olarak kullanılan kontrol türleri on/off kontrol ve PID kontrolüdür [77]. Şekil 3.2'de kapalı çevrimli kontrol sistemine ilişkin genel blok gösterimi verilmiştir.

3.2. PID Kontrolör

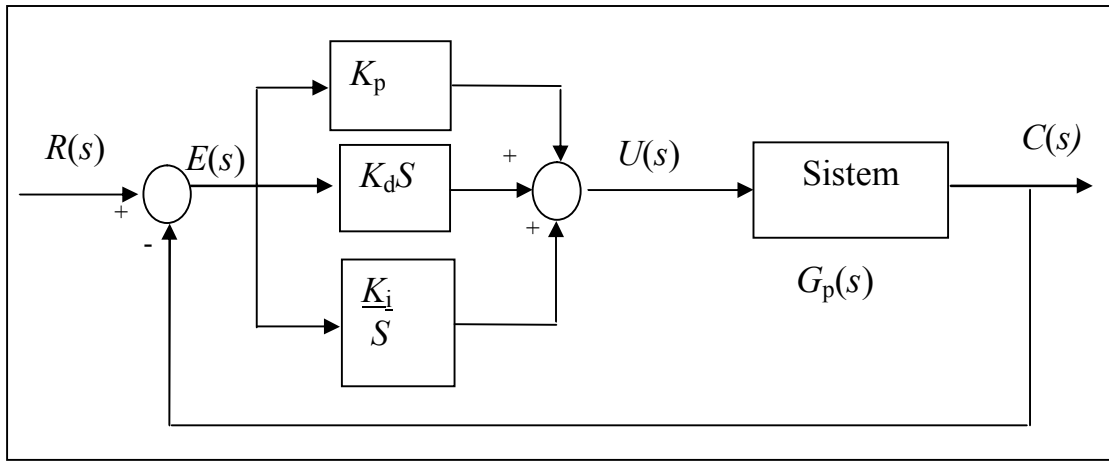
PID kontrol geleneksel kontrol yöntemlerindedir. Burada P oransal, I integral ve D ise türevsel kontrol bileşenidir. Sistemler bunların her biriyle veya farklı bileşimleri kullanılarak kontrol edilebilir. Oransal kontrol, sürekli hal hatası dışındaki diğer amaç ölçütlerini etkiler. İntegral kontrol, sistemin sürekli durum hatasının ortadan kaldırılmasını sağlar. Türev kontrol ise sistemin kararlılığını etkiler, aşımı azaltır ve geçici durum cevabını iyileştirir [78].

PID kontrol endüstride kullanılan süreçlerde en çok tercih edilen kontrol türüdür. Yapılan araştırmalar, kullanılan kontrol algoritmalarının % 95'inin PID tipi olduğu ve genelde tek giriş tek çıkış (SISO) sistemlerde kullanıldığını ortaya koymuştur.

Kısa süreli zaman gecikmelerine sahip birinci mertebeden veya ikinci mertebeden sistemlerin kontrolü, katsayıları uygun olarak seçilmiş olan PI veya PID kontrolörler ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [78,79].

PID kontrolör oransal, integral ve türevsel kontrolün birlikte kullanılması sonucu oluşur. Şekil 3.3’de kullanılan PID kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıdaki eşitlik ile verilebilir.

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_I}{S} + k_d S \quad (3.1)$$



Şekil 3.3. PID kontrolörlü geri beslemeli kontrol sisteminin blok diyagramı

Şekil 3.3’de $G_p(s)$ sistemine PID kontrolörden uygulanan $u(t)$ kontrol işareti aşağıdaki eşitlik ile verilebilir.

$$u(t) = k_p e(t) + k_I \int e(t) dt + k_d e(t) \quad (3.2)$$

3.2.1 Nichols -Ziegler Frekans Yanıtı Yöntemi

Nichols-Ziegler tasarım yöntemi PID kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan yöntemlerden birisidir. Uygulamaının basit olması ve bu yöntem ile tasarlanan kontrolörlerin bozuculara karşı dayanıklı olması sıklıkla kullanılma nedenlerinin başında gelmektedir. İki çeşit Nichols-Ziegler yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan ilki frekans yanıtı yöntemidir. Bu yöntemde kontrolör oransal kontrole

alınarak, oransal kazanç sistemde salınım yapıncaya kadar ayarlanır. Sistem salınım yaptığı andaki oransal kazanç K_c ve salınımın periyodu da T_c ise, kontrolörün parametreleri Tablo 3.1 de verildiği gibi seçilebilir.

Tablo 3.1. Nichols-Ziegler frekans yanıtı yöntemine ilişkin kontrolör parametreleri[80]

Kontrolör	Parametreler		
	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_c$	---	---
PI	$0.45K_c$	$(1/1.2)T_c$	---
PID	$0.6 K_c$	$0.5T_c$	$(1/8)T_c$

Bir güç sisteminin kararlılık analizi için matematiksel modelleri; generatör, transformatör, baralar, iletim hatları, yükler ve FACTS kontrolörlerinden oluşan sistem bileşenlerini gösteren diferansiyel ve cebrik eşitliklerden oluşur. Sistemin dengeli bir sistem olduğu kabul edilmekte ve sistem modeli tek faz için oluşturulmaktadır [81].

Literatürde Kontrolör tasarımı için, bir çok yöntem kullanılmaktadır [1,4,5,12,50,73.80]. SVC sisteminin kontrolü için literatürde en çok kullanılan yöntem, geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemidir. Burada yapılan doğrusallaştırma çalışmasında ise Taylor serisi açılımı kullanılmıştır.

3.3. Taylor Serisi Açılımı ile Doğrusallaştırma

Doğrusal olmayan sistemlerin analizi ve kontrolü oldukça zordur. Bu nedenle doğrusal olmayan sistemler uygun bir çalışma noktalarında doğrusallaştırılıp doğrusal sistem metotları ile analizleri yapılmaktadır. Böylece doğrusallaştırılmış sistemlerden yararlanılarak doğrusal olmayan sistemler için kontrolör tasarlanabilmektedir [5]. Doğrusallaştırma işlemini daha iyi kavrayabilmek için tek değişkenli bir $f(x)$ fonksiyonunu ele alalım.

Seçilen bir \bar{x} çalışma noktası için; Taylor serisi açılımı,

$$f(x) = f(\bar{x}) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})^2 + \frac{1}{6} \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x})^3 + \dots \quad (3.3)$$

ifadesi ile verilebilir. Bu ifade de sadece birinci türevler alınıp tekrar yazılırsa,

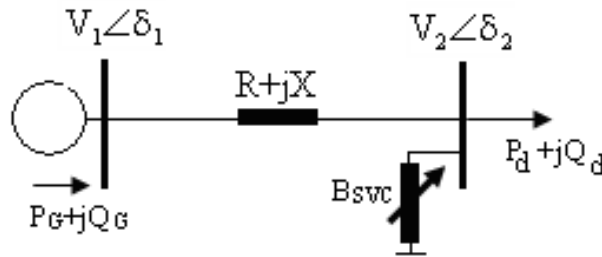
$$f(x) = f(\bar{x}) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + \text{yüksek dereceli terimler}$$

elde edilir. Bir fonksiyonu büyük oranda açılımın ilk terimleri ifade edeceğinden yüksek dereceli terimler atılabilir. Böylece Taylor serisel açılımı için aşağıdaki yaklaşık ifade yazılabilir.

$$f(x) \approx f(\bar{x}) + a(x - \bar{x}) \quad (3.4)$$

3.4 Test Sistemi

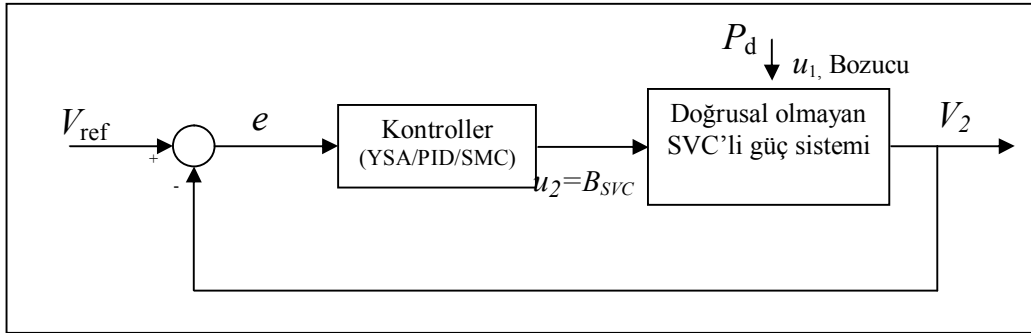
Hat sonunda SVC'nin bağlı olduğu iki baralı basit bir güç sistemi Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Hat sonunda SVC'nin bağlı olduğu basit bir güç sistemi

Bu sistem için temel generator modeli dinamik bağıntıları kullanılarak, yük için ve gerilime bağımlı dinamik eşitlikler ve SVC 'ye ilişkin dinamik model eşitlik (3.5) ile verilebilir [81].

Tek makineli bir güç sisteminde hattın sonuna yerleştirilen bir SVC için, kapalı çevrim kontrol yapısı Şekil 3.5'de verilmiştir. Burada P_d talep güç olup, ölçülen bu büyüklük sisteme bir bozucu olarak etkimektedir. B_{SVC} ise sistemin kontrol büyüklüğüdür.



Şekil 3.5. Tek makineli doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin kapalı çevrim kontrol yapısı

Tek makineli SVC'li güç sistemine sisteme ilişkin dinamik eşitlikler ise aşağıdaki bağıntılar ile verilebilir,

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta}(t) &= \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) &= \frac{1}{M} \left(P_m - \frac{V_1(t)V_2(t) \sin \delta(t)}{X} - D_G \omega(t) \right) \\ \dot{V}_2(t) &= \frac{1}{\tau} \left(-V_2^2(t) \left(\frac{1}{X} - B_{SVC} \right) + \frac{V_1(t)V_2(t) \cos \delta(t)}{X} - kP_d \right) \\ \dot{B}_{SVC} &= \frac{1}{\tau} (V_{ref} - V_2)(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Burada δ generator açısı, ω açısal hız, M generator eylemsizlik sabiti, D_G sönümleme katsayısı, X hattın reaktansı, V_1 bir numaralı bara gerilimi, V_2 yük barası gerilimi, k talep güç katsayısı, τ zaman sabitleridir. Çalışma boyunca,

$$M = 1, \quad X = 0.5 \text{ pu}, \quad V_1 = 1 \text{ pu}, \quad \tau = 8 \text{ sn}, \quad k = 0.25, \quad \text{ve } D_G = 0.1 \text{ olarak seçilmiştir.}$$

Sistemdeki dinamik değişkenler; $\delta(t)$, $\omega(t)$ ve $V_2(t)$, kontrol değişkeni ise B_{SVC} dir. Söz konusu dinamik değişkenler,

$$x_1(t) = \delta(t), \quad x_2(t) = \omega(t), \quad x_3(t) = V_2(t), \quad P_d = u_1(t), \quad B_{SVC} = u_2(t)$$

biçiminde durum değişkenleri ve giriş değişkenleri ile tanımlanırsa ve seçilen sabitlerde 3.5 eşitliğinde yerleştirilirse, SVC'li güç sistemi için aşağıdaki durum ve çıkış denklemleri elde edilir.

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -2x_3(t) \sin x_1(t) - 0.1x_2(t) + u_1(t) \\ \dot{x}_3(t) &= 0.25x_3(t) \cos x_1(t) - 0.25x_3^2(t) + 0.125x_3^2(t)u_2(t) - 0.03125u_1(t) \\ y(t) &= x_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

son doğrusal olmayan bağıntılar matrisel forma düzenlenirse,

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(x(t)) \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

$$f(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} f_1(x(t)) \\ f_2(x(t), u(t)) \\ f_3(x(t), u(t)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ -2x_3(t) \sin x_1(t) - 0.1x_2(t) + u_1(t) \\ 0.25x_3(t) \cos x_1(t) - 0.25x_3^2(t) + 0.125x_3^2(t)u_2(t) - 0.03125u_1(t) \end{bmatrix}$$

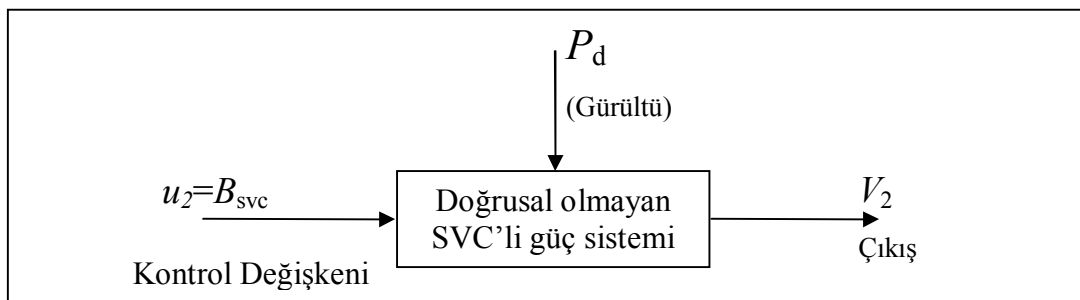
$$g(x(t)) = x_3(t)$$

$$x(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad x_3(t)]^T$$

$$u = [u_1 \quad u_2]^T$$

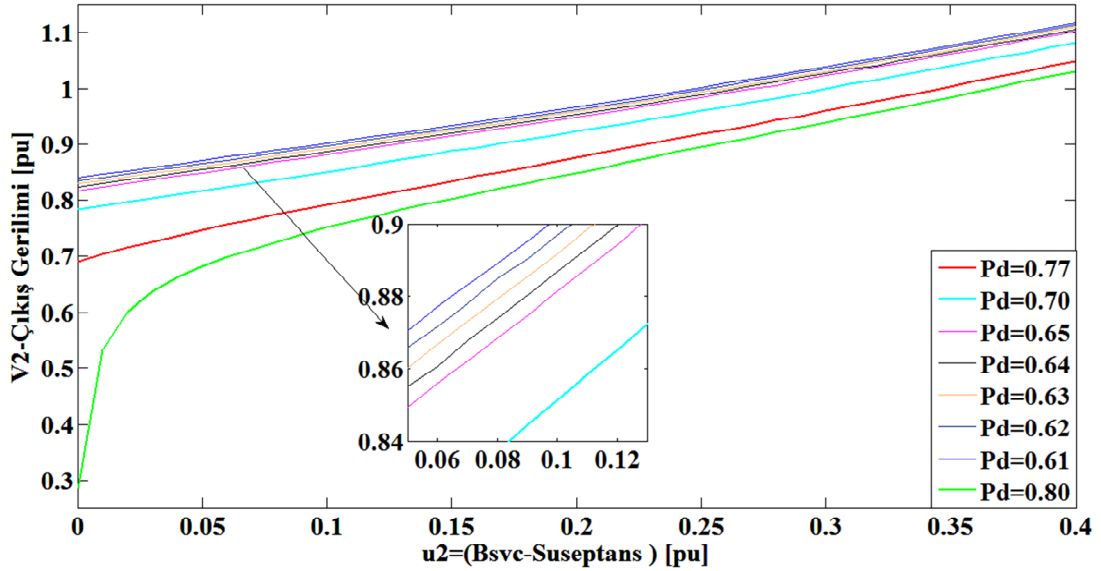
elde edilir.

3.5. SVC'li Güç Sisteminin (Test Sisteminin) Karakteristiği



Şekil 3.6. Doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin genel blok gösterimi

Şekil 3.6 ile verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sisteminde farklı P_d değerleri için, giriş değişkeni $u=0-0.4$ pu aralığında değiştirilerek V_2 çıkı gerilim değerleri elde edilmiştir. Her bir P_d değeri için giriş-çıkış ilişkisi Şekil 3.7 de verilmiştir. Şekilden de gözlemlendiği gibi sistem $P_d = 0.61-0.77$ pu aralığında doğrusal iken, $P_d = 0.8$ pu için doğrusal olmayan davranış göstermektedir.



Şekil 3.7. Doğrusal olmayan SVC'li güç sistem karakteristiği

3.6. SVC'li Güç Sisteminin Doğrusallaştırılması

(3.5) türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sistem modelinin geri beslemeli kontrolü için,

$$\bar{x} = [\bar{x}_1 \quad \bar{x}_2 \quad \bar{x}_3]^T, u = [\bar{u}_1 \quad \bar{u}_2]^T$$

çalışma noktası civarında doğrusallaştırılması gerekir. Bu amaçla (3.7) ifadesi için Taylor serisi açılımı ile söz konusu çalışma noktasına ilişkin aşağıdaki Jakobyen matrisleri yazılabilir [82].

$$F_x(x,u) = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{array} \right]_{x=\bar{x}, u=\bar{u}} = \left[\begin{array}{ccc} 0 & 1 & 0 \\ -2\bar{x}_3 \cos \bar{x}_1 & -0.1 & -2 \sin \bar{x}_1 \\ -0.25\bar{x}_3 \sin \bar{x}_1 & 0 & -0.5\bar{x}_3 + 0.25 \cos \bar{x}_1 + 0.25\bar{x}_3 u_2 \end{array} \right] \quad (3.8)$$

$$F_u(x,u) = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial u_1} & \frac{\partial f_3}{\partial u_2} \end{array} \right]_{x=\bar{x}, u=\bar{u}} = \left[\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ -0.03125 & 0.125\bar{x}_3^2 \end{array} \right] \quad (3.9)$$

$$H_x(x,u) = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial g_1}{\partial X_1} & \frac{\partial g_1}{\partial X_2} & \frac{\partial g_1}{\partial X_3} \end{array} \right]_{x=\bar{x}} = [0 \ 0 \ 1], \quad H_y(x,u) = \left[\begin{array}{cc} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \frac{\partial g_1}{\partial u_2} \end{array} \right]_{u=\bar{u}} = [0 \ 0] \quad (3.10)$$

Bu matrisler kullanılarak doğrusal olmayan 3.7 eşitlikleriyle verilen SVC'li güç sistemine ilişkin amaçlanan doğrusallaştırılmış durum uzay modeli için aşağıdaki durum ve çıkış eşitlikleri yazılır.

$$\left. \begin{array}{l} \Delta \dot{X}(t) = F_x \Delta x(t) + F_u \Delta u(t) \\ \Delta y(t) = H_x \Delta x(t) \end{array} \right\} \quad (3.11)$$

3.7. Benzetim Çalışmaları

3.7 eşitliği ile modellenen doğrusal olmayan SVC'li güç sisteminin ve $x = \bar{x}$ ve $u = \bar{u}$ çalışma noktasında değişik çalışma koşulları için doğrusallaştırılmış modelinin MATLAB/SİMULİNK ortamında farklı talep güç ve süseptans değerleri için açık çevrim ve kapalı çevrim benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Söz konusu benzetim çalışmaları aşağıda verilmiştir.

(a) Kompanzasyonsuz olarak çökme noktasında doğrusallaştırma:

3.7 eşitliği ile verilen iki baralı SVC siz sistemin çıkış geriliminin çökme noktası, sistemin analizi açısından kritik bir noktadır. Bu noktada öncelikle kompanzasyon yapılmadan yani B_{SVC} değeri sıfır alınarak doğrusal olmayan ve doğrusallaştırılmış sistemin doğal cevabı elde edilmiştir. Durum değişkenlerinin; doğrusal olmayan sistemin simulink modelinde hesaplanan, çökme noktasındaki değerleri aşağıda verilmiştir. Bunlardan yararlanarak Jakobyen matrisleri, durum uzay modeli ve SVC siz sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

Kritik nokta olan çökme noktasına ilişkin değerler,

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_1 = \delta = 0.6629, \bar{x}_2 = w = -0.0000003, \bar{x}_3 = V_2 = 0.6343 \\ \bar{u}_1 = Pd = 0.7807, \bar{u}_2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

olarak hesaplanmıştır.

$$\cos x_1 = 0.7882 \text{ ve } \sin x_1 = 0.6154$$

ve çökme anında $\bar{u}_2 = 0$ alınırsa, 3.8, 3.9, 3.10 eşitlikleriyle verilen Jakobyen matrisleri,

$$A = F_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & -0.1 & -1.2308 \\ -0.0976 & 0 & -0.1201 \end{bmatrix}$$

$$B = F_u = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ -0.03125 & 0.0503 \end{bmatrix}$$

$$C = H_x = [0 \ 0 \ 1] \text{ ve } D = [0 \ 0]$$

şeklinde elde edilir.

Elde edilen Jakobyen matrisleri doğrusallaştırılmış 3.11 durum uzayı eşitliklerinde yerleştirilerek çökme noktasına ilişkin aşağıdaki doğrusal durum uzayı modeli elde edilir.

$$\Delta \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & -0.1 & -1.2308 \\ -0.0976 & 0 & -0.1201 \end{bmatrix} [\Delta x(t)] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ -0.03125 & 0.0503 \end{bmatrix} [\Delta u(t)] \quad (3.13.a)$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 1][\Delta x(t)] + [0 \ 0][\Delta u(t)] \quad (3.13.b)$$

Doğrusallaştırılmış sistemin transfer işlevi ise,

$$G(s) = C[sI - A]^{-1} B + D \quad (3.14)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanabilir. Bu amaçla öncelikle $[sI - A]^{-1}$ ifadesini hesaplayalım:

$$[sI - A]^{-1} = \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 1 & s+0.1 & 1.2308 \\ 0.0976 & 0 & s+0.1201 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$[sI - A]^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} + \begin{vmatrix} s+0.1 & 1.2308 \\ 0 & s+0.1201 \end{vmatrix} & - \begin{vmatrix} 1 & 1.2308 \\ 0.0976 & s+0.1201 \end{vmatrix} & + \begin{vmatrix} 1 & s+0.1 \\ 0.0976 & 0 \end{vmatrix} \\ - \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ 0 & s+0.1201 \end{vmatrix} & + \begin{vmatrix} s & 0 \\ 0.0976 & s+0.1201 \end{vmatrix} & - \begin{vmatrix} s & -1 \\ 0.0976 & 0 \end{vmatrix} \\ + \begin{vmatrix} -1 & 0 \\ s+0.1 & 1.2308 \end{vmatrix} & - \begin{vmatrix} s & 0 \\ 1 & 1.2308 \end{vmatrix} & + \begin{vmatrix} s & -1 \\ 1 & s+0.1 \end{vmatrix} \end{bmatrix}^T$$

$$[sI - A]^{-1} = \frac{1}{\det A} \begin{bmatrix} (s+0.1)(s+0.1201) & -(s+0.1201)+0.12012 & -0.0976(s+0.1) \\ (s+0.1201) & s(s+0.1201) & -0.0976 \\ -1.2308 & -s(1.2308) & s^2+0.1s+1 \end{bmatrix}^T$$

$$[sI - A]^{-1} = \frac{1}{s(s+0.1)(s+0.1201)+s} \begin{bmatrix} (s+0.1)(s+0.1201) & (s+0.1201) & -1.2308 \\ -s & s(s+0.1201) & -1.2308s \\ -0.0976(s+0.1) & -0.0976 & s^2+0.1s+1 \end{bmatrix}$$

Son ifade 3.14'de yerleştirilip $D=[0 \ 0]$ için gerekli işlemler yapılırsa,

$$G(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{s(s+0.1)(s+0.1201)+s} \begin{bmatrix} (s+0.1)(s+0.1201) & (s+0.1201) & -1.2308 \\ -s & s(s+0.1201) & -1.2308s \\ -0.0976(s+0.1) & -0.0976 & s^2+0.1s+1 \end{bmatrix} \cdot B$$

$$G(s) = \frac{1}{s(s+0.1)(s+0.1201)+s} \begin{bmatrix} -0.0976(s+0.1) & -0.0976 & s^2+0.1s+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ -0.03125 & 0.0503 \end{bmatrix}$$

$$G(s) = \frac{1}{s(s+0.1)(s+0.1201)+s} \begin{bmatrix} -0.0976 + -0.03125(s^2+0.1s+1) & 0.0503(s^2+0.1s+1) \end{bmatrix}$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{-0.0976 + -0.03125(s^2+0.1s+1)}{s(s+0.1)(s+0.1201)+s} & \frac{0.0503(s^2+0.1s+1)}{s(s+0.1)(s+0.1201)+s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{-0.03125s^2 - 0.003125s - 0.12885}{s^3 + 0.2201s^2 + 1.01201s} & \frac{0.0503s^2 + 0.00503s + 0.0503}{s^3 + 0.2201s^2 + 1.01201s} \end{bmatrix}$$

elde edilir. Son transfer matrisinden,

$$G_1(s) = \frac{V_2(s)}{P_d(s)} = \frac{-0.03125s^2 - 0.003125s - 0.12885}{s^3 + 0.2201s^2 + 1.01201s} \quad (3.15.a)$$

$$G_2(s) = \frac{V_2(s)}{B_{SVC}(s)} = \frac{0.0503s^2 + 0.00503s + 0.0503}{s^3 + 0.2201s^2 + 1.01201s} \quad (3.15.b)$$

transfer işlevleri elde edilmiş olur. 3.15.b transfer işlevine ilişkin kutup ve sıfırlar,

$$p_1 = 0$$

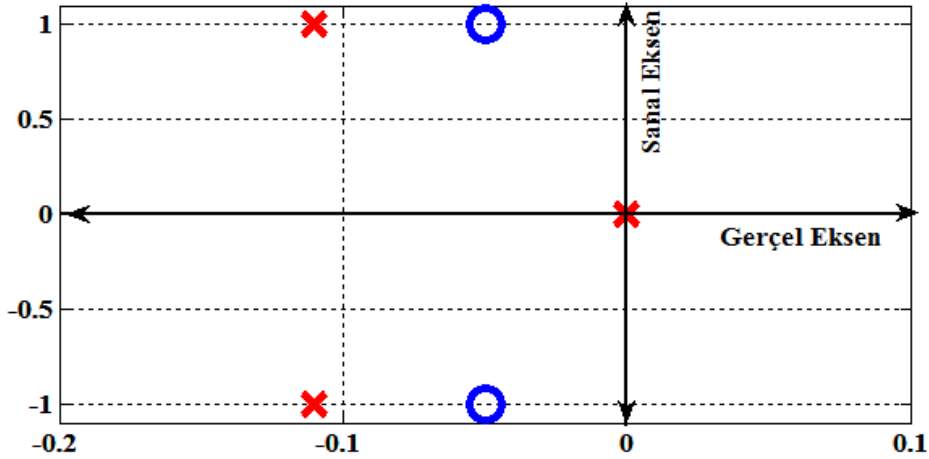
$$p_2 = -0.1100 + 0.9999i$$

$$p_3 = -0.1100 - 0.9999i$$

$$z_1 = -0.05 + 0.9987i$$

$$z_2 = -0.05 - 0.9987i$$

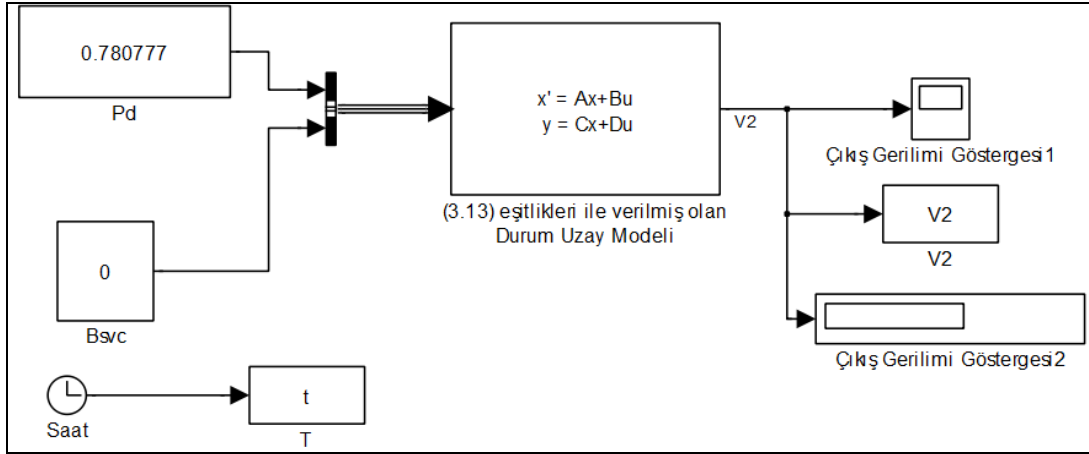
olarak verilebilir. Söz konusu sıfır ve kutupların karmaşık s bölgesi dağılımı ise Şekil 3.8' de verilmiştir.



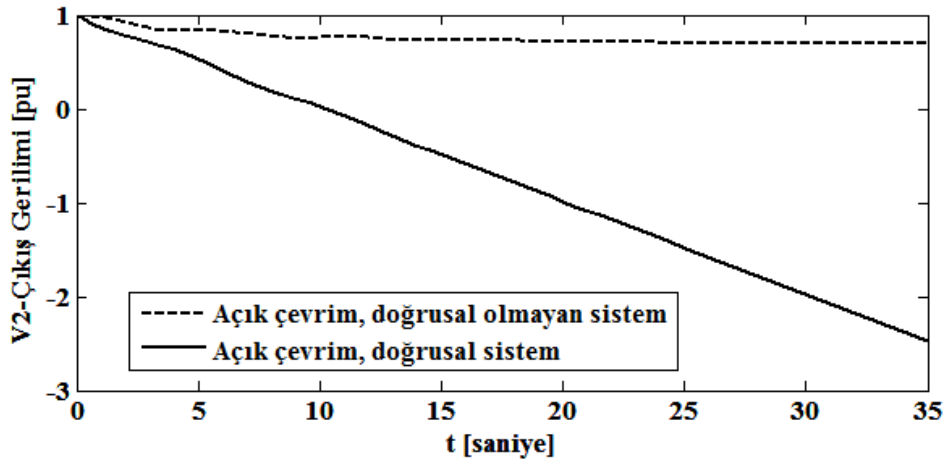
Şekil 3.8. $G_2(s)$ transfer fonksiyonunun kutupları ve sıfırları

Eşitlik 3.15.a ve 3.15.b'den görüldüğü gibi SVC'li güç sistemine ilişkin $G_1(s)$ ve $G_2(s)$ transfer fonksiyonları aynı payda polinomuna sahiptir. Şekil 3.11'den $G_2(s)$ 'ye ilişkin kutup dağılımı incelendiğinde, sağ yarı s düzleminde her hangi bir kutup bulunmayışı ve sanal eksen üzerinde katlı kutup bulunmayışı sistemi kararlı kılmaktadır.

Şekil 3.9'da 3.13 eşitlikleri ile doğrusallaştırılan sistemin simulink ortamında hazırlanmış benzetimine ilişkin blok diyagramı gösterilmiştir. Şekil 3.10'da ise, doğrusal olmayan 3.5 ve (\bar{u}) çalışma noktası civarında doğrusallaştırılmış 3.13 sistemine ilişkin açık çevrim birim basamak cevap eğrileri verilmiştir. Geçici durum davranışlarının daha anlaşılır olarak izleyebilmesi için benzetim süresi 35 saniye olarak seçilmiştir. $B_{svc} = 0$ için elde edilen cevap sistemin doğal cevabıdır.



Şekil 3.9. Doğrusallaştırılmış (3.13) eşitlikleri ile verilen sisteminin açık çevrim simulink benzetimi



Şekil 3.10. Doğrusallaştırılmış 3.13 eşitlikleri ile verilen ve doğrusal olmayan 3.5 eşitlikleri ile verilen SVC'li güç sisteminin birim basamak cevap eğrileri

(b) Kompanzasyonlu olarak çökme noktasında doğrusallaştırılma:

3.7 eşitliği ile verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sisteminin modelini, çökme noktasında aşağıdaki çalışma noktası değerleri için doğrusallaştıralım:

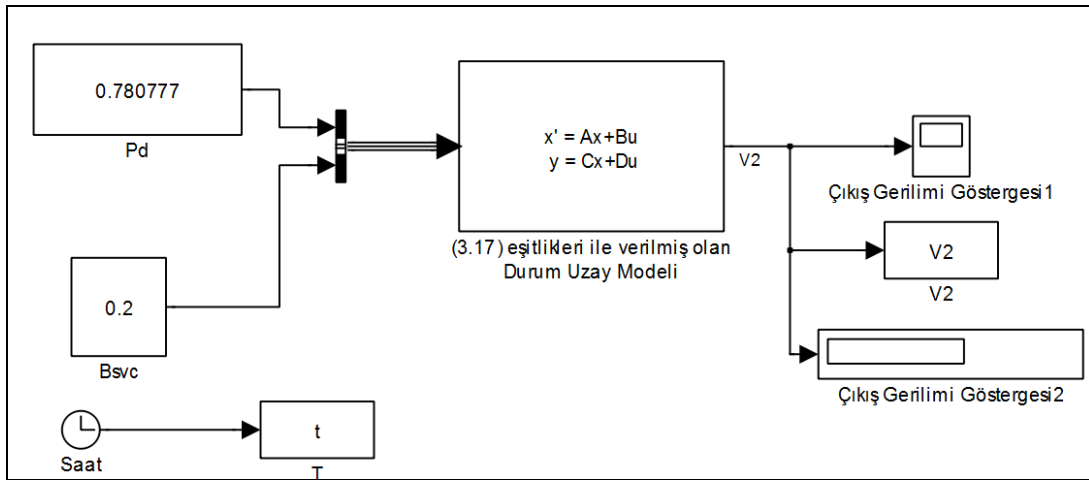
$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_1 = \delta = 0.467, \bar{x}_2 = w = -0.0002, \bar{x}_3 = V_2 = 0.867 \\ \bar{u}_1 = P_d = 0.78077, \bar{u}_2 = B_{svc} = 0.2 \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Bu çalışma noktası değerlerini SVC'li güç sistemi için elde edilen doğrusallaştırılmış 3.11 eşitliğine yerleştirilirse aşağıdaki durum ve çıkış denklemleri elde edilir.

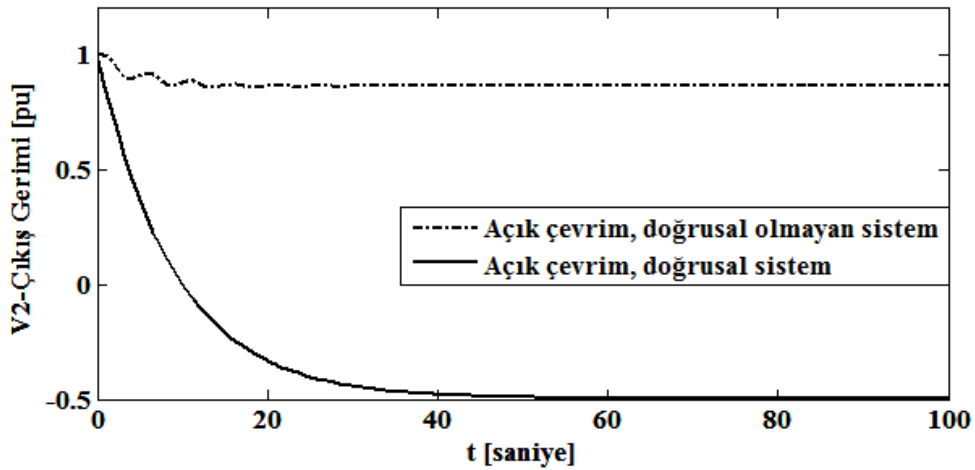
$$\Delta \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1.5483 & -0.1 & -0.9004 \\ -0.0976 & 0 & -0.1669 \end{bmatrix} [\Delta x(t)] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ -0.03125 & 0.0940 \end{bmatrix} [\Delta u(t)] \quad (3.17.a)$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 1][\Delta x(t)] + [0 \ 0][\Delta u(t)] \quad (3.17.b)$$

Şekil 3.11 de durum ve çıkış denklemleri ile verilen doğrusallaştırılmış sistemin modelinde simulink ortamında hazırlanmış blok diyagramı verilmiştir. Şekil 3.12’de ise, doğrusal olmayan 3.5 için çalışma noktası civarında doğrusallaştırılmış 3.17 sistemine ilişkin açık çevrim birim basamak cevap eğrileri verilmiştir. Şekil 3.12’den doğrusal ve doğrusal olmayan sistem cevaplarının farklı kararlılık noktasına ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.11. Doğrusallaştırılmış (3.17) eşitlikleri ile verilen sisteminin açık çevrim simulink benzetimi



Şekil 3.12. Doğrusallaştırılmış 3.17 eşitlikleri ile verilen ve doğrusal olmayan 3.5 eşitlikleri ile verilen SVC'li güç sisteminin birim basamak cevap eğrileri

(c) Farklı bir kompanzasyon ve talep gücü için doğrusallaştırma:

Söz konusu (3.7) SVC'li güç sistemine ilişkin aşağıdaki çalışma noktası değerlerini seçelim:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_1 = \delta = 0.42365, \bar{x}_2 = w = -0.000003763, \bar{x}_3 = V_2 = 0.851389 \\ \bar{u}_1 = P_d = 0.70, \bar{u}_2 = B_{svc} = 0.1 \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Bu çalışma noktası değerlerini SVC'li güç sistemi için elde edilen (3.11) eşitliklerinde yerleştirirsek aşağıdaki doğrusal durum ve çıkış denklemleri elde edilir.

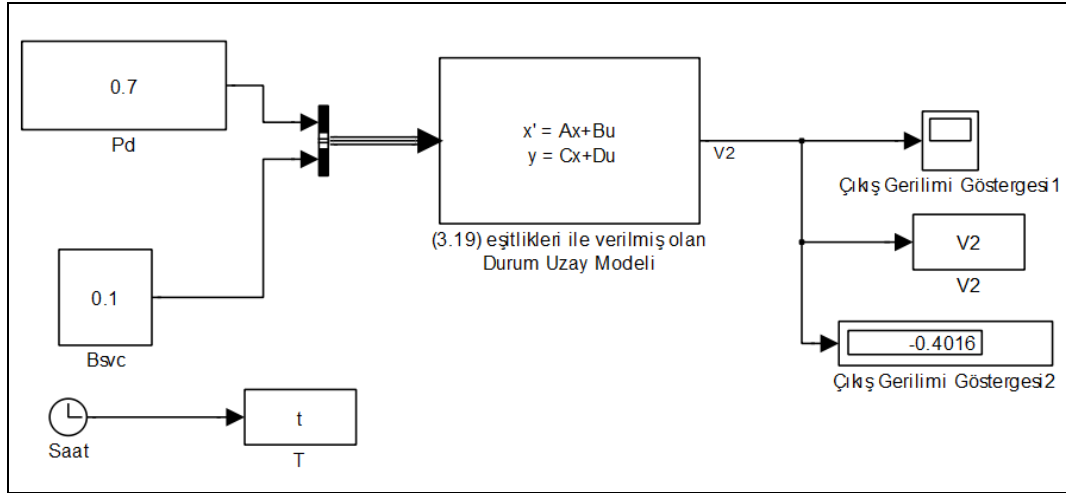
$$\Delta \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1.5522 & -0.1 & -0.8222 \\ -0.0875 & 0 & -0.1765 \end{bmatrix} [\Delta x(t)] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ -0.03125 & 0.0906 \end{bmatrix} [\Delta u(t)] \quad (3.19.a)$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 1][\Delta x(t)] + [0 \ 0][\Delta u(t)] \quad (3.19.b)$$

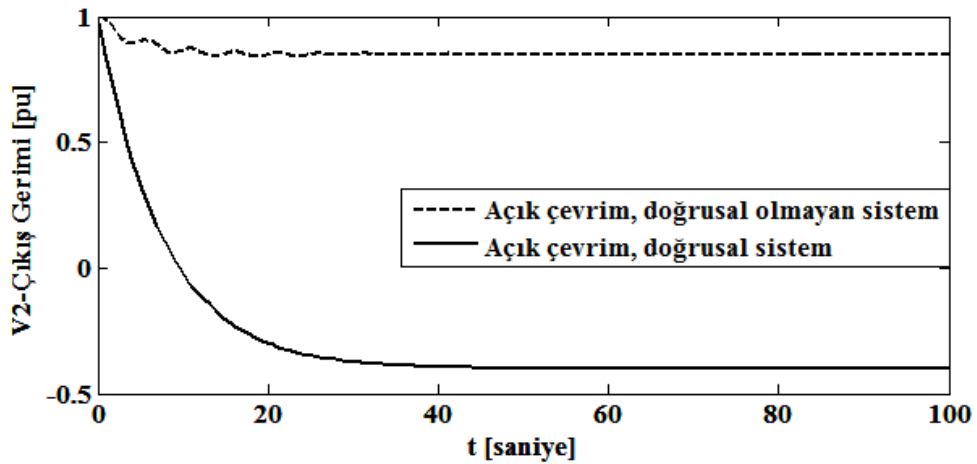
olarak elde edilir.

Şekil 3.13'de 3.19 doğrusallaştırılmış durum ve çıkış denklemleri ile verilen sistemin simulink ortamında hazırlanmış blok diyagramı verilmiştir. Şekil 3.14'de ise,

doğrusal olmayan 3.5 ve 3.18 çalışma noktası civarında doğrusallaştırılmış 3.19 sistemine ilişkin açık çevrim birim basamak cevap eğrileri verilmiştir. Şekil 3.14'den doğrusal ve doğrusal olmayan sistem cevaplarının farklı kararlılık noktasına ulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.13 Doğrusallaştırılmış 3.19 eşitlikleri ile verilen sisteminin açık çevrim simulink benzetimi



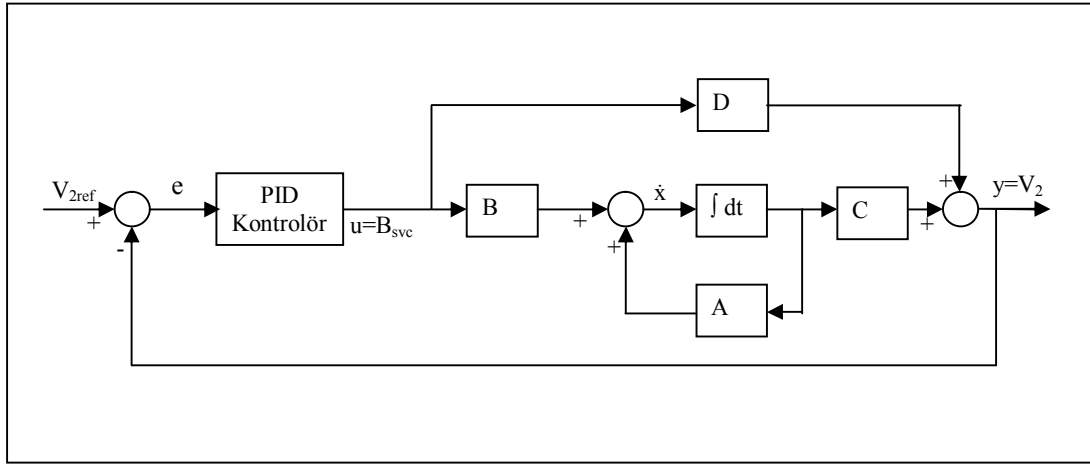
Şekil 3.14. Doğrusallaştırılmış (3.19) eşitlikleri ile verilen ve doğrusal olmayan 3.5 eşitlikleri ile verilen SVC'li güç sisteminin birim basamak cevap eğrileri

3.8. PID Kontrolör Tasarımı

Doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin PID kontrolör tasarımı için öncelikle arzulanan çalışma noktasında doğrusallaştırma gereklidir. Söz konusu çalışma

noktası için elde edilmiş olan doğrusal modelin kontrolüne ilişkin PID parametrelerini belirlemek için literatürde kullanılan pek çok yöntem bulunmaktadır [83,84]. Burada en basit tasarım yöntemlerinden biri olan Ziegler-Nichols yöntemi tercih edilmiştir [83,84,85]. Söz konusu yöntem ile tasarlanan PID kontrolör farklı talep güç değerleri için test edilerek performansı incelenmiştir.

Doğrusal zamanla değişmeyen dinamik bir sisteme ilişkin genel simülasyon diyagramı Şekil 3.15 de verilmiştir. Kontrolör hata girişini kullanarak $u(t)$, B_{svc} sinyallerini üretmektedir.

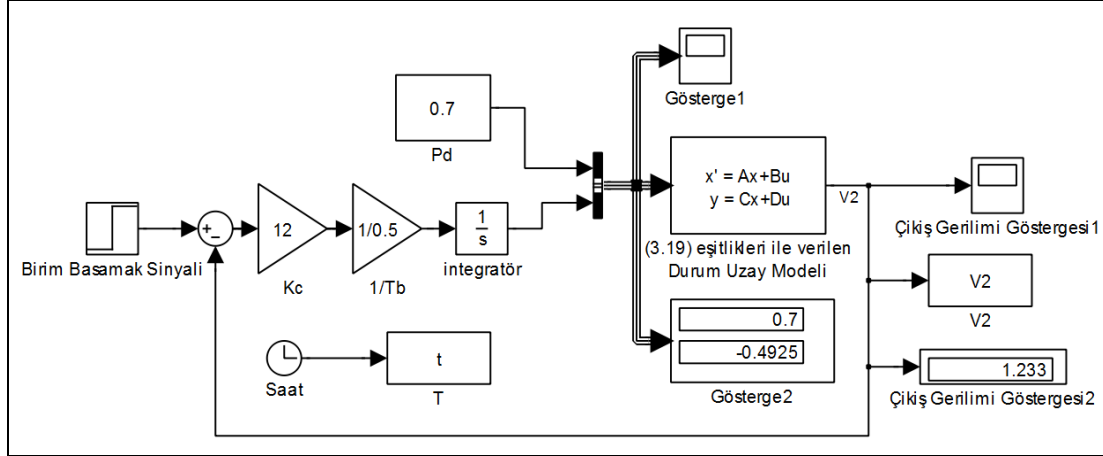


Şekil 3.15. PID tabanlı bir geri beslemeli kontrol sistemine ilişkin benzetim diyagramı

3.8.1. Ziegler-Nichols Yöntemi İle PID Kontrolör Tasarımı

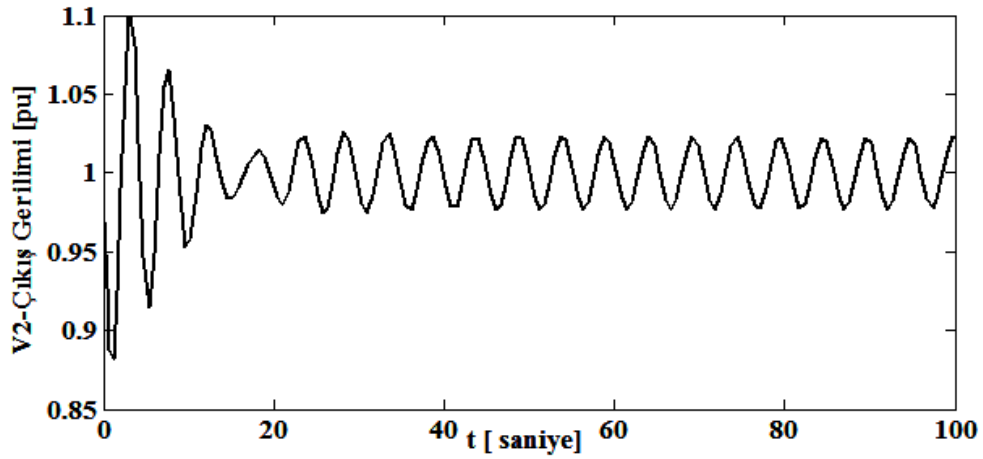
Literatürde Ziegler-Nichols yöntemi olarak bilinen iki farklı tasarım metodu kullanılmaktadır [83,84,85]. Bunlardan biri açık çevrim basamak cevabına dayalı, diğeri ise kapalı çevrimli oransal kontrole dayalıdır. Kapalı çevrimli oransal kontrole dayalı PID parametrelerini hesaplayabilmek için doğrusal sistem kazancı ayarlanabilen oransal kontrolör ile kontrol edilecek sistem çıkışından sabit genlikli bir osilasyon görülene kadar oransal kazanç artırılır. Sistem çıkışında sabit genlikli titreşimin başladığı andaki K_c kazancı kaydedilir. Söz konusu metot ile daha önce açık döngü cevapları elde edilen 3.7 ayrıtındaki (c) benzetim çalışması koşulları için bir PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu benzetim çalışması

koşulları için tasarlanan kontrolöre ait MATLAB/SİMULİNK blok diyagramı Şekil 3.16'da verilmiştir.

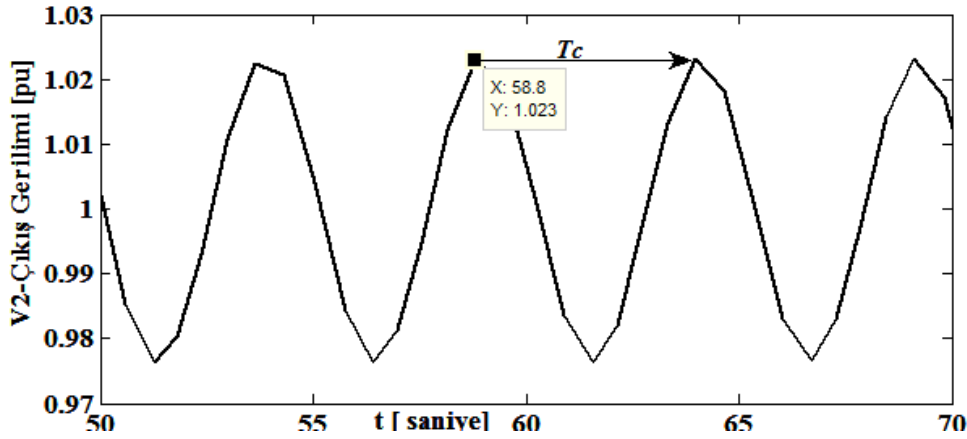


Şekil 3.16. 3.7 ayrıtındaki (c) benzetim çalışma koşulları için oluşturulan PID kontrolör tasarımı simulink ortamı blok gösterimi

Şekil 3.16'daki kontrol sisteminin ayarlanabilir oransal kazancına ilişkin basamak cevabı Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 de verilmiştir.



Şekil 3.17. Şekil 3.16'daki kontrol sisteminin ayarlanabilir oransal kazancına ilişkin basamak cevabı



Şekil 3.18. Şekil 3.16'daki kontrol sisteminin K_c kritik kazancı için basamak cevabı

Zigler-Nichols kapalı çevrim tasarım yöntemiyle elde edilen kritik kazanç K_c ve sabit genlikli titreşim periyodu T_c sabit değerleri kullanılarak Tablo 3.1'den **PID** kontrolör parametrelerini aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz,

$$\left. \begin{aligned}
 T_c &\cong 5 \text{ ve } K_c \cong 12 \\
 K_p &= 0.6 * K_c = 0.6 * (12) = 7.2 \\
 T_i &= 0.5 * T_c = 0.5 * 5 = 2.5 \\
 T_d &= 0.12 * 5 = 6 \\
 P &= K_p = 7.2 \\
 I &= \frac{K_p}{T_i} = \frac{7.2}{2.5} = 2.88 \\
 D &= K_p * T_d = 7.2 * 6 = 43.2
 \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

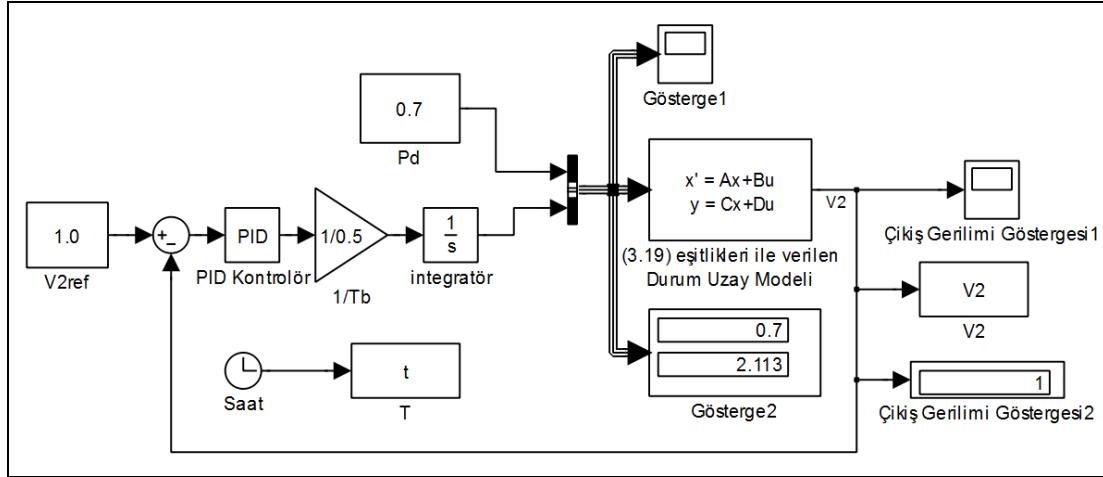
3.8.2. SVC'li güç sisteminin PID tabanlı kontrolü

3.5 türevsel eşitlikleri ile verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sistemi ve değişik çalışma koşulları için doğrusallaştırılmış modelleri kullanarak PID tabanlı kontrole ilişkin benzetim çalışmaları yapılmıştır. Söz konusu çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

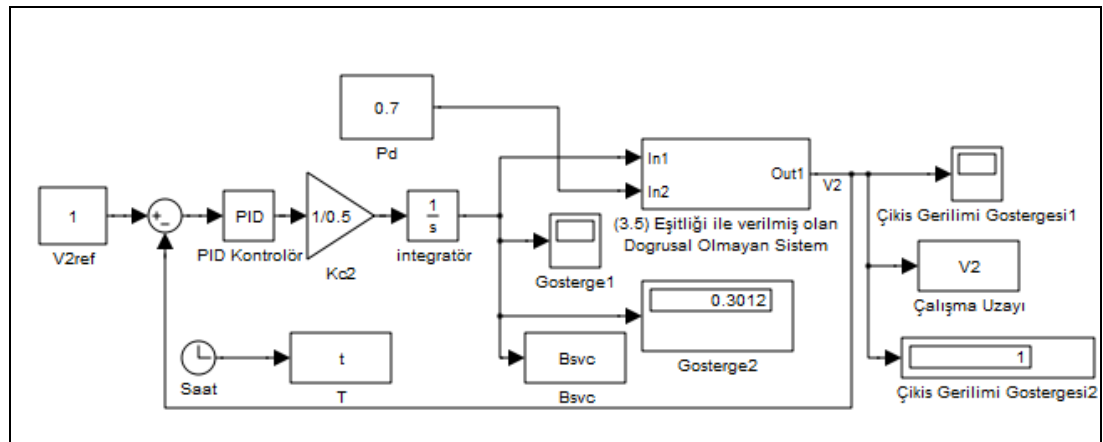
(a) Düşük talep güçlerinde PID tabanlı kontrol:

3.5 türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sisteminin 3.7 ayrıtındaki (c) çalışma koşulları için doğrusallaştırılmış durum uzay modeli 3.19

eşitlikleri ile verilmiştir. Söz konusu sistemin, Şekil 3.19 da doğrusal kapalı çevrim ve Şekil 3.20 ise doğrusal olmayan kapalı çevrim PID kontrol için simulink blok gösterimi verilmiştir.

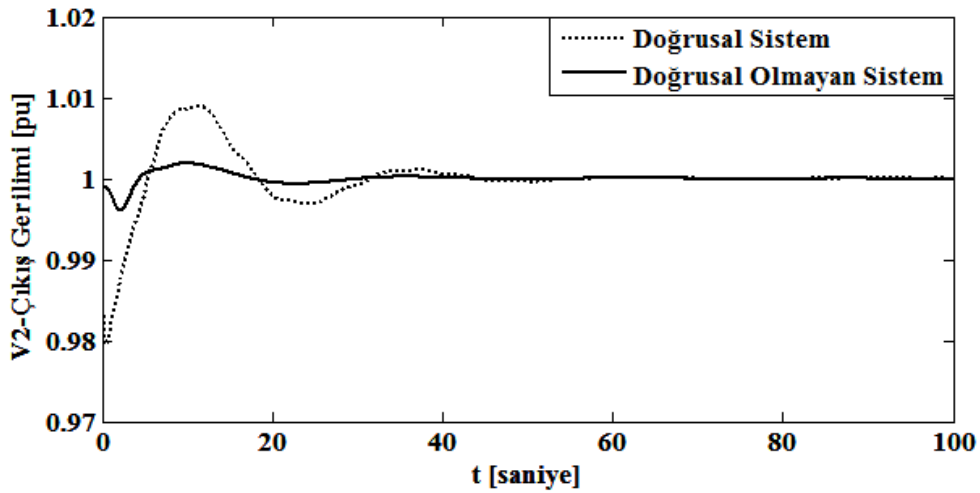


Şekil 3.19. 3.19 eşitlikleri ile verilen doğrusal SVC'li güç sistemine ilişkin PID kontrol simulink benzetimi



Şekil 3.20. 3.5 türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin PID kontrol simulink benzetimi

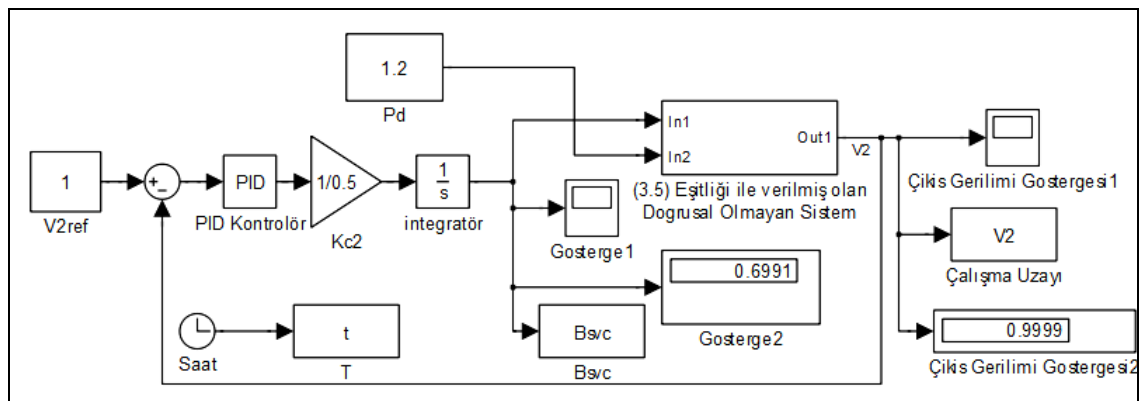
Tasarlanan PID kontrolör için, Şekil 3.19 ve 3.20 ile verilen doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin simulink benzetimleri kullanılarak, birim basamak cevap eğrileri Şekil 3.21'de verilmiştir. Şekil 3.21'den doğrusal ve doğrusal olmayan sistem cevapları aynı kararlılık noktasına ulaştığı görülmektedir.



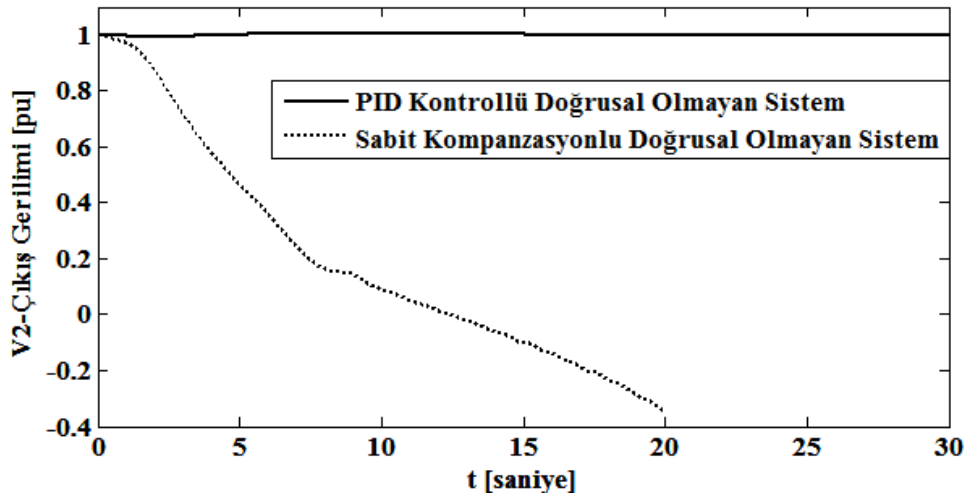
Şekil 3.21. Şekil 3.19 ve 3.20 ile verilen doğrusallaştırılmış ve doğrusal olmayan sistemlerin birim basamak cevap eğrileri

(b) Yüksek talep güçlerinde PID tabanlı kontrol:

Kontrolörümüzün performansını test etmek için daha yüksek talep güç durumunda incelemek için, Şekil 3.22 de doğrusal olmayan kapalı çevrim kontrolör yapıları verilmiştir. $P_d=1.2$ pu seçilirse ve kontrolörlü ve kontrolörsüz ve sabit $B_{svc}=0.1$ pu doğrusal olmayan sistemin performansları, Şekil 3.23 verilen V_2 gerilim cevabı incelenerek görülebilir. Sistemde kullanılan kontrolör, $B_{svc}=0.1$ pu ve $P_d=0.7$ pu için tasarlanmıştır olan kontrolördür. Kontrolörlü sistemde $V_{2ref} = 1.0$ pu alınmıştır.



Şekil 3.22. 3.5 türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin yüksek talep güçlerde PID kontrol simülasyon benzetimi



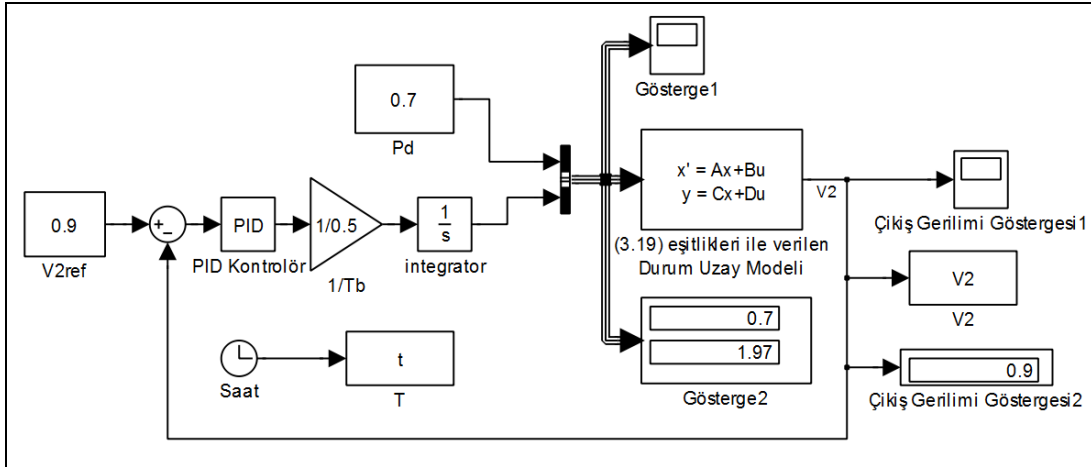
Şekil 3.23. Şekil 3.22 ile verilen doğrusal olmayan SVC'li ve SVC'siz sistemlerin birim basamak cevap eğrileri

Tasarlanan PID kontrolör doğrusal olmayan sistemin daha yüksek talep güç ve referans geriliminde, kontrolsüz sisteme göre performansı test edilirse Şekil 3.23'de verilen kontrolsüz sistem çökerken kontrollü sistem referans gerilimi yakalamaktadır.

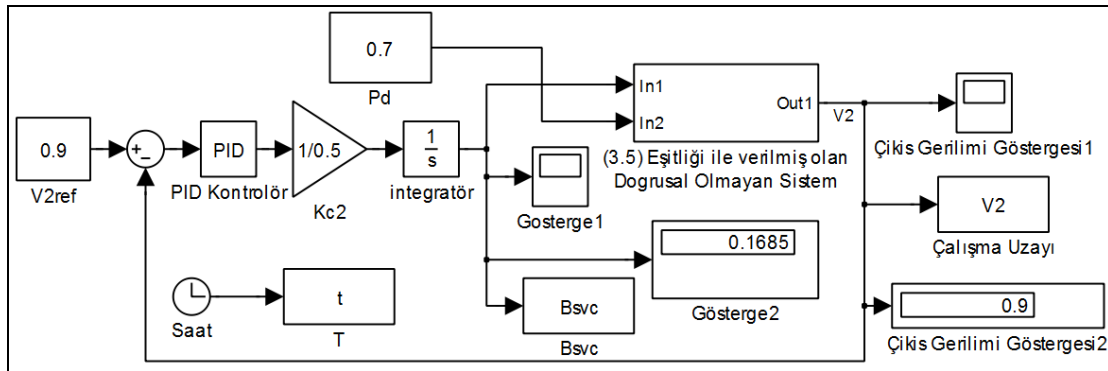
(c) Farklı bir referans gerilimi için PID tabanlı kontrol:

Sistemde kullanılan kontrolör, $B_{svc}=0.1$ pu ve $P_d=0.7$ pu için tasarlanmıştır olan kontrolördür. Kontrolörlü sistemde $V_{2ref} = 0.9$ pu alınmıştır.

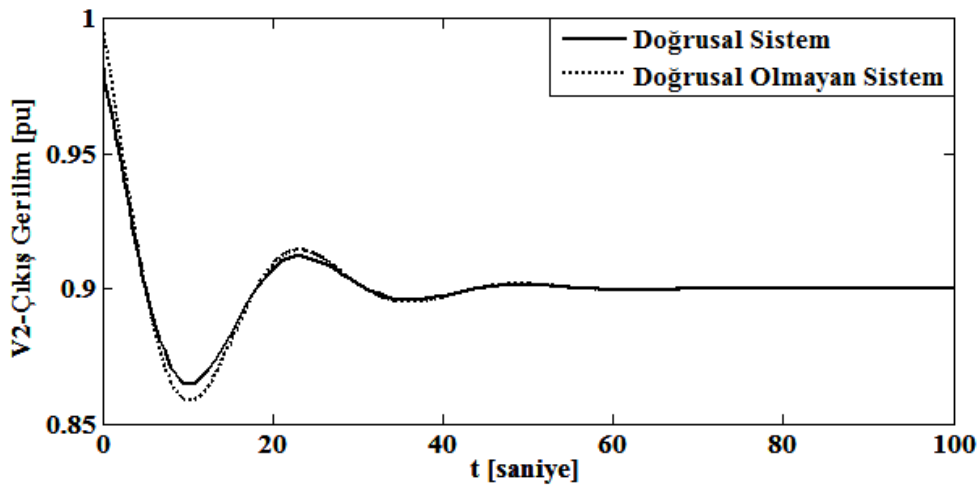
Tasarlanan PID kontrolörün, Şekil 3.24 ve 3.25'de doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde performansı test edildiğinde Şekil 3.26'da verilen sonuç elde edilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan sistem cevapları aynı kararlılık noktasına gitmektedir.



Şekil 3.24. Farklı bir referans gerilimi için 3.19 eşitlikleri ile verilen doğrusal SVC'li güç sistemine ilişkin PID kontrol simulink benzetimi



Şekil 3.25. 3.5 türevsel denklemleriyle verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sistemine ilişkin farklı bir referans gerilimi için PID kontrol simulink benzetimi



Şekil 3.26. Şekil 3.24 ve 3.25 ile verilen doğrusallaştırılmış ve doğrusal olmayan sistemlerin birim basamak cevap eğrileri

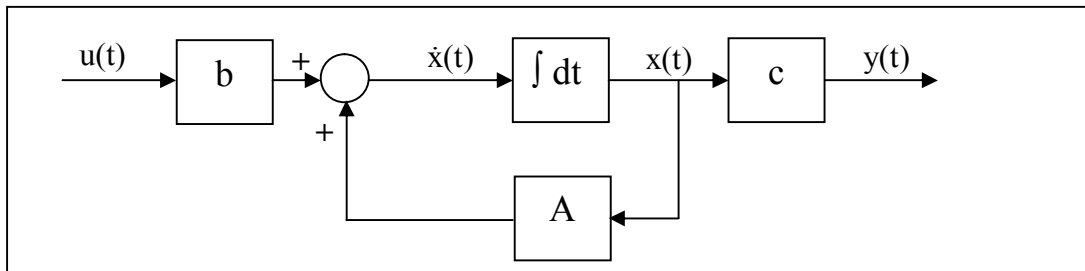
BÖLÜM4. KUTUP YERLEŞTİRME

Durum uzayı yöntemlerinin doğrusal sistemlere ilk uygulamalarından biri, verilen bir sistemin öz değerlerini geliő güzel yerleőtirebilmek için kullanılması idi. 1962 yılında Rosenbrock en iyi cevap karakteristiğini elde edebilecek biçimde sistemin öz değerlerini yerleőtirebilmek için geri beslemenin kullanımını ortaya koymuştur. Fakat tam bir analiz elde edilmemiőtir [82].

Kutup yerleştirme, modern kontrol teorisinde dinamik doğrusal sistemlerin kutuplarını karmaşık s düzleminde istenilen yerlere yerleştirme bakımından önemli bir kavramdır. Bu teknikte doğrusal dinamik sistemin durum vektörü uygun bir kazanç matrisi ile çarpılarak sisteme geri besleme uygulanır. Söz konusu kazanç matrisi geri beslemeli sistemin kutuplarını arzu edilen değerlerde seçecek şekilde hesaplanır. Hesaplama için literatürde Bass ve Gura, Ackerman vb. teknikler vardır [82,86].

4.1. Kutup Yerleştirme Yöntemleri

Denetlenecek olan tek girişli/tek çıkışlı dinamik sistem (S) olmak üzere, durum uzayı benzetim diyagramı Şekil 4.1'de verilmiştir.



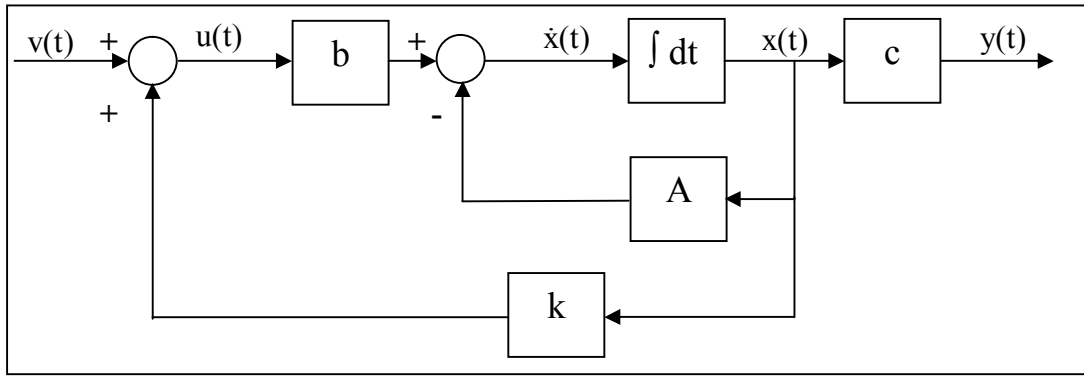
Şekil 4.1. Tek girişli/ tek çıkışlı sistem için durum uzayı benzetim diyagramı

Söz konusu sisteme ilişkin durum ve çıkış denklemleri,

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{c}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

olarak yazılır.

Sistemin durum değişkenlerini kullanarak öz değerlerini gelişi güzel seçmeye çalışalım. Bu amaçla, sisteme \mathbf{k} geri beslemesi uygulayalım.



Şekil 4.2. Geri beslemeli kontrol sistemine ilişkin simülasyon diyagramı

Şekil 4.2 ile verilen geri beslemeli kontrol sistemine ilişkin durum ve çıkış denklemleri,

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= (\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k})\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}v(t) \\ y(t) &= \mathbf{c}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

olarak yazılabilir. Burada,

$u(t) = v(t) - \mathbf{k}\mathbf{x}(t)$ ve $\mathbf{k} = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n]$ geri besleme satır vektörü olup geri beslemeli sistemin karakteristik polinomu,

$$a_k(s) = \det(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{k}) = s^n + a_{k1}s^{n-1} + a_{k2}s^{n-2} + \dots + a_{k(n-1)}s + a_{kn} \quad (4.3)$$

olarak yazılabilir. Son bağıntıdan $a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}$ katsayıları \mathbf{k} 'nın elemanlarına bağlıdır. \mathbf{k} 'nın belirlenmesi yukarıda sözü edilen hesaplama yöntemleriyle yapılabilir. Kutup yerleştirmede, \mathbf{k} geri besleme kazanç satır vektörünün belirlenmesi kontrolör tasarımı olarak isimlendirilir. Bu bağlamda kutup yerleştirme üç farklı biçimde gerçekleştirilebilir[82,86].

- 1- Klasik yöntemi
- 2- Bass ve Gura yöntemi
- 3- Ackerman yöntemi

4.1.1. Klasik Çözüm Yöntemi

$\alpha(s)$, geri beslemeli (4.2) sisteminin amaçlanan geri beslemeli karakteristik polinomu ve $a_k(s) = \det(s\mathbf{I}-\mathbf{A}+\mathbf{bk})$ geri beslemeli (4.2) sisteminin karakteristik polinomu, olmak üzere, \mathbf{k} geri besleme kazanç satır vektörün $a_k(s) = \alpha(s)$ eşitliği sağlanacak biçimde seçilmelidir.

4.1.2. Bass ve Gura Çözüm Yöntemi

(4.2) geri beslemeli sistemi için $\alpha(s)$ arzu edilen karakteristik polinom $a_k(s)$ ise geri beslemeli sisteminin polinomu olmak üzere,

$$\alpha(s)=a_k(s) \quad (4.4)$$

eşitliği sağlanmalıdır. (4.4) eşitliğinin sağ yanındaki $a_k(s)$ karakteristik polinomuna ilişkin aşağıdaki düzenlemeleri yapalım.

$$\left. \begin{aligned} a_k(s) &= \det(s\mathbf{I}-\mathbf{A})\det[\mathbf{I}+(s\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{bk}] \\ a_k(s) &= a(s)[1+\mathbf{k}(s\mathbf{I}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{b}] \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Son ifadeyi (4.4) eşitliğinde yerleştirip gerekli düzenlemeleri yaparsak,

$$\alpha(s)-a(s) = a(s) \mathbf{k}(\mathbf{sI}-\mathbf{A})^{-1}\mathbf{b} \quad (4.6)$$

ifadesi elde edilir. Son bağıntıdaki $(\mathbf{sI}-\mathbf{A})^{-1}$ ifadesi yerine,

$$\begin{aligned} (\mathbf{sI}-\mathbf{A})^{-1} &= \frac{\text{adj}(\mathbf{sI}-\mathbf{A})}{\det(\mathbf{sI}-\mathbf{A})} \\ &= \frac{s^{n-1}\mathbf{I} + s^{n-2}(\mathbf{A} + a_1\mathbf{I}) + s^{n-3}(\mathbf{A}^2 + a_1\mathbf{A} + a_2\mathbf{I}) + \dots + (\mathbf{A}^{n-1} + a_1\mathbf{A}^{n-2} + \dots + a_{n-1}\mathbf{I})}{a(s)} \end{aligned} \quad (4.7)$$

biçiminde gösterimi yerleştirilirse;

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 - a_1 &= \mathbf{k}\mathbf{b} \\ \alpha_2 - a_2 &= \mathbf{k}\mathbf{A}\mathbf{b} + a_1\mathbf{k}\mathbf{b} \\ \alpha_3 - a_3 &= \mathbf{k}\mathbf{A}^2\mathbf{b} + a_1\mathbf{k}\mathbf{A}\mathbf{b} + a_2\mathbf{k}\mathbf{b} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada,

$\alpha(s)$: Keyfi olarak seçilen kapalı çevrimli sistemin karakteristik polinomu olup, sonuç olarak:

$\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$: satır vektörü

$\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]$: satır vektörü

$\mathbf{Q}_c = [\mathbf{b} \quad \mathbf{A}\mathbf{b} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{b}]$: Durum denetlenebilirlik matrisi ve

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & 0 & \dots & . \\ . & . & . & 1 & 0 & . \\ . & . & . & . & 1 & 0 \\ a_{n-1} & a_{n-2} & . & . & . & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

\mathbf{T} alt üçgen toeplitz matris olmak üzere,

$$\mathbf{k} = (\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{a})(\mathbf{T}^{-1})^T \mathbf{Q}_c^{-1} \quad (4.10)$$

ifadesiyle Bass-Gura formülü elde edilir.

4.1.3. Ackermann Çözüm Yöntemi

Durum geri besleme için satır vektörü \mathbf{k} aşağıda verilen Ackermann formülüyle kolaylıkla hesaplanabilir [82,86].

$$\mathbf{k} = \mathbf{q}_n^T \alpha(\mathbf{A}) \quad (4.11)$$

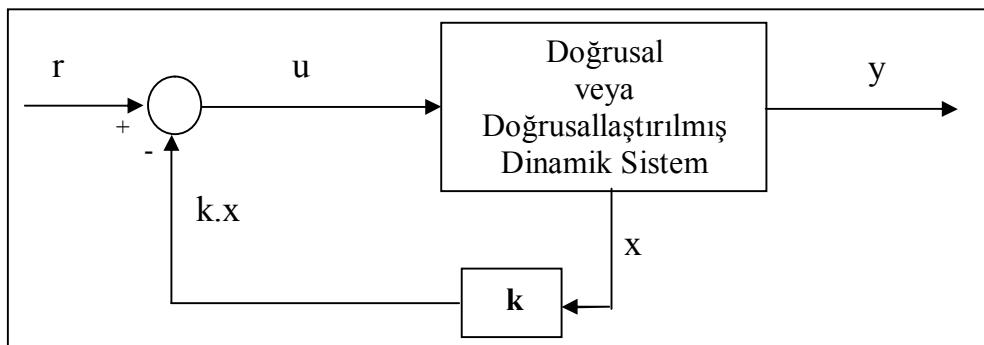
(4.11) eşitliğindeki fonksiyonlar açık olarak,

$$\left. \begin{aligned} \alpha(\mathbf{A}) &= \mathbf{A}^n + \alpha_1 \mathbf{A}^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} \mathbf{A} + \alpha_n \mathbf{I} \\ \mathbf{q}_n^T &= [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1] \mathbf{Q}_c^{-1} \\ \mathbf{Q}_c^{-1} &= [\mathbf{b} \ \mathbf{A}\mathbf{b} \ \mathbf{A}^2\mathbf{b} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{b}] \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

ifade edilir. Burada, $\alpha(s)$: Arzu edilen geri beslemeli sistemin karakteristik polinomudur.

4.2. Kendinden Ayarlamasız Kutup Yerleştirme

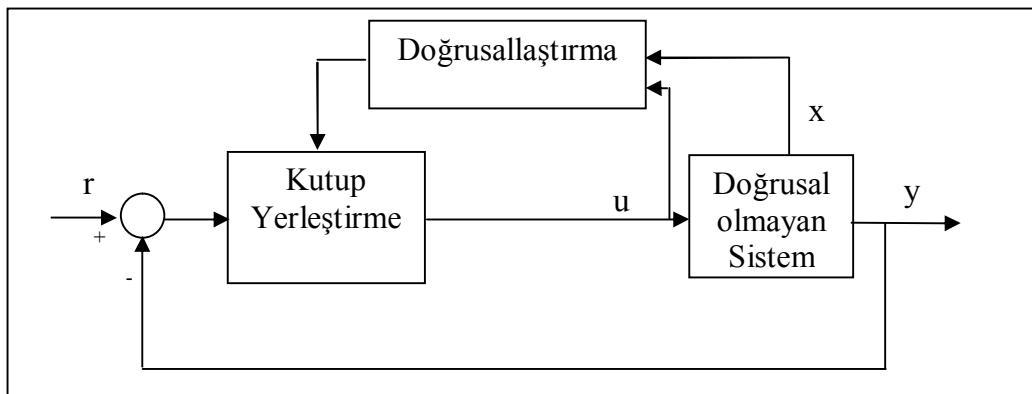
Bu tür kutup yerleştirmede sistem doğrusal ise doğrusal sistemin, doğrusal değil ise doğrusallaştırılmış durum uzay modeli kullanılır. Durum geri besleme kazanç vektörü \mathbf{k} , Klasik, Bass ve Gura veya Ackermann çözüm yöntemlerinden birisiyle hesaplanır. Söz konusu geri beslemeli sisteme ilişkin genel blok gösterimi Şekil 4.3' de verilmiştir. Sistem belirli bir referans girişi için analiz edilebilir [87,88].



Şekil 4.3. Kendinden ayarlamasız kutup yerleştirilmeye ilişkin genel blok gösterimi

4.3. Kendinden Ayarlamalı Kutup Yerleştirme

Bu tür kutup yerleştirmede doğrusal olmayan sistemin değişmekte olan her bir çalışma noktası için doğrusallaştırılmış durum uzay modeli ayrı ayrı elde edilir. Elde edilen her bir doğrusallaştırılmış model için gerekli k kazanç vektörü, Klasik, Bass ve Gura veya Ackermann özüm yöntemlerinden biriyle hesaplanır. Söz konusu geri beslemeli sisteme ilişkin genel blok gösterimi Şekil 4.4’de verilmiştir. Sistem belirli bir referans girişi için analiz edilebilir [87,88].



Şekil 4.4. Kendinden ayarlamalı kutup yerleştirilmeye ilişkin genel blok gösterimi

4.4. SVC’li Güç Sisteminin Kutup Yerleştirme Tabanlı Kontrolü

Buraya kadar anlatılan kutup yerleştirme türleri doğrusal olmayan SVC’li güç sistemine uygulanarak gerekli analizler yapılmıştır.

4.4.1. Kendinden Ayarlamalı Kutup Yerleştirme Tekniği ile Kontrolü

Doğrusal olmayan iki baralı SVC’li güç sistemi (Test Sistemi) için öncelikle bir çalışma noktası seçilmiştir. Sistemin alışma noktasına taşınabilmesi için gerekli k geri besleme kazanç vektörünü hesaplayan bir algoritma geliştirilmiştir.

İki baralı SVC’li güç sistem modeli için seçilen çalışma noktası değerlerini,

$$\delta = 0.3622, \quad V_2 = 0.8465, \quad Pd = 0.6, \quad w = -0.0000046, \quad u_2 = B_{svc} = 0 \quad (4.13)$$

olarak seçelim. Bu çalışma noktası değerleri SVC'li güç sistemine ilişkin (3.11) doğrusal eşitliğinde yerleştirilirse,

$$\Delta \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1.5832 & -0.1 & -0.7087 \\ -0.075 & 0 & -0.1895 \end{bmatrix} [\Delta x(t)] + B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0896 \end{bmatrix} [\Delta u(t)] \quad (4.14)$$

$$y(t) = [0 \ 0 \ 1][\Delta x(t)] + [0][\Delta u(t)]$$

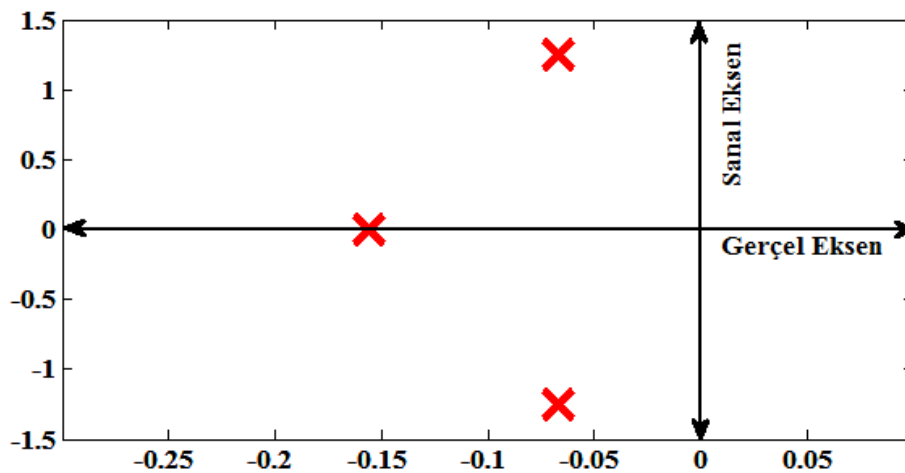
doğrusal modeli elde edilir. Bu doğrusal modelin öz değerleri veya kutupları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\det(s\mathbf{I}-\mathbf{A}) = \det \begin{bmatrix} s & -1 & 0 \\ 1.5832 & s+0.1 & 0.7087 \\ 0.075 & 0 & s+0.1895 \end{bmatrix} = 0$$

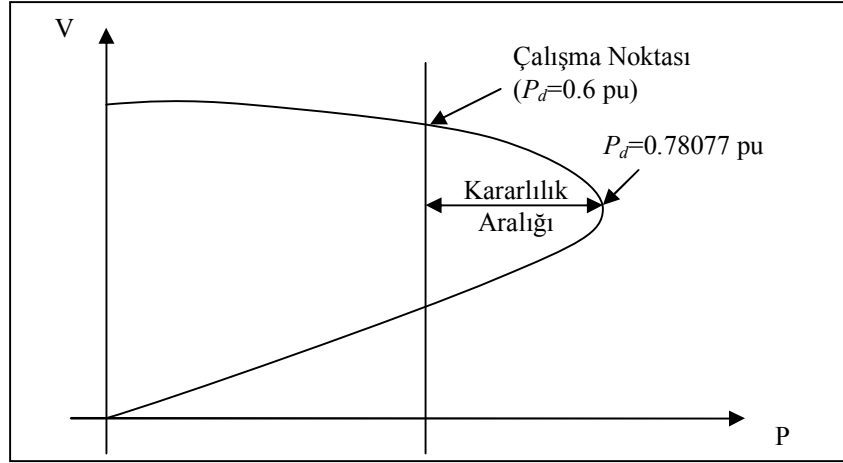
$$s(s+0.1)(s+0.1895) + 1.5832(s+0.1895) - 0.7085 \cdot 0.075 = 0$$

$$s_1 = -0.0667 + 1.2557i, \quad s_2 = -0.0667 - 1.2557i, \quad s_3 = -0.1561 \quad (4.15)$$

Seçilen 4.13 çalışma noktası değerlerine ilişkin hesaplanan 4.15 kutuplar Şekil 4.5'de, kritik noktaya kadar kararlılık aralığı ise Şekil 4.6'da verilmiştir.

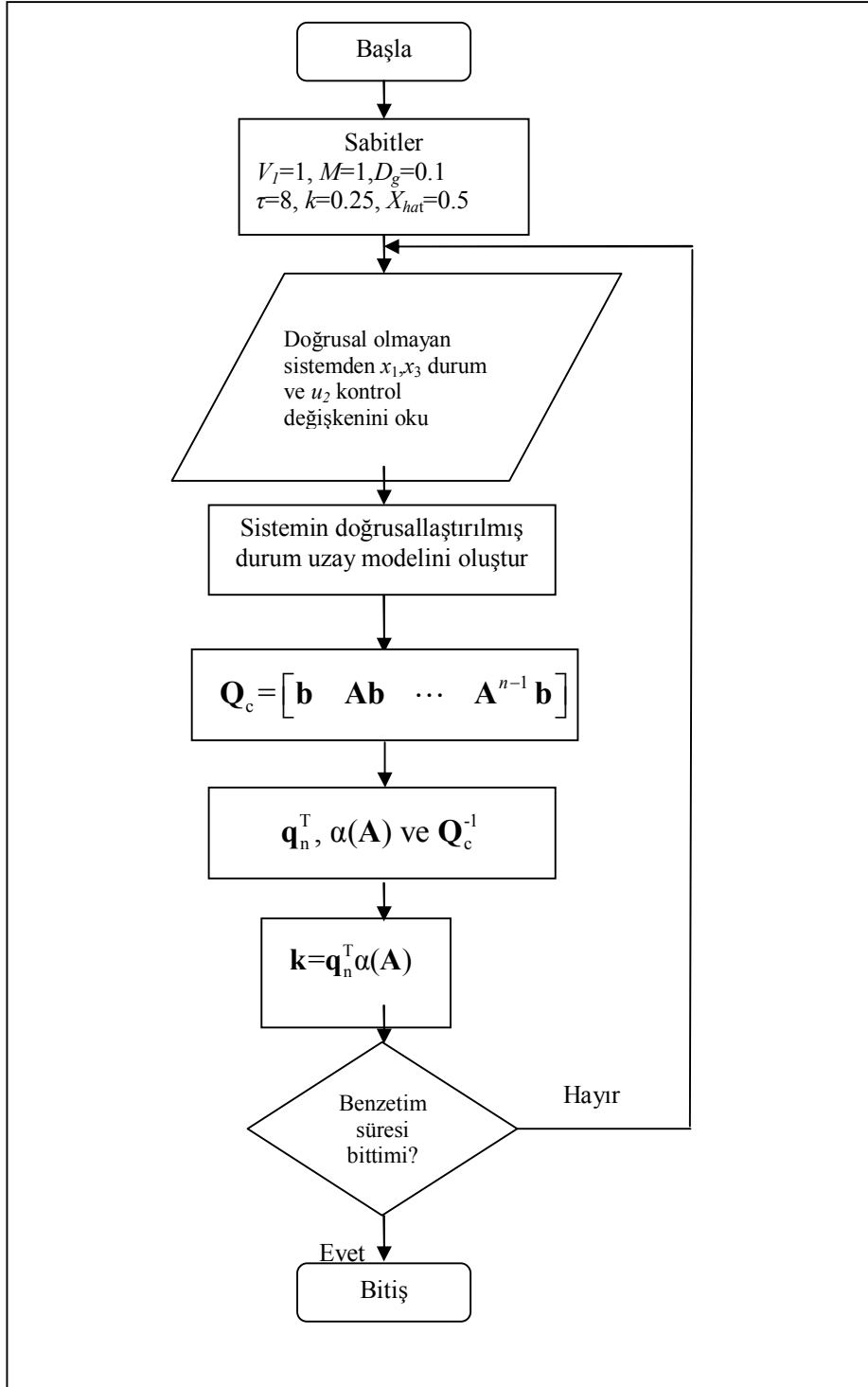


Şekil 4.5. Doğrusallaştırılmış SVC'li güç sistemi kutupları

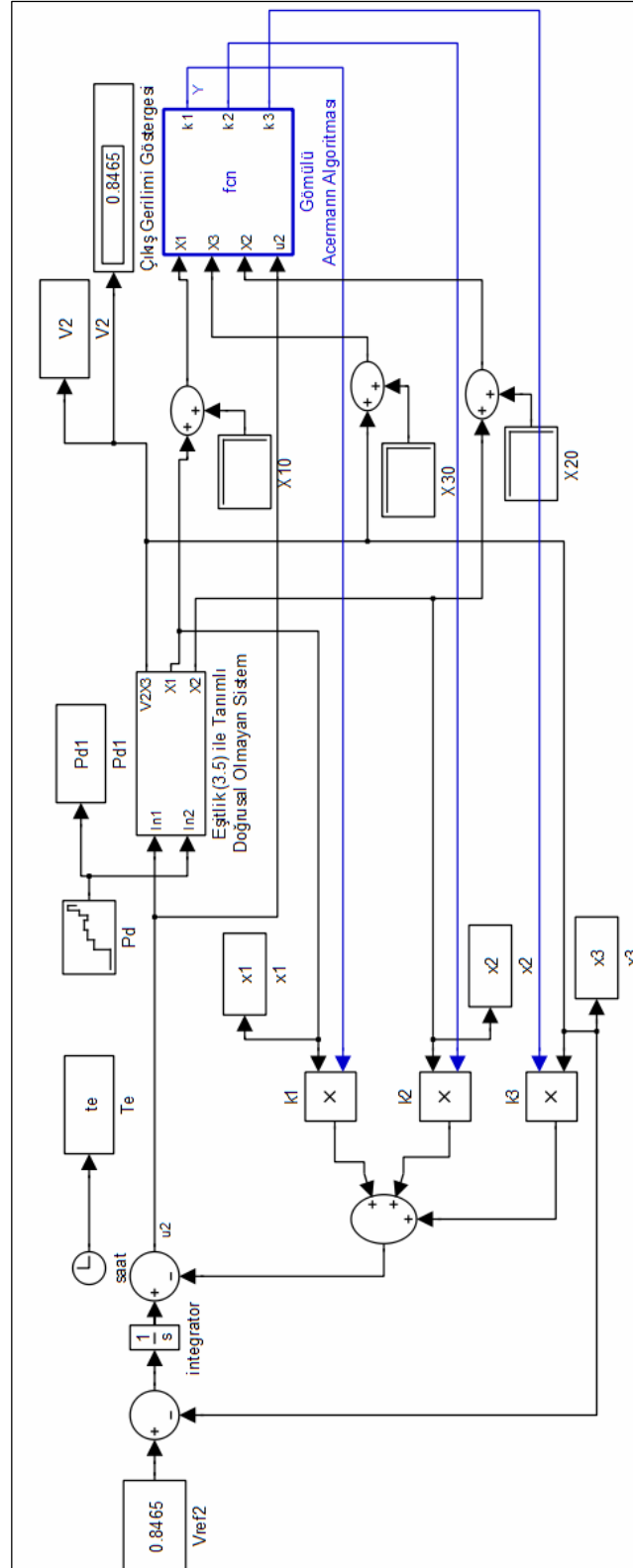


Şekil 4.6. Doğrusallaştırılmış SVC'li güç sistemine ilişkin kararlılık aralığı [89]

Şekil 4.7'de 3.5 eşitliği ile verilen doğrusal olmayan SVC'li güç sisteminin değişen çalışma noktalarına ilişkin gerekli k geri besleme kazanç vektörünün hesaplanmasına ilişkin kontrol algoritması program akış diyagramı verilmiştir. Şekil 4.8'de ise, aynı güç sisteminin MATLAB/SİMULİNK kapalı çevrim kontrol yapısı verilmiştir.



Şekil 4.7. Doğrusal olmayan (3.5) eşitliği ile verilmiş olan SVC'li güç sistemine ilişkin kontrol algoritması program akış diyagramı



Şekil 4.8. Doğrusal olmayan 3.5 eşitliği ile verilmiş olan SVC'li güç sisteminin kendinden ayarlamalı kutup yerleştirme kapalı çevrim simulink benzetimi

4.4.2. Kendinden ayarlamalı YSA (Yapay Sinir Ağı) tabanlı kutup yerleştirme tekniği ile kontrol

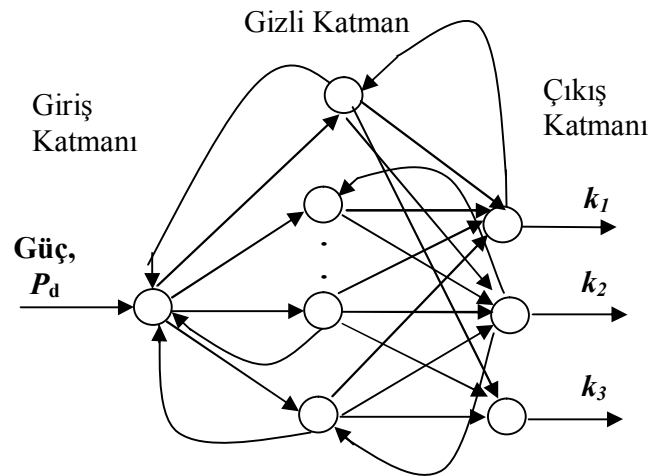
Yapay sinir ağları, insan beyninden esinlenerek geliştirilmiş, ağırlıklı katsayılar aracılığıyla birbirine bağlanan bellekli işlem elemanlarından oluşan paralel ve dağıtılmış bilgi işleme yapılarıdır. Farklı bir ifade ile, biyolojik sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Genel olarak yapay sinir ağları model seçimi ve sınıflandırılması, işlev tahmini, en uygun değerleri bulma ve veri sınıflandırılması gibi alanlarda başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [90].

Geri yayılım ağı, 1970'lerin başında geliştirilmiş, karmaşık ve modeli tanımlanmamış sistemlere doğrusal olmayan çözümler sunan bir metottur. Tipik bir geri yayılım ağı, bir giriş katmanı, bir çıkış katmanı ve en az bir gizli katmandan oluşur. Geri yayılım ağlarında katman sayısı ve her katmandaki düğüm sayısı dikkatle seçilmelidir. Giriş verisi ve istenilen çıkış arasındaki ilişkinin karmaşıklığı artınca, gizli katmanlardaki işleme elemanlarının sayısı da artmalıdır. Çok fazla sayıda gizli katman kullanılırsa ağda yalnızca ezberleme ortaya çıkar ve yanlış sonuçlara yol açabilir. Öğretme sürecinde, eğitim verisi ağın giriş katmanına uygulanır ve istenen çıktılar çıkış katmanında karşılaştırılır. Öğrenme süreci esnasında, ağ boyunca bir ileri tarama yapılır ve her bir düğümün çıktısı katman katman hesaplanır. En son katmanın çıktısı ile istenilen çıktı arasındaki fark, genellikle aktarım işlevinin türevi tarafından değiştirilen bir önceki katmana geri yayılır ve bağlantı bağıl değerleri Delta Kuralını kullanarak ayarlanır. Geri yayılım ağı için, öğrenme kurallarının bir çok çeşidi vardır [90].

Bu tezde kendinden ayarlamalı veri hesaplamalarını hızlandırmak amacıyla YSA kutup yerleştirme modeli gerçekleştirilmiştir. Bu modelin kullanımı ile geri besleme satır vektörü k YSA ile kısa bir sürede hesaplanabilmektedir. Kendinden ayarlamalı kutup yerleştirme işleminde P_d 'nin 0.48-1.0 pu değer aralığı için elde edilen ve Tablo 4.1'de verilen k satır vektör tablosundan yararlanarak YSA kutup yerleştirmeli geri beslemeli sistemin yapısı Şekil 4.9'daki gibi elde edilmiştir. Tablo içerisinden 20 adet eğitim ve 5 adet test verisi kullanılmıştır.

Tablo 4.1. YSA geri yayımlı ağ yapısı için k satır vektörü bilgileri

P_d	[0.48 0.5 0.53 0.55 0.57 0.6 0.62 0.63 0.65 0.67 0.69 0.7 0.72 0.74 0.76 0.78 0.79 0.82 0.84 0.86 0.89 0.91 0.94 0.98];
k	0.5*[0.5275 0.7896 -0.1654; 0.4309 0.6483 - 0.1389;0.2938 0.4469 -0.09872; 0.2063 0.3142 - 0.07101; 0.1228 0.1912 -0.04337; 0.0004027 - 0.002028 0.0004527; -0.07513 -0.1089 0.02847; - 0.1126 -0.1654 0.04321; -0.1875 -0.2848 0.07382;- 0.2559 -0.3737 0.1015; -0.3306 -0.5092 0.1358;- 0.3678 -0.5789 0.1536; -0.433 -0.668 0.1831; - 0.4982 -0.7647 0.2142; -0.5653 -0.878 0.2486; - 0.6287 -0.9753 0.2813; -0.6632 -1.041 0.3007; - 0.7533 -1.172 0.3491; -0.8156 -1.276 0.3851; - 0.8751 -1.37 0.4199; -0.9651 -1.52 0.4752;-1.023 - 1.614 0.5119; -1.111 -1.76 0.569; -1.225 -1.955 0.6476];



Şekil 4.9. Doğrusal olmayan 3.5 eşitliği ile verilen SVC'li güç sistem modelinde kullanılan geri yayımlı ağ yapısı

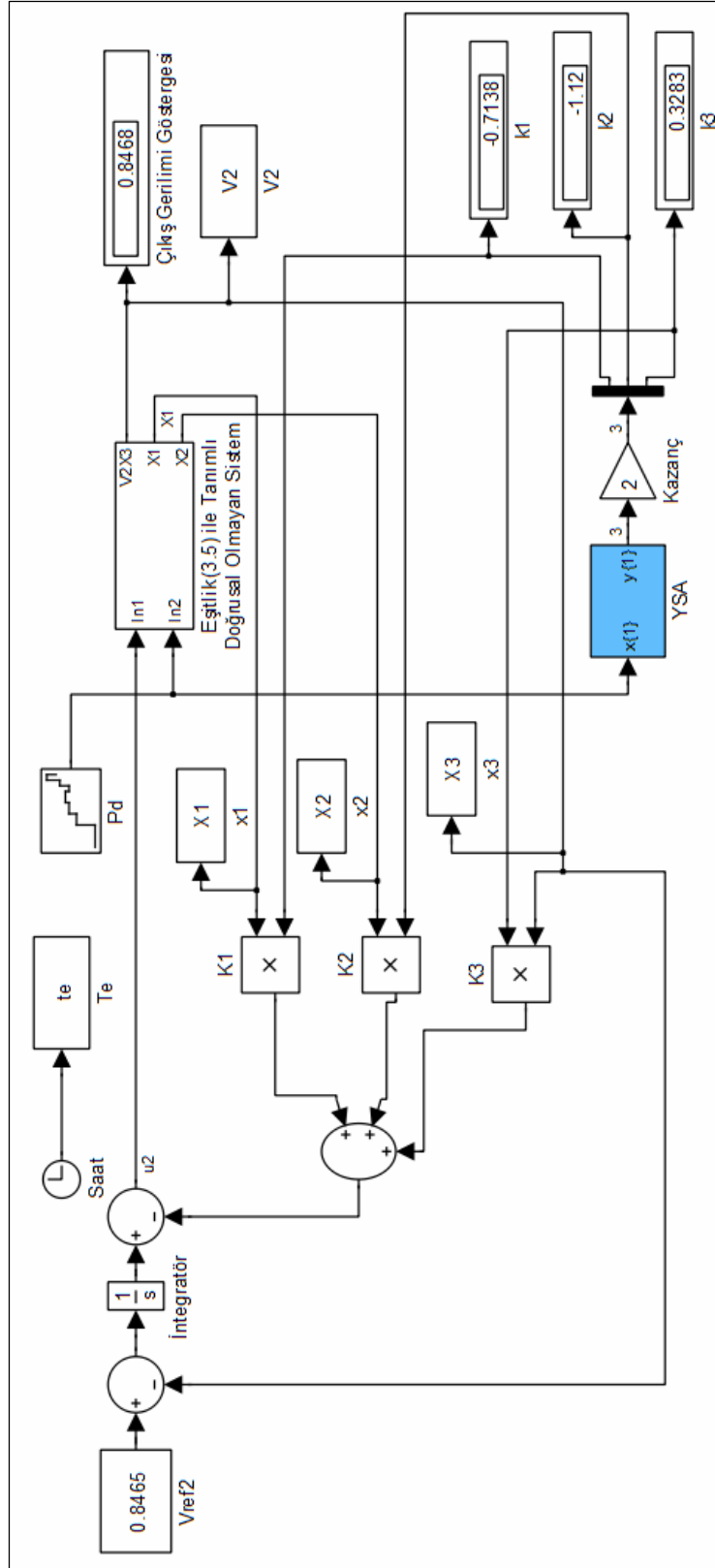
Önerilen yapay sinir ağı 1 giriş, 3 çıkış ve 10 gizli katmandan oluşmuştur. Yapay sinir ağının girişi talep güç P_d iken, çıkışı kutup yerleştirme kazanç vektörü \mathbf{k} dir. Gizli katmanlar giriş ve çıkış arasında doğrusal olmayan geri yayımlı bir yapay sinir ağı oluşturur.

YSA yapısı MATLAB yazılımının Neural Network Toolbox'ı kullanılarak oluşturulmuştur. Önerilen ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı Şekil 4.9'da verilmiştir. Yapay sinir ağı hata fonksiyonu 1×10^{-4} ün altına düşene kadar eğitilmiştir. Diğer yapay sinir ağı parametreleri; minimum ağırlık deltası 0.0001, başlangıç ağırlığı 0.3, öğrenme oranı 0.6, momentum 0.8 olarak seçilmiştir.

İki katmanlı olarak oluşturulan YSA ağının eğitilmesinde aktivasyon fonksiyonu olarak, birinci katmanda hiperbolik tanjant sigmoid ve ikincisinde ise doğrusal fonksiyon (pure linear-rampa fonksiyonu) kullanılmıştır. Bu aktivasyon fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \\ f(x) &= x \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Burada x ağırlıklı girişlerin toplamını göstermektedir. Maksimum çevrim (epochs) sayısı 1000 seçilmiştir.



Şekil 4.10. Online YSA kutup yerleştirme sistemine ilişkin SIMULINK blok diyagramı

Matlab/SIMULINK ortamında online YSA kutup yerleştirme yapısı Şekil 4.10'da verilmiştir.

4.5. Kendinden Ayarlamalı Kapalı Çevrim SVC'li Güç Sistemi Benzetimi

Kontrolü amaçlanan (3.5) SVC'li güç sistemine ilişkin çalışma noktası PV eğrisi üzerinde, çökme noktasına uzak güvenli bir konumdadır. Sistemde talep güçlerin değişme durumuna göre çalışma noktası PV eğrisi üzerinde sürekli değişmektedir. Burada kutup yerleştirme ile değişmeler karşısında sistem güvenli çalışma noktasına taşınmaktadır. Doğrusal olmayan sistem MATLAB/SİMULİNK ortamına aktarılarak farklı talep güç durumları için kapalı çevrim cevaplar elde edilmiştir [78].

Amaçlanan kontrol algoritmasının performansını test etmek amacıyla Tablo 4.2 ile verilen zamana bağlı talep güç değerleri kullanılmıştır.

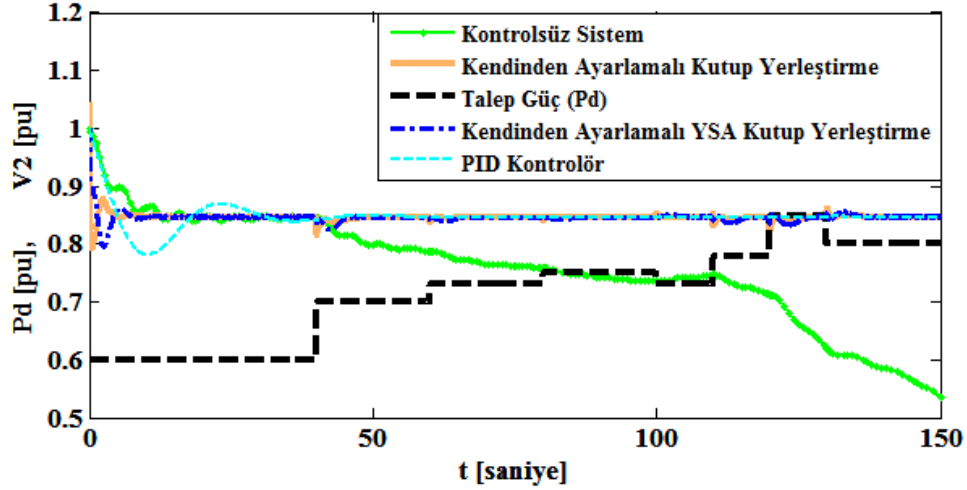
Tablo 4.2. Benzetim parametreleri

Zaman (saniye)	0	40	60	80	100	110	120	130
Talep güç Pd değişimi (pu)	0.6	0.7	0.73	0.75	0.73	0.78	0.85	0.8

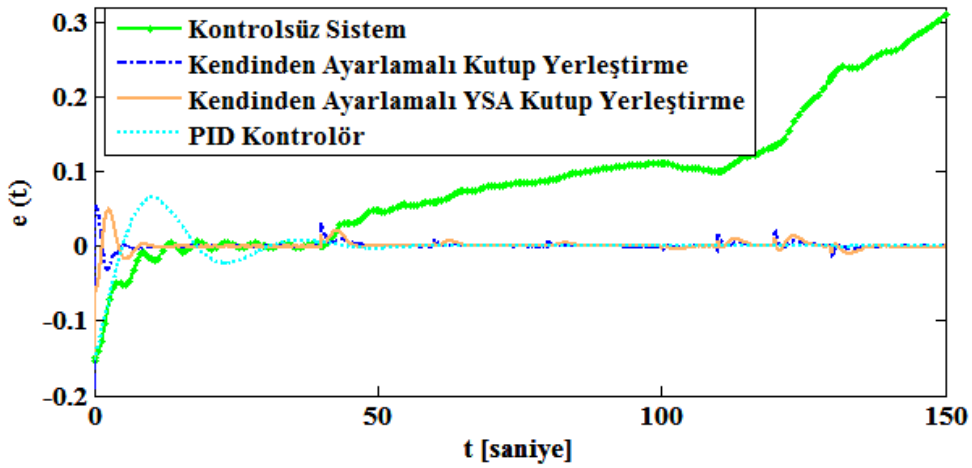
Söz konusu talep güç değer aralığı için amaçlanan YSA tabanlı kontrol algoritmasının sınanımı için Şekil 4.8 ile verilen MATLAB/SİMULİNK benzetim algoritması kullanılmıştır. Değişen talep güç değerlerine ilişkin durum değişkenlerinin değerleri Acermann algoritması tarafından giriş olarak alınıp k geri besleme katsayıları sürekli hesaplanarak sisteme girilmektedir. Bu geri besleme katsayıları doğrusal olmayan sistemden çıkan durum değişkenleriyle sürekli çarpılmaktadır. Böylece gerilim seçilmiş olan referans değerine taşınmaktadır.

Şekil 4.8'deki simulink benzetim algoritması kullanılarak 0.6-0.8 pu değer aralığındaki talep güç değişimine karşılık kendinden ayarlamalı kutup yerleştirme, kendinden ayarlamalı YSA kutup yerleştirme, PID kontrollü ve kontrolsüz algoritmaların $V_{2ref} = 0.8465$ basamak cevap eğrileri Şekil 4.11'de ve hata eğrileri

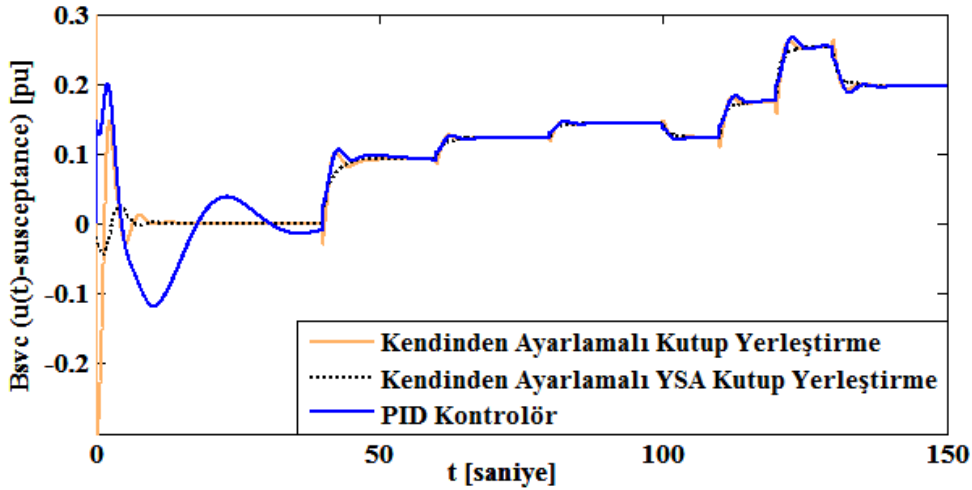
Şekil 4.12’de verilmiştir. Kontrolörlerin çıkışlarına ilişkin dalga şekilleri ise Şekil 4.13’de verilmiştir. Dalga şekillerinden gözlemlendiği gibi kontrolsüz sistem çökerken, kutup yerleştirmeli kontrollü sistem referans gerilim noktasını yakalamaktadır.



Şekil 4.11. Doğrusal olmayan kontrollü ve kontrolsüz SVC’li güç sisteminin $V_{2ref}= 0.8465$ basamak girişi cevap eğrileri

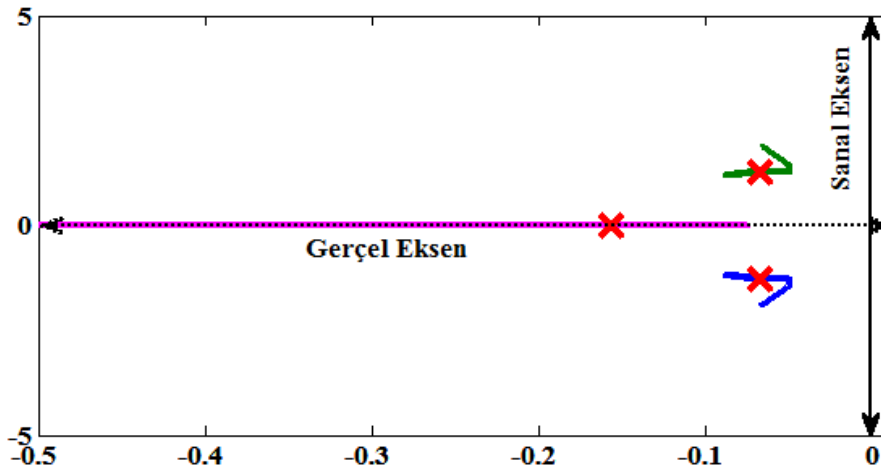


Şekil 4.12. Doğrusal olmayan kontrollü ve kontrolsüz SVC’li güç sisteminin $V_{2ref}= 0.8465$ basamak girişi hata eğrileri



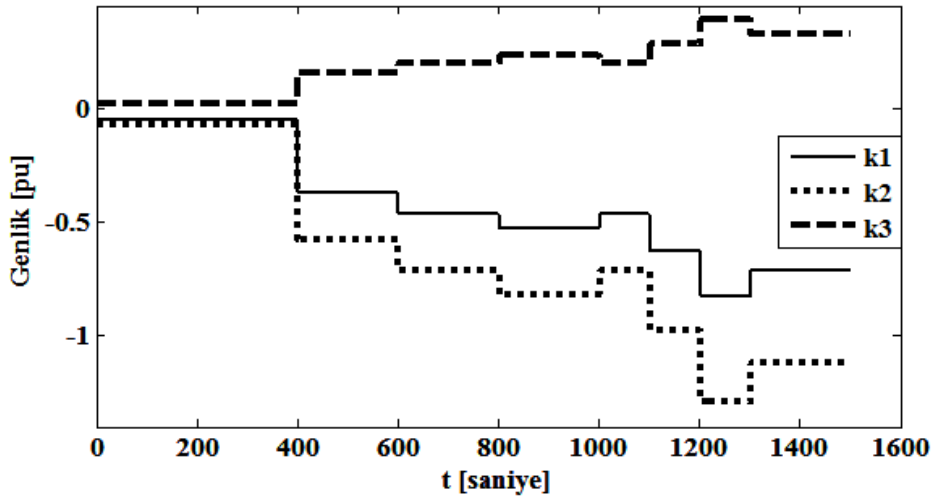
Şekil 4.13. Doğrusal olmayan SVC'li güç sisteminin kontrol algoritmasında kullanılan kontrolörlerinin çıkışlarına ilişkin dalga şekilleri

Söz konusu kontrol sisteminde arzu edilen ve değişen kutupların (özdeğerlerin) değişim aralığı Şekil 4.14'de verilmiştir. Grafikten sanal kutuplara ilişkin değişim aralığı az iken, gerçek kutup değişim aralığı fazladır.



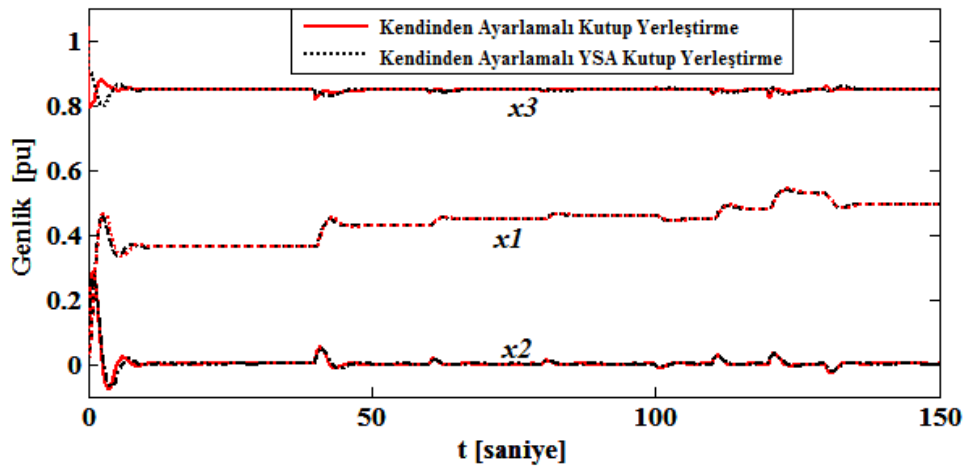
Şekil 4.14. SVC'li güç sisteminin kontrol algoritmasına ilişkin kutup değişimi

Yinelemeli YSA kutup yerleştirme için \mathbf{k} kazanç vektörü değişimi ise Şekil 4.15'de verilmiştir. \mathbf{k} satır vektörü hesaplamaları 150 saniyelik benzetim süresi boyunca değişen talep güçlere bağlı olarak hesaplanmıştır. 150 saniyelik benzetim süresi boyunca 1501 adet farklı \mathbf{k} kazanç vektörü elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Yinelemeli YSA kutup yerleştirme için k kazanç vektörü değişimi

İncelenmesi gereken bir başka önemli kriter de durum değişkenlerinin değişimleridir. Bu incelemeyle ilgili kendinden ayarlamalı kutup yerleştirme ve kendinden ayarlamalı YSA kutup yerleştirmeye dayalı kontrol yöntemleri için durum değişkenlerinin değişim eğrileri Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16. SVC'li güç sisteminin kontrolüne ilişkin durum değişkenlerinin zamana göre değişim eğrileri

Şekil 4.12'deki hata eğrileri ve Tablo 4.3 incelendiğinde, PID kontrolörün yerleşme süresi diğer kontrolörlere göre daha uzun sürmüştür. Kendinden ayarlamalı kutup yerleştirmede algoritma hesaplamaları sisteme geç müdahale etmesine neden olmaktadır. Bu nedenle kendinden ayarlamalı YSA kutup yerleştirme yöntemi

önerilmiştir. Aşım miktarı, yükselme ve yerleşme süreleri, sürekli hal hatası açısından en iyi performansı kendinden ayarlamalı YSA kutup yerleştirme kontrolör yapısı gerçekleştirmiştir.

Tablo 4.3. Değişik kontrol algoritmaları için optimum performans kriterleri

Kontrolör	Aşım Miktarı (M_p)	Yükselme Süresi (r_s)	Yerleşme Süresi (s_t)	Sürekli Hal Hatası (e_{ss})
PID	0.0226	18.4	39.07	0.030
Kendinden Ayarlamalı Kutup Yerleştirme	0.0316	1.3	7	0.005
Kendinden Ayarlamalı YSA Kutup Yerleştirme	0.0171	4.6	7	0.005

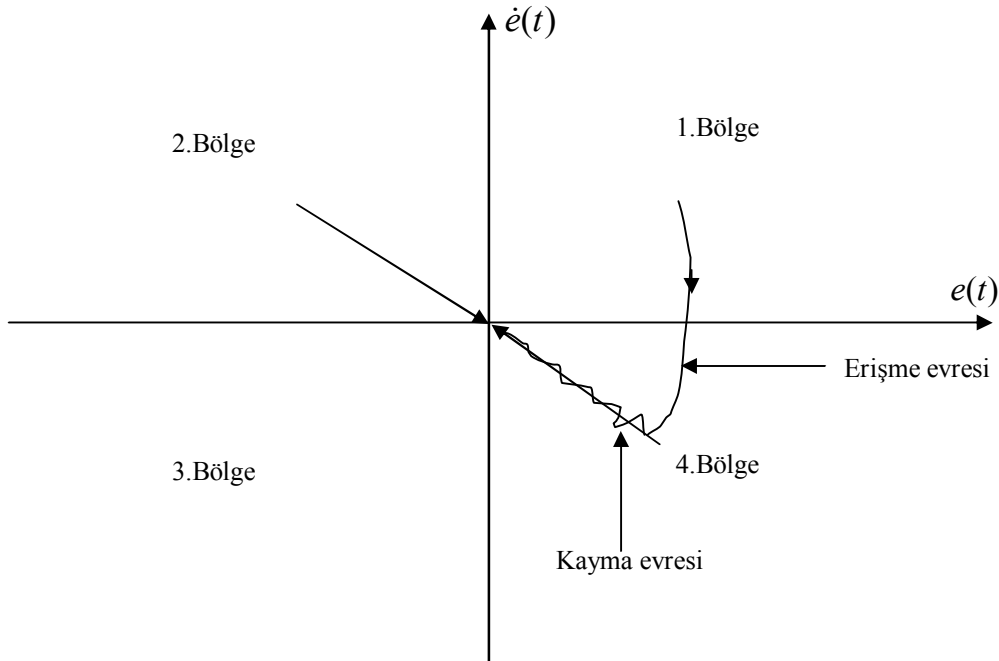
Tablo 4.3’de gösterilen performans kriterleri (en düşük aşım, en küçük yükselme ve en küçük yerleşim süresi) açısından kendinden ayarlamalı YSA kutup yerleştirme yöntemi en iyi performansı göstermiştir.

BÖLÜM 5. KAYAN KIPLİ KONTROL

Kayan kipli kontrol literatürde sistem belirsizliklerine ve bozucu büyüklüklere karşı duyarsız olma özelliği ile bilinir. Kuramsal olarak kayan kipli kontrol tekniği, bir sistemin hata vektörünü istenen bir dinamik içerisinde tutulması esasına dayanır [91]. Kayan kipli kontrolü daha iyi kavrayabilmek için kayan kipli kontrole ilişkin bazı kavramları incelemek faydalı olacaktır.

5.1. Faz uzayı

Faz uzayı; sistemin davranışlarını ve kararlılığını incelememizi sağlayan, hatanın kendisi ile türevi arasında çizilen eğrinin oluşturduğu bir koordinat sistemidir (Şekil 5.1). Şekilden görüldüğü gibi koordinat sistemi dört bölgeden oluşur.



Şekil 5.1. Faz uzayı bölgeleri [50]

Kararlı bir sistemin dinamik davranışı hatayı sifira götürecektir şekilde olmalıdır. Bu ancak Şekil 5.1'deki 2.ve 4. bölgelerde, gösterilen ok yönlerinde ve

$$\dot{e} = -\lambda e \quad (5.1)$$

fonksiyonu boyunca olmaktadır. Eğer sistem; 1.Bölge de ise 4. bölgeye, 3.bölge de ise 2. bölgeye hızlı bir şekilde kaydırılmalıdır. Etkili bir kontrol için bu gereklidir [50]. Kayan kipli kontrol yönteminde bu bölge geçişleri erişme ve ok yönlerindeki hareketler ise kayan evreleri olarak tanımlanmıştır.

Faz düzlemi üzerinde orijin etrafında bir hareket olması halinde bu hareket saat yönünde olmalıdır.

Faz uzayında incelemek üzere aşağıdaki ikinci dereceden sistemi ele alalım,

$$\ddot{x}(t) = u(t) \quad (5.2)$$

Burada $u(t)$ kontrol girişi x sistemin açısal konumu olmak üzere, kontrol kuralı olarak sadece negatif bir konum geri beslemesi kullanılırsa sistemin kontrol girişi aşağıdaki gibi olur.

$$u(t) = -k.x(t) \quad (5.3)$$

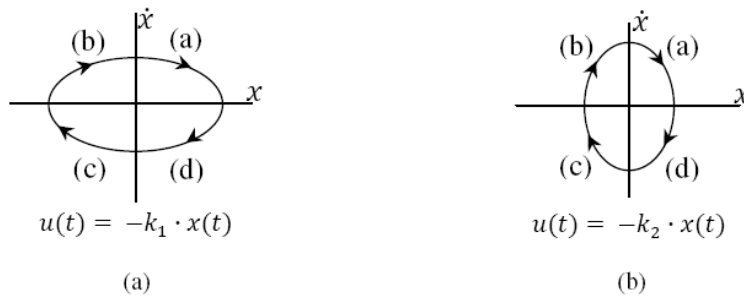
Burada $k > 0$ 'dır. (5.3) fonksiyonu (5.2)'de yerleştirip, eşitliğin her iki tarafı \dot{x} ile çarpılırsa,

$$\dot{x}.\ddot{x} = -k.\dot{x}.x \quad (5.4)$$

elde edilir. Son ifadenin her iki yanını tümlevlenirse,

$$\dot{x}^2 + k.x^2 = c \quad (5.5)$$

bağıntısı elde edilir [92]. 5.5 denklemindeki c , tümlev işleminden gelen sabittir. Bu denklem faz uzayında $k \neq 1$ durumunda bir elips denklemdir. $k = 1$ durumunda ise bir çember denklemine dönüşür. Şekil 5.2'de k 'nin iki farklı değeri için, elde edilen elipsler verilmiştir [16,39,93].



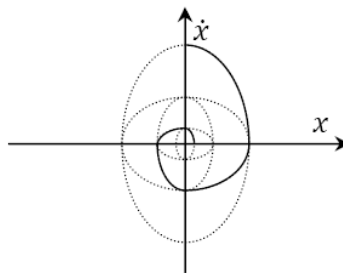
Şekil 5.2. Faz uzayında farklı elips yörüngelerinin elde edilmesi

- a. $k_1 < 1$ için faz uzayı
- b. $k_2 > 1$ için faz uzayı

Burada k değerinin değiştirilmesiyle; faz uzayındaki sistem durumları, bir başlangıç noktasından başlayarak faz uzayının orijinine götürülebilir. Durumların orijine gitmesi sistemin kararlı hale gelmesi anlamındadır. Dolayısıyla kontrol kuralı olarak k_1 ve k_2 , $0 < k_1 < 1 < k_2$ aralığında değiştirilebilir. Kontrol kuralı anahtarlama mantığı olarak düşünülürse aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u(t) = \begin{cases} -k_1 \cdot x(t), & x \cdot \dot{x} < 0 \\ -k_2 \cdot x(t), & x \cdot \dot{x} \geq 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

Bu durumda değişken yapıda kontrol sisteminin durum değişkenlerinin faz uzayında izlediği yörünge Şekil 5.3'deki gibi olur [16].



Şekil 5.3. Osilasyon yapan iki sistemden oluşan kararlı bir sistemin faz yörüngesi

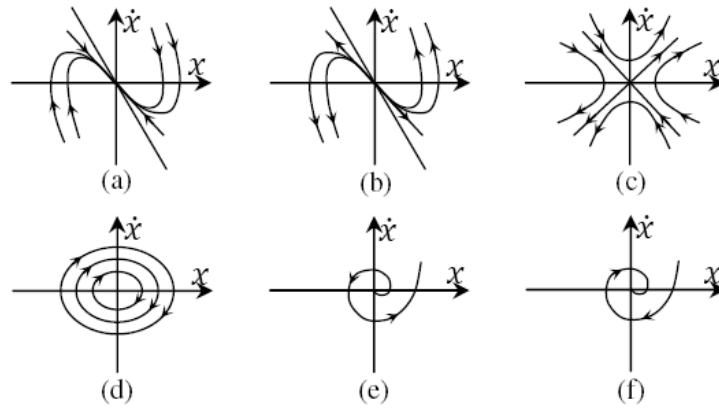
Aynı sistemin kontrol girişine kontrol kuralı olarak konum ve hız geri beslemesi uygulanırsa $\mathbf{K}=[k_1 \ k_2]$ şeklinde bir satır vektörü olmak üzere sistemin kontrol girişi,

$$u(t) = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(t) \quad (5.7)$$

şeklinde olur. Bu denklem 5.2 sisteminin içine yazılırsa, sistemin son hali aşağıdaki gibi olur.

$$\ddot{x}(t) + k_1 \dot{x} + k_2 x = 0 \quad (5.8)$$

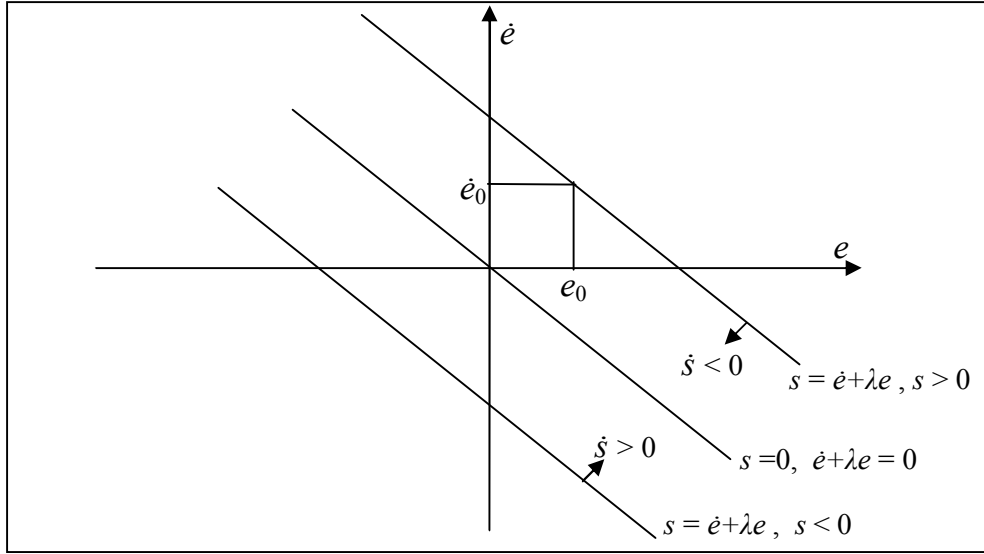
Bu ifadede yer alan k_1 ve k_2 katsayılarının alabileceği farklı değerlere göre sistemin faz uzayında takip edebileceği durum yörüngeleri farklı başlangıç koşullarına göre Şekil 5.4 de gösterilmiştir [23,94,95].



Şekil 5.4. İkinci dereceden doğrusal sistemlerin farklı durum yörüngeleri

5.2. Kayan Kipli Kontrol

Kayan kipli kontrolde erişme ve kayma evreleri olmak üzere iki temel evre vardır. Bu evreleri gerçekleştirmek için iki farklı kontrol kuralına ihtiyaç vardır. Bunlardan biri geri besleme diğeri ise anahtarlama kontrol kuralıdır. Anahtarlama fonksiyonu olarak adlandırılan karar kuralı, sistemin davranışını oluşturan fonksiyonu seçer. Kayan kipli kontrolde, değişken yapılu kontrol sisteminin durumları, faz uzayında, faz değişkenlerinden oluşan kayma yüzeyi olarak adlandırılan bir yüzey üzerinde tutacak şekilde tasarlanır. Tasarlanan sistemin davranışı, sistemin durumlarının bu yüzey üzerine gelmesi ve bu yüzey üzerinde kalmasına yöneliktir [96]. Kayma yüzeyi hareketleri, Şekil 5.5 deki ok yönlerinde olmaktadır.



Şekil 5.5. Kayma yüzeyi [13]

Kayan kipli kontrol doğası gereği süreksizdir. Kontrolde, sistem durumları kayma yüzeyine ulaştıktan sonra, sistem durumlarının kayma yüzeyinin dışına çıkma durumu gerçekleşirse, ani bir kontrol işareti üretilerek durumlar tekrar yüzey üzerine getirilmeye çalışılır. Böyle bir kontrolde sistem çok kısa zamanda çok fazla yön değiştirir. Sistem durumlarını kayan yüzey üzerinde tutmak için ani yön değiştiren sınırsız frekanslı bu işarete çatırtı (chattering) denir. Bu durum, uygulamada bazı problemlere sebep olur. Çatırtı, hızlı hareket eden mekanik sistemlere uygulandığında, sistemi oluşturan hızlı hareket eden parçalara zarar verebilir. Bu yüzden hızlı değişen sistemlerde, kayan kipli kontrol önerilmez. Çatırtı sorunu; filtreleme, süreksiz yaklaşım, doyma fonksiyonu, bulanık kontrol gibi çeşitli fonksiyon ve yöntemler kullanılarak azaltılabilir. Ancak bu durumda kayan kipli kontrol gürbüzlük özelliğini kaybeder [57,64,56].

5.2.1. Kayan kipli kontrole ilişkin temel kavramlar

5.2.1.1. Erişme Evresi

Kayan kipli kontrol için sistem durumları kayma yüzeyine uygun kontrol sinyalleriyle götürülmeye çalışılır. Bu evrenin sağlanabilmesi için, kayma yüzeyini tanımlayan $s(x)$ fonksiyonun;

$$s(x)\dot{s}(x) \leq 0 \quad (5.9)$$

eşitliğini sağlaması gerekir. Bu evre, kayma yüzeyi değerinin sifıra ulaştığı evredir. Bunu sağlamak için ise, yüzeyin sahip olduğu farklı değerler için farklı kontrol sinyalleri üretilmelidir. Kontrol sinyali ile kayma yüzeyi arasındaki ilişki,

$$u = \begin{cases} u^+ & s(x) > 0 \\ u^- & s(x) < 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

şeklinde olmalıdır [16,56].

5.2.1.2. Kayma Evresi

Erişme evresinin tamamlanmasıyla, kayma evresi başlar. Sistem durumları kayma evresine gelmiştir ve bundan sonra kayma yüzeyi fonksiyonu $s(x)$ in,

$$\left. \begin{aligned} s(x) &= 0 \\ \dot{s}(x) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.11)$$

olarak verilen koşulları sağladığı evredir. Bu evrede; sistem çıkış sinyali, sistemin kendi özelliklerinden tamamen bağımsız hale gelir ve $s(x)$ in işlevi, sistemin çıkış sinyali üzerinde etkili olur[16,56].

Geleneksel kayan kipli kontrolde kayma yüzeyi, $e(t)$ hata sinyali ve hata sinyalinin türevi alınarak aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$s(t) = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right)^{n-1} e(t) \quad (5.12)$$

Burada n kontrolsüz sistemin derecesi ve λ reel sayılar kümesinde pozitif bir sabittir.

5.2.1.3. Anahtarlama yüzeyi

Anahtarlama fonksiyonu, n adet giriş için vektörel olarak,

$$S(x)=[s_1(x) s_2(x) s_3(x) \cdots s_n(x)]^T \quad (5.13)$$

şeklinde tanımlanır [39,94]. Burada, $s_i(x)$ değeri $i = 1, \dots, n$ olmak üzere i . kontrol kuralına ait anahtarlama fonksiyonudur. Kontrol kuralında $s_i = 0$ olduğu zaman bir süreksizlik oluşur ve kontrol kuralı işaret değiştirir. Bu yüzden $s_i(x) = 0$ eşitliği i . kontrol kuralına ait anahtarlama yüzeyidir [98].

5.2.1.4. Kayma yüzeyine erişim koşulları

Kayma kipine erişmeyi sağlayacak olan kontrol yapısının ve kazançlarının belirlenmesi “erişim problemi-reachability problem” olarak adlandırılır. Erişim problemi kayma yüzeyine bağlı olduğundan erişim problemi çözülmeden kontrol kuralı tasarlanamaz.

Kayan kipli kontrol sistemlerinin tasarımında kullanılan erişim koşullarını vermek faydalı olacaktır [97].

Doğrudan anahtarlama fonksiyonu yaklaşımı:

İlk kullanılan kayma yüzeyine ulaşma koşuludur. Kayma yüzeyini çevreleyen yerel bir bölgede durum yörüngeleri kayma yüzeyine doğru yaklaşmalıdır. Burada kayma kipinin var olma durumu aşağıdaki gibi ifade edilebilir [16,39,97].

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{ds}{dt} < 0 \quad (5.14)$$

Erişim kuralı yaklaşımı:

Erişim kuralı yaklaşımı doğrudan anahtarlama fonksiyonu dinamiğini belirler. Q ve

K diagonal matrisler olmak üzere anahtarlama fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilsin [19].

$$\dot{s} = -Q \cdot \text{sign}(s) - Kf(s) \quad (5.15)$$

Burada, $\text{sign}(s)$ işaret fonksiyonu ve $f(s)$ skaler fonksiyondur. Q ve K 'nin değişik değerleri farklı yapıya sahip erişme kurları oluşturur. Bunlardan bazıları şunlardır,

a) Sabit değişimli erişme kuralı:

$$\dot{s} = -\rho \cdot \text{sign}(s) \quad (5.16)$$

b) Sabit-Oransal değişimli erişim kuralı:

$$\dot{s} = -\rho \cdot \text{sign}(s) - Ks \quad (5.17)$$

c) Üstel değişimli erişim kuralı:

$$\dot{s} = -\rho \cdot |s|^a \cdot \text{sign}(s) \quad (5.18)$$

Lyapunov Kararlılığı:

Lyapunov 2. Metodu; doğrusal ya da doğrusal olmayan sistemlerin zaman bölgesindeki çözümü bilinmeden kararlılığının incelenebilmesine imkan tanır [82].

Bir sistemde depolanan enerjiyi ya da enerjiye eşdeğer bir değişimi gösteren zamana bağlı bir $y(t)$ fonksiyonu için,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \infty \quad (5.19)$$

durumu söz konusu ise sistem kararsızdır. Eğer, n bir sabit olmak üzere,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = n \quad (5.20)$$

durumu söz konusu olursa sistem kararlı bir sistemdir.

Sistemin kararlı sayılabilmesi için,

$$s \cdot \dot{s} \leq 0 \quad (5.21)$$

koşulunun sağlanması gerekir. Burada \dot{s} seçilecek erişme kuralı ve s ise kayma yüzeyidir. Sabit-oransal değişimli erişme kuralı için

$$\dot{s} = -\rho \cdot \text{sign}(s) - K \cdot s$$

ifadesi,

kayma yüzeyi için ise

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

ifadesi seçilirse aşağıdaki kararlılık koşulu sağlanır.

$$(-\rho \cdot \text{sign}(s) - K \cdot s) \cdot (\dot{e} + \lambda e) \leq 0 \quad (5.22)$$

5.2.2. Kontrol kuralı

Kayma yüzeyinin parametrelerinin hesabından sonra sistemi kayma yüzeyinde tutacak bir anahtarlamalı geri besleme kontrol kuralı elde edilmelidir. Söz konusu kontrol kuralını doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için elde etmeye çalışalım.

Doğrusal kontrol kuralı:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5.23)$$

Sisteminde, $z = Tx$ koordinat dönüşümü uygulanırsa,

$$\dot{z} = T\dot{x} = TAT^{-1}z + TBu \quad (5.24)$$

bulunur. Burada $TAT^{-1}=A^*$ ve $TB=B^*$ şeklinde ifade edilirse,

$$\dot{z} = A^*z + B^*u \quad (5.25)$$

eşitliği elde edilir. Söz konusu eşitlikler ile sistem aşağıdaki şekilde iki alt sisteme ayrılmış olur.

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= A_{11}^* z_1 + A_{12}^* z_2 \\ \dot{z}_2 &= A_{21}^* z_1 + A_{22}^* z_2 + B^* u \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

Bu eşitlikler ile kontrol girişli ve kontrol girişsiz alt sistemler elde edilir. Kontrol girişsiz indirgenmiş sistemin kayma yüzeyi,

$$s(t) = S_1 z_1 + S_2 z_2 = 0 \quad (5.27)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $S_2^{-1} S_1 = M$ olmak üzere kayma yüzeyi,

$$s(t) = M z_1 + z_2 = 0 \quad (5.28)$$

ile tanımlanabilir. (5.27) denkleminin türevi alınıp (5.21)'de yerine konulursa,

$$\dot{s}(t) = M(K_{11} z_1 + K_{12} z_2) + K_{21} z_1 + K_{22} z_2 + L u = 0 \quad (5.29)$$

şeklinde ifade edilir. Sabit değişimli bir erişim kuralı seçilirse ve buda (5.28) denkleminde eşitlenirse,

$$\dot{s}(t) = M(K_{11} z_1 + K_{12} z_2) + K_{21} z_1 + K_{22} z_2 + L u = -Q \cdot \text{sign}(s) \quad (5.30)$$

elde edilir. Son ifadeden kontrol işareti u ,

$$u = -L^{-1}[(M \cdot K_{11} + K_{12}) z_1 + (M \cdot K_{12} + K_{22}) z_2 + Q \cdot \text{sign}(s)] \quad (5.31)$$

şeklinde elde edilir.

Doğrusal olmayan kontrol kuralı:

Aşağıdaki doğrusal olmayan sistemi ele alalım.

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u(t) \quad (5.32)$$

Kontrol kuralını elde edebilmek için aşağıdaki m adet anahtarlama yüzeyi tanımlansın,

$$s = \{x \in R^n : S(x) = [s_1(x) \ s_2(x) \ s_3(x) \ \dots \ s_n(x)]^T = 0\} \quad (5.33)$$

son ifade de,

$$s(x) = 0 \quad (5.34)$$

olduğundan, zincir kuralına göre,

$$\dot{s}(t) = \frac{ds}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{ds}{dx} \cdot [f(x) + g(x)u(t)] = 0 \quad (5.35)$$

Olmalıdır [94]. Sabit değişimli bir erişim kuralı seçilirse,

$$\dot{s}(t) = \frac{ds}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{ds}{dx} \cdot [f(x) + g(x)u(t)] = -Q \cdot \text{sign}(s) \quad (5.36)$$

yazılabilir. Son ifadeden kontrol işareti u ,

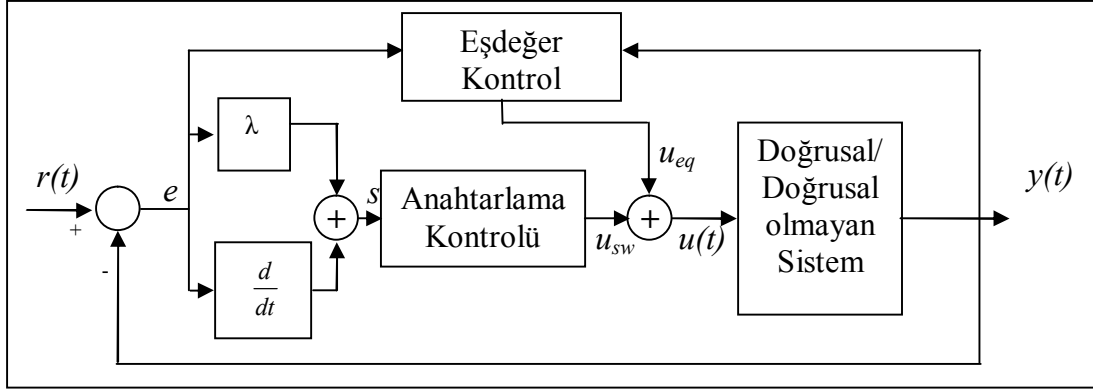
$$u(t) = -\left[\frac{ds}{dx} \cdot g(x)\right]^{-1} \cdot \left[\frac{ds}{dx} \cdot f(x) + Q \cdot \text{sign}(s)\right] \quad (5.37)$$

olarak elde edilir. Söz konusu u değeri, literatürde kayan kipli kontrol için geçen eşdeğer u_{eq} ve anahtarlama u_{sw} kontrol işaretlerinin toplamıdır. Söz konusu u değeri, eşdeğer ve anahtarlama kontrol işaretlerinin toplamı olarak,

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \\ u_{sw}(t) &= -\rho \cdot \text{sign}(s) \\ u_{eq}(t) &= u(t) - u_{sw}(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.38)$$

ifade edilir.

Elde edilen denklemlerden yararlanarak kayan kipli kontrol yapısı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Kayan kipli kontrol yapısı

yapısı elde edilir.

5.3. SVC'li Güç Sisteminin (Test Sisteminin) Kayan Kipli Kontrol Yöntemiyle Denetimi

Kayan kipli kontrol yapısı SVC'li güç sistemine ilişkin (3.5) denklemlerinden yararlanarak aşağıda elde edilmiştir. Söz konusu yapının elde edilmesi için öncelikle kayma yüzeyi ve erişme kuralı seçilmelidir. Burada e hatayı, \dot{e} ise hatanın türevini göstermektedir. K , λ ve ρ birer sabittir. Bu sabitler kararlılık analiziyle, optimizasyon gibi yöntemler ile belirlenebilmektedir [20,39,64].

$s = \dot{e} + \lambda e$ şeklinde bir kayma yüzeyi seçilirse, e hata ve \dot{e} hatanın türevi,

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + \lambda \dot{e} \\ e &= x_{3ref} - x_3 \\ \dot{e} &= \dot{x}_{3ref} - \dot{x}_3 \\ \ddot{e} &= \ddot{x}_{3ref} - \ddot{x}_3 \\ x_{3ref} &= \text{Sabit} \\ \dot{x}_{3ref} &= \ddot{x}_{3ref} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$

şeklinde hesaplanır. Eşitlik 5.17'de verilen sabit-oransal değişimli erişme kuralı seçilirse, kayan kipli kontrol temel eşitliği,

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = \ddot{x}_{3ref} - \ddot{x}_3 + \lambda(\dot{x}_{3ref} - \dot{x}_3) &= -\rho \cdot \text{sign}(s) - K \cdot s \\ -\ddot{x}_3 + \lambda(-\dot{x}_3) &= -\rho \cdot \text{sign}(s) - K \cdot s \\ \ddot{x}_3 + \lambda \dot{x}_3 &= \rho \cdot \text{sign}(s) + K \cdot s \end{aligned} \right\} \quad (5.40)$$

şeklinde hesaplanır. Bu eşitlikte bilinmesi gereken \dot{x}_3 değeri (3.5) denkleminde ve \ddot{x}_3 değeri ise \dot{x}_3 'ün türevi alınarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= 0.25x_3 \cos x_1 - 0.25x_3^2 + 0.125x_3^2 u - 0.03125P_d \\ \ddot{x}_3 &= 0.25\dot{x}_3 \cos x_1 - 0.25x_3 \dot{x}_1 \sin x_1 - 0.5x_3 + 0.25x_3 u + 0.125x_3^2 \dot{u} - 0.03125\dot{P}_d \end{aligned}$$

Bozucu ve kontrol işaretinin türevi sıfır alınabilir. Ayrıca x_2 çok küçük olduğundan, $0.25x_3 \dot{x}_1 \sin x_1 = 0.25x_3 x_2 \sin x_1 = 0$

alınabilir. Bu durumda \ddot{x}_3 ,

$$\ddot{x}_3 = 0.25\dot{x}_3 \cos x_1 - 0.5x_3 + 0.25x_3 u$$

olarak hesaplanır. \dot{x}_3 ve \ddot{x}_3 değerleri aşağıdaki denklemde yerine konularak u kontrol değişkeni elde edilir.

$$\ddot{x}_3 + \lambda \dot{x}_3 = \rho \cdot \text{sign}(s) + K \cdot s$$

$$u = \frac{(0.25 \cos x_1 + \lambda) \cdot (x_3^2 - x_3 \cos x_1 + 0.125P_d) + \rho \cdot \text{sign}(s) + K \cdot s}{x_3 + (0.25 \cos x_1 + \lambda) \cdot 0.5x_3^2} \left. \right\} = u_{eq} + u_{sw} \quad (5.41)$$

Söz konusu u değeri, literatürde kayan kipli kontrol için geçen eşdeğer u_{eq} ve anahtarlama u_{sw} kontrol işaretlerinin toplamıdır.

5.3.1. Kararlılık Analizi

Kararlılık için, Lyapunov 2. metoduna göre $s \cdot \dot{s} \leq 0$ koşulunun sağlanması gerekir. Kayan kipli kontrol yönteminde \dot{s} erişme kuralını ve s ise kayma yüzeyini göstermektedir. Eşitlik 5.17 ile verilen sabit-oransal değişimli erişme kuralı ve kayma yüzeyi ise $s = \dot{e} + \lambda e$ şeklinde seçilsin. Eşitlik 5.35'den yararlanarak erişme kuralı \dot{s} ve kayma yüzeyi s aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}
s &= \dot{x}_{3ref} - \dot{x}_3 + \lambda(x_{3ref} - x_3) = -\dot{x}_3 + \lambda(x_{3ref} - x_3) \\
&= - (0.25x_3 \cos x_1 - 0.25x_3^2 + 0.125x_3^2 u - 0.03125P_d) + \lambda(x_{3ref} - x_3)
\end{aligned}$$

Lyapunov 2. metoduna göre ρ ise aşağıdaki işlem adımları sonucu hesaplanır.

$$s \cdot \dot{s} \leq 0$$

$$s \cdot (-\rho \cdot \text{sign}(s) - K \cdot s) \leq 0$$

$$s \cdot (\rho \cdot \text{sign}(s) + K \cdot s) \geq 0$$

$$\rho \geq K \cdot \frac{s}{\text{sign}(s)}$$

$$\rho \geq K \cdot \frac{- (0.25x_3 \cos x_1 - 0.25x_3^2 + 0.125x_3^2 u - 0.03125P_d) + \lambda(x_{3ref} - x_3)}{\text{sign}(s)} \quad (5.42)$$

hesaplanır.

Burada, x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenleri, u kontrol işareti, P_d talep güç ve x_{3ref} çıkış gerilimin referans değerini göstermektedir. Durum değişkenlerinin, kontrol işaretinin, çıkış gerilimi referans değeri ve talep gücün değerleri bilinmektedir.

Eşitlik 5.42'de verilen üç bilinmeyenli tek denklemi çözebilmek için iki bilinmeyene değer verilmesi gerekir. Burada, K ve λ ya değer atanarak ρ değeri hesaplanmıştır. ρ 'nun minimum değerini hesaplamak için çalışma noktası değerleri,

$$\left. \begin{aligned}
K &= 20, \lambda = 5, u = 0.27, P_d = 0.6 \\
x_1 &= 0, x_3 = 1.0407, x_{3ref} = 0.8465
\end{aligned} \right\} \quad (5.43)$$

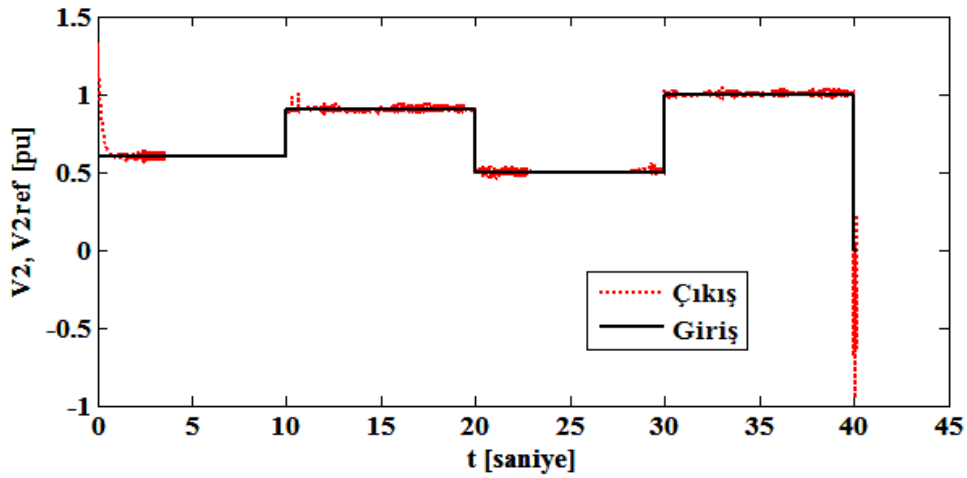
seçilmiştir. Söz konusu değerler eşitlik 5.42'de yerlerine konularak $\rho > 19.5643$ değeri elde edilmiştir. Bu durumda, $\rho = 20$ alınabilir. Kayan kipli kontrol için aşağıdaki değerler kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir.

$$K = 20, \lambda = 5, \rho = 0.20 \quad (5.44)$$

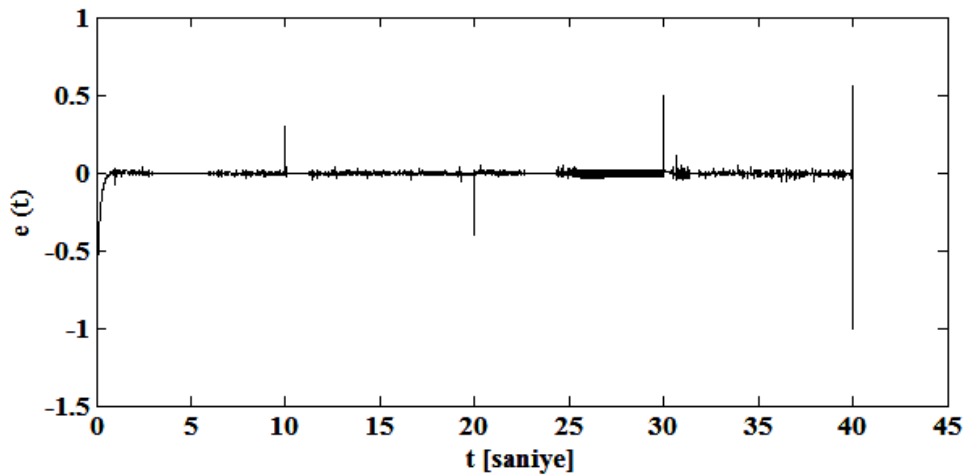
SVC kontrol sisteminin Matlab/SIMULINK yazılımı Şekil 5.7'de verilmiştir.

5.4. Benzetim Sonuçları

Şekil 5.7 ile verilen MATLAB/Simulink yazılımı ortamındaki SVC'li kontrol sistemi kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında SVC'li sistem için 5.43 değerleri, kayan kipli kontrol için ise 5.44 kontrolör parametreleri kullanılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.8 - Şekil 5.14 grafikleriyle verilmiştir.

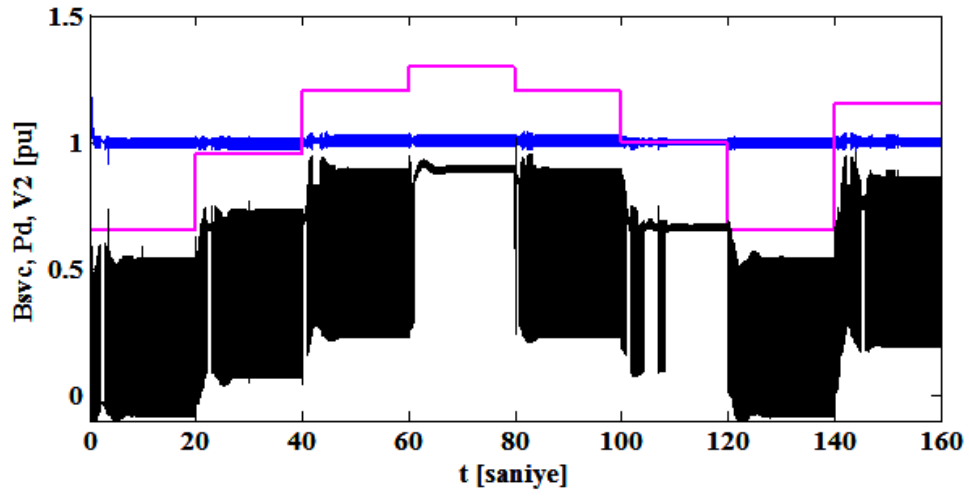


Şekil 5.8. Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sisteminin değişken basamak giriş cevap eğrisi



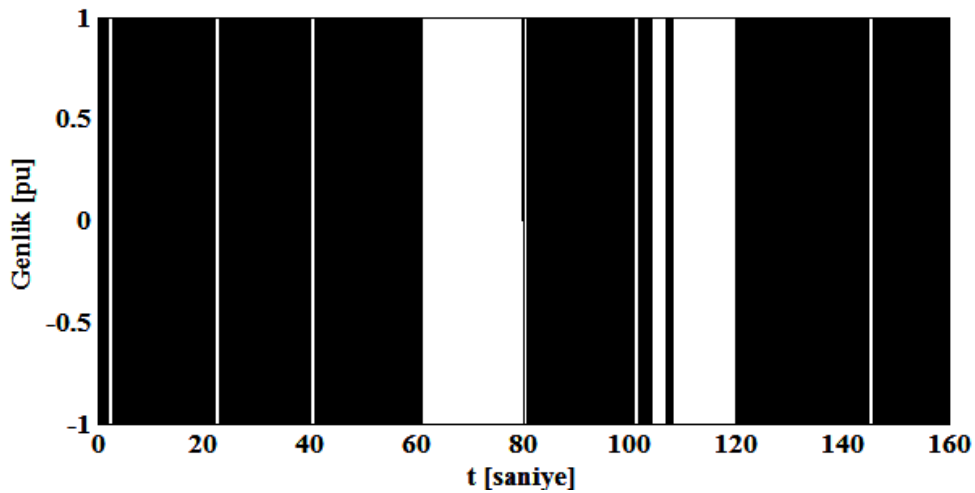
Şekil 5.9. Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sisteminin değişken basamak girişi hata eğrisi

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da kayan kipli kontrollü SVC'li güç sisteminin değişken basamak giriş cevap eğrileri verilmiştir. Grafiklerden çıkışın girişi oldukça düşük hata ile takip ettiği açıkça görülmektedir.



Şekil 5.10. Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sisteminin talep güç değişimine bağlı çıkış gerilimi ve kontrol işareti değişimi

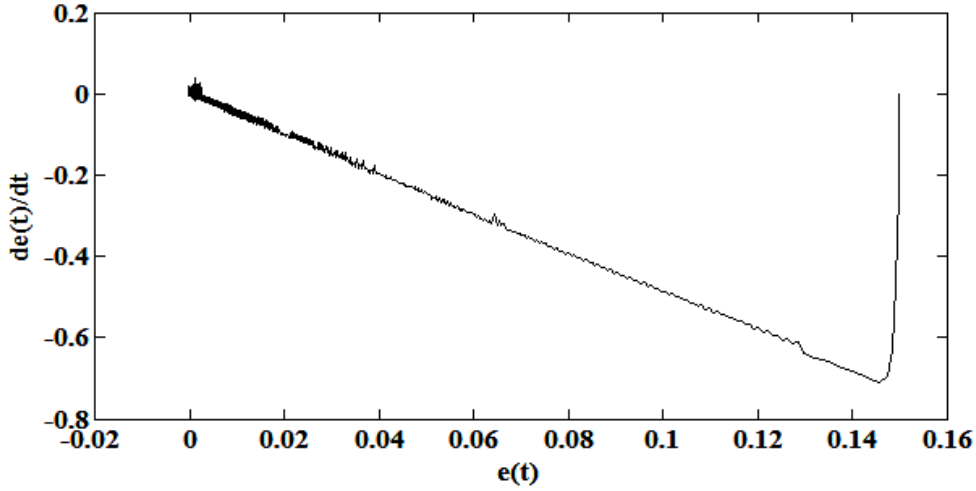
Şekil 5.10'da talep güç P_d 'nin değişimine bağlı olarak, kontrol değişkeni B_{svc} ve çıkış gerilimi değişimleri verilmiştir. Talep güç değişmesine rağmen çıkış gerilimi 1 pu'luk değeri korumuştur. Ancak gerilimin değişim aralığı ve kontrolörün ürettiği sinyal aralığı çok geniş ve yüksek frekanslıdır.



Şekil 5.11. Kayan Kipli Kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin anahtarlama işaretinin değişimi

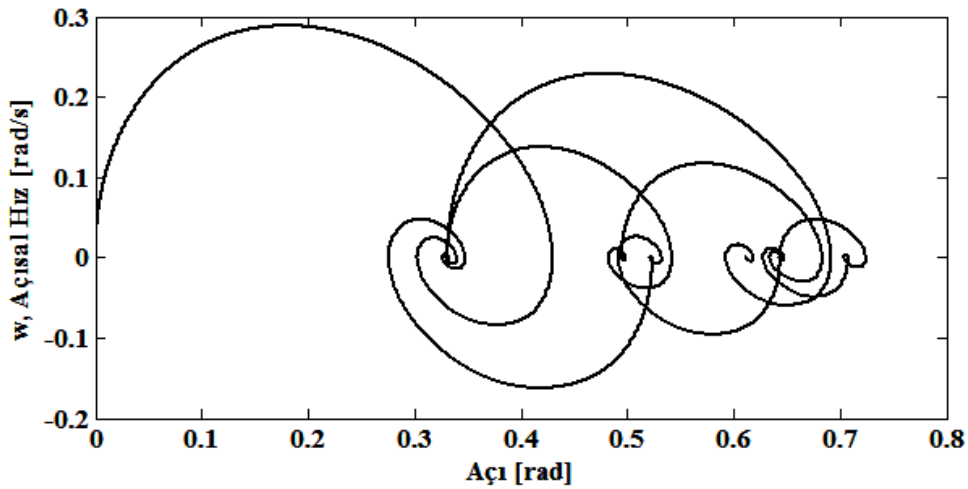
Şekil 5.11'de Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin anahtarlama işareti değişimi verilmiştir. Anahtarlama çıkış işareti ± 1 aralığında çok yüksek frekanslı

olarak değişmektedir. Bazı talep güçlerde ise sabit genlikli titreşimsiz değişim söz konusudur.



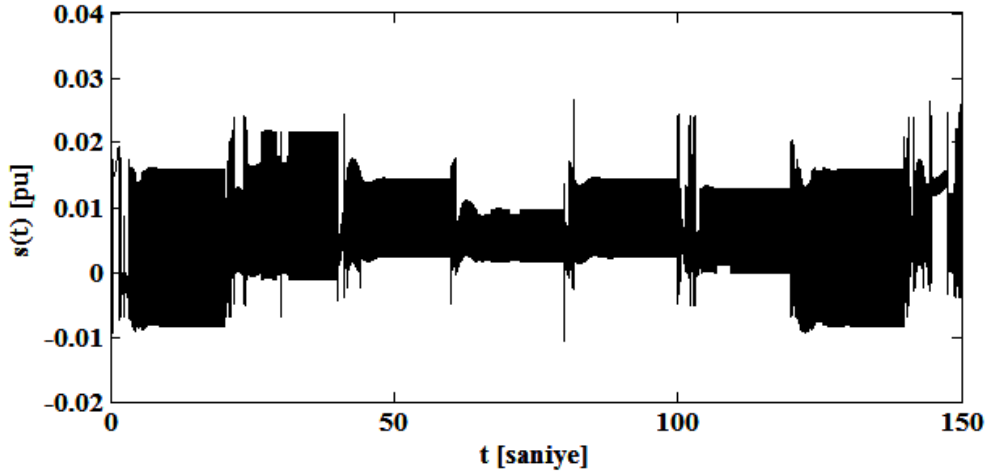
Şekil 5.12. Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri

Şekil 5.12'de verilmiş olan Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin faz uzayı grafiğinde, erişme ve kayma evrelerinin gerçekleştiği görülmektedir. Erişme evresinde sistem, I. Bölgeden IV. Bölgeye taşınmakta ve daha sonra kayma evresi gerçekleşmektedir. Kayma evresi sonunda hata ve hatanın türevi sıfırı yakalamaktadır.



Şekil 5.13. Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin açısal hız ve açı değişimi arasındaki ilişki

Şekil 5.13’de kayan kipli kontrollü SVC’li güç sistemine ilişkin açısal hız ve açı değişimi arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi talep gücün değişim noktalarında, açısal hız açığa göre denge noktaları oluşturmaya çalışmaktadır.

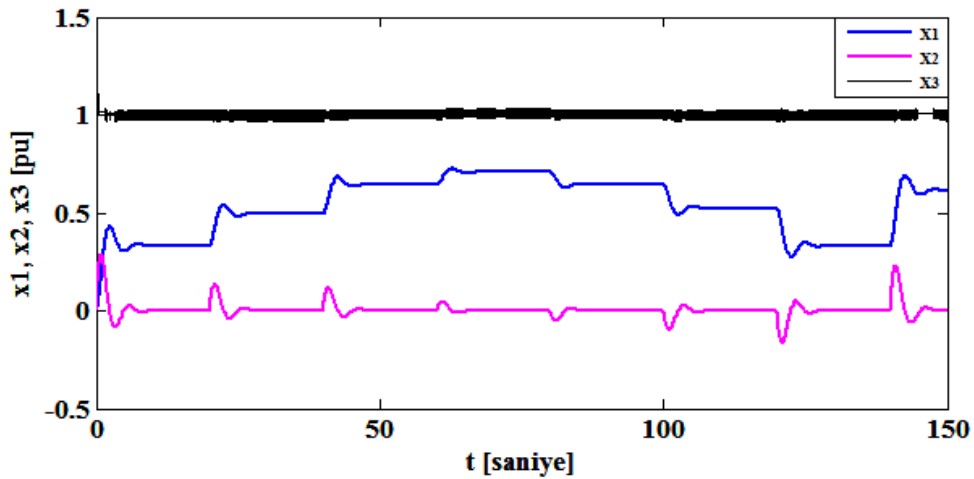


Şekil 5.14. Kayan kipli kontrollü SVC’li güç sistemine ilişkin kayma yüzeyi değişimi

Şekil 5.14’de kayan kipli kontrollü SVC’li güç sistemine ilişkin kayma yüzeyi değişimi verilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi kayma yüzeyi talep güçlere bağlı olarak, -0.01 ve +0.02 aralığında salınımlar yaparak değişmektedir.

Şekil 5.15’de kayan kipli kontrollü SVC’li güç sistemine ilişkin x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimi verilmiştir.

Talep güçlerin değişimine bağlı olarak, x_1 durum değişkeni 0 ve +0.7 aralığında, x_2 -0.2 ve +0.35 aralığında ve genellikle 0, x_3 durum değişkeni ise +1 noktasına çok yakın değişim göstermiştir. x_3 durum değişkeni diğer durum değişkenlerine göre çok daha yüksek frekanslı salınımlar göstermiştir.



Şekil 5.15. Kayan kipli kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimi

5.5. Genetik Algoritma

Genetik algoritmalar diğer optimizasyon tekniklerinden farklı olarak doğal genetik ve doğal seçim kavramlarının kullanımına dayanır. Genetik algoritmalar ikili dizilerden oluşmuş, doğada canlılarda yer alan kromozomların oluşturduğu popülasyonlarla çalışırlar. İkili diziler algoritmanın bulması ya da tanısı gereken parametrelerin kodlanmasıyla gerçekleşir. j bit sayısı olmak üzere; her parametre “E” uzunluğundaki bit dizilerinin, sabit uzunluktaki bir ikili alt dizi uzunluğuna uyar $[0, \dots, 2^j - 1]$. l , u gerçek eksen üzerindeki alt ve üst sınırlar olmak üzere, altdizinin değeri reel eksen üzerinde $[l, u]$ aralığında belirlenir. Dolayısıyla kodlamanın duyarlılığı $(u - l) / (2^j - 1)$ şeklindedir. Neticede dizi, η sayıda parametre kullanılarak elde edilen η adet alt dizinin birleşmesiyle oluşur.

Genetik algoritma bir diziler popülasyonu ile birlikte global optimum noktayı bulmayı amaçlar. Başlangıç popülasyonu gelişigüzel üretilir ve popülasyon büyüklüğü global optimum değerler bulana kadar sabit tutulur. Algoritma yalnızca, popülasyondaki her bir kromozoma ait uygunluğun kontrol edilmesini gerektirir.

En basit formda genetik algoritma 3 adımda gerçekleştirilebilir: üreme, çaprazlama ve mutasyon. Üreme aşamasında, kromozom dizileri normalize edilmiş uygunluklarına göre seçilir. Popülasyonun yeni bireyleri ana arama operatörü olan

kromozomlar arası çaprazlamalar ile üretilir. Çaprazlama operatörü ile iki farklı kromozom gelişigüzel eşleştirilir ve kromozomların ihtiva ettiği genler bu iki kromozom arasında yer değiştirerek yeni bireyler üretilmiş olur. Üretilen yeni birey, çaprazlama yapılan kromozomların ihtiva ettiği karakterize özelliklere sahip olur. Örneğin elimizde iki kromozom olduğu varsayılırsa

00000000

11111111

yazılabilir.

[1 8] aralığında gelişigüzel elde edilen bir sayıya göre çaprazlama yapılırsa

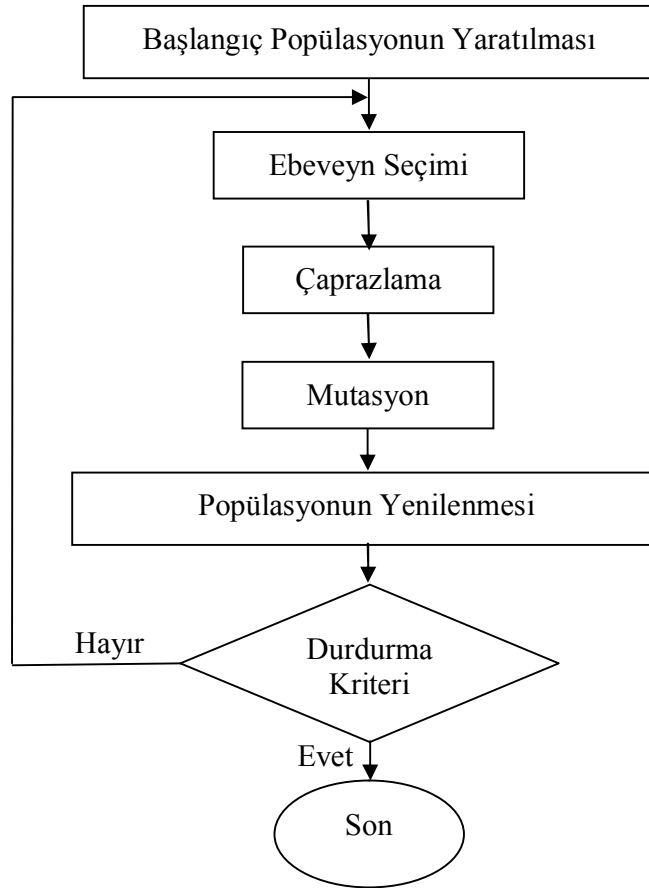
11100000

00011111

yeni kromozomlar elde edilir. Burada seçilen kromozomların 3. elemanına göre çaprazlama gerçekleştirildi. Bu operatör kromozomların üstün özelliklerinin sonraki nesillere aktarılmasını sağlar. Global optimum noktayı arama işi önceki nesillerden elde edilen bilgilerin en iyi şekilde kullanılarak sonraki nesillere aktarılmasıyla gerçekleştirilir.

Mutasyon operatörü, bir kromozomdaki herhangi bir bitin tümleyenine eşittir. Örneğin 11100000 kromozomu 3. bitine göre mutasyona uğrarsa mutasyona uğrayan kromozom 11000000 olur.

Bu adımlar belirlenen bir sonlandırma kriteri gerçekleşinceye kadar tekrarlanmaya devam eder. Genetik algoritmanın iyi sonuç verebilmesi için yeterli sayıda nesil sayısı işleminin, sistem için sonlandırma kriteri olmalıdır. Söz konusu açıklamalar doğrultusunda geliştirilen genetik algoritma akış şeması Şekil 5.16'da gösterilmiştir.

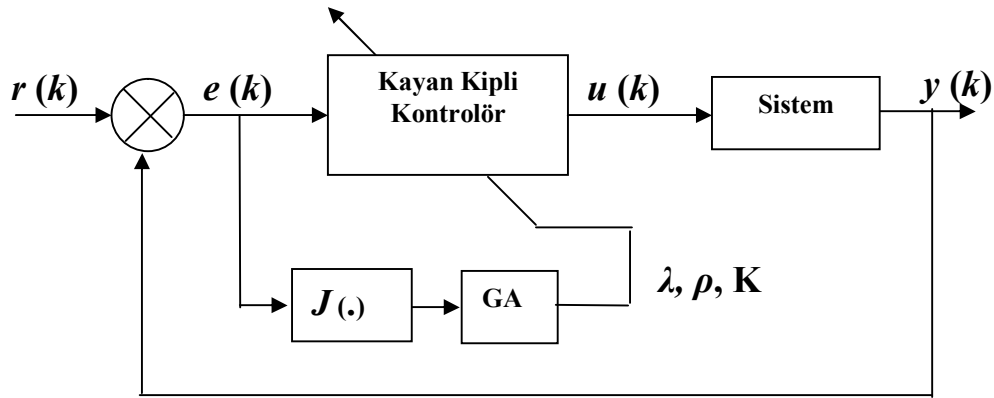


Şekil 5.16. Genetik algoritma akış şeması

Genetik algoritmalar özünde paralel çalışma yapısına sahiptir. Aslında bütün dizi ya da popülasyonun bireyleri merkezi bir koordinasyon olmadan eşzamanlı olarak evrim geçirirler. Popülasyonun tüm potansiyelini görebilmek için, genetik algoritmalar paralel bilgisayar mimarisinde uygulanmalıdır.

Tasarım maliyet fonksiyonu, genetik algoritma performansı ile doğrudan ilgilidir. Şekil 5.17 ile verilen kayan kipli kontrol istemine ilişkin maliyet fonksiyonu ayrık zamanlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir [99].

$$J(\lambda, \rho, K) = \sum_{k=0}^{\infty} [e(k)]^2 = \sum_{k=0}^{\infty} [r(k) - y(k)]^2 \quad (5.43)$$



Şekil 5.17. Kayan kipli kontrole ilişkin optimizasyon yapısı[99]

Maliyet fonksiyonu minimum olduğunda, çalışma aralığına ilişkin SMC parametreleri optimum olacaktır [90].

5.6. Genetik Algoritma (GA) Tabanlı Benzetim Sonuçları

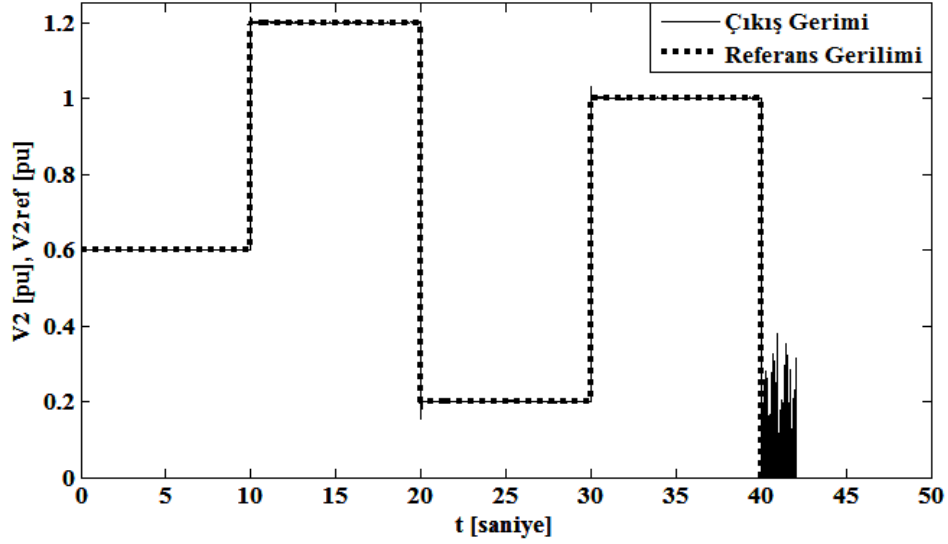
Ayırıt (3.4)'de (3.5) eşitliği ile verilen SVC'li güç sisteminin (Test Sisteminin) kayan kipli kontrolüne ilişkin optimal kontrol parametreleri için genetik algoritma tabanlı optimizasyon işlemi Matlab 7.1 yazılımının gatool yazılım pakatei kullanarak gerçekleştirilmiştir. GA parametreleri: popülasyon boyutu 50, genetik türetme(gelişim) sayısı 200 olarak seçilmiştir. Çaprazlama fonksiyonu dağınık, mutasyon fonksiyonu ise gauss şeklindedir. GA kullanılarak elde edilen optimizasyon işlemi sonucunda kayan kipli kontrol için, $\lambda = 34$, $\rho = 12$ ve $k = 61$ optimal parametreleri elde edilmiştir.

Sabit ve değişen talep güçler için GA tabanlı kayan kipli kontrol (GASMC)'ün başarımlarını ve PI kontrol ile karşılaştırılmasına ilişkin benzetim sonuçları aşağıda verilmiştir.

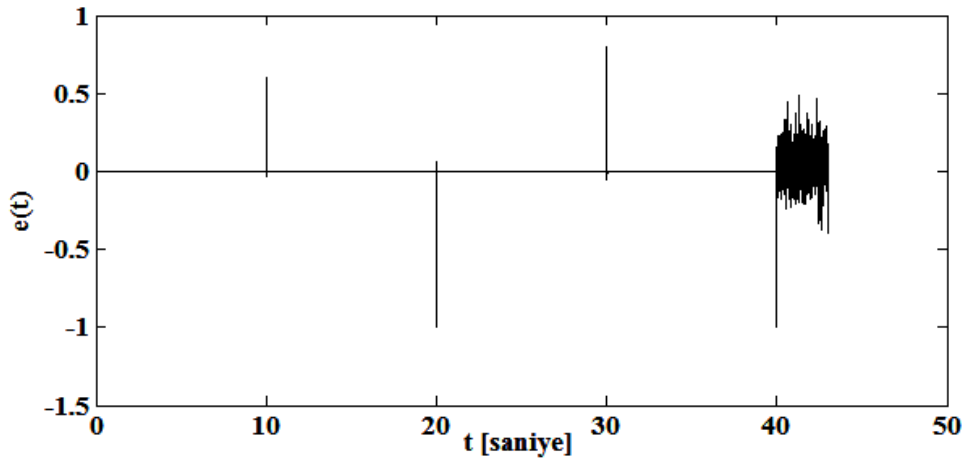
Sabit talep güç altında elde edilen başarımlar:

Benzetim sonuçları 1.2 pu luk sabit talep gücü altında elde edilmiştir. Benzetim sonucunda; Çıkış gerilimi, faz uzaı (erişme ve kayma evreleri) değişimi, kayma

yüzeyi değişimi ve sabit talep gücü altında çıkış gerilimine ilişkin grafikler elde edilmiştir.

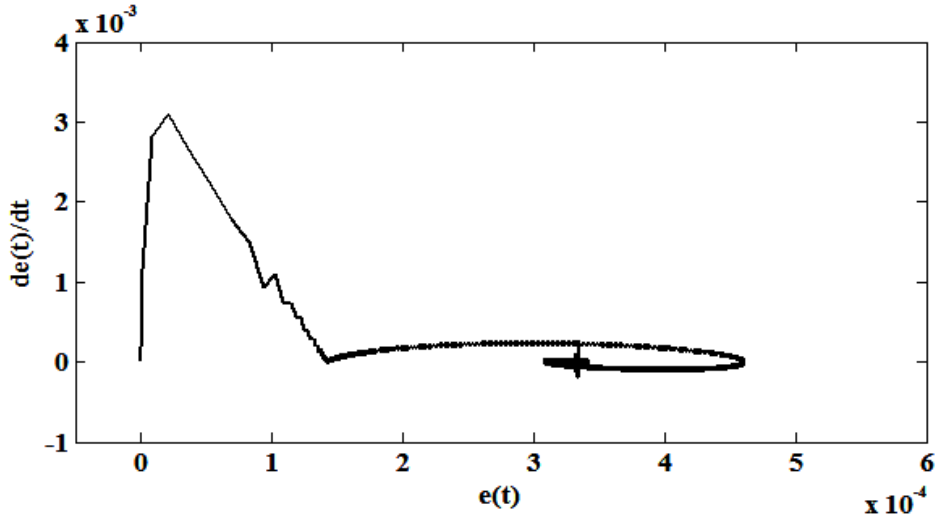


Şekil 5.18. GASMC kontrolörün değişik genlikli referans sinyallerine ilişkin cevabı



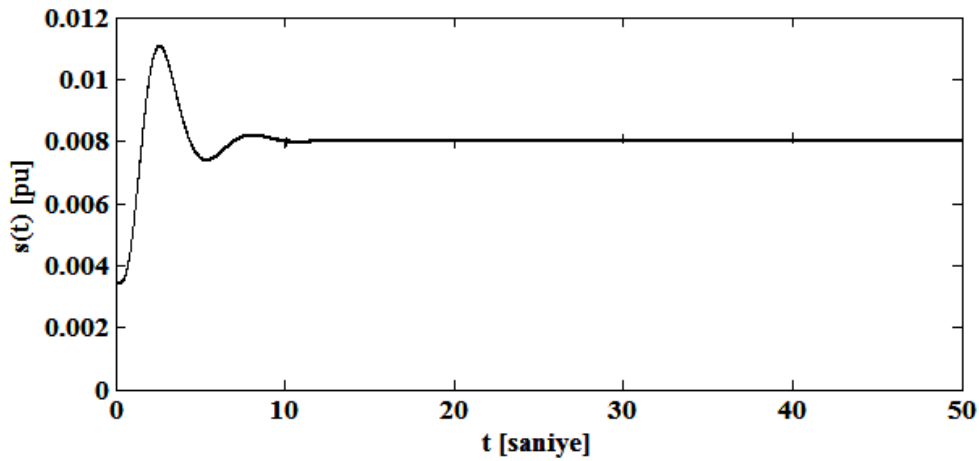
Şekil 5.19. GASMC kontrolörün değişik genlikli referans sinyallerine ilişkin hata eğrisi

Şekil 5.18'dan ve Şekil 5.19'daki hata grafiğinden GASMC kontrolörlü güç sisteminin çıkış geriliminin referans gerilimini oldukça küçük hata ile izlediği görülmektedir. Sadece referans girişinin değişim anlarında genlik hataları bulunmaktadır.



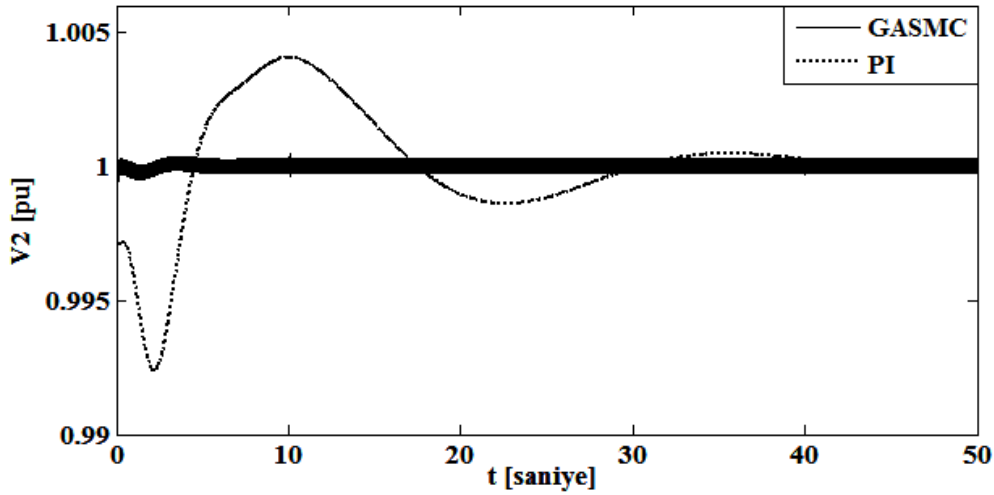
Şekil 5.20. GASMC kontrolör için faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri

Erişme ve kayma evrelerin oldukça hızlı ($\times 10^{-4}$) ve küçük genliğe ($\times 10^{-3}$) sahip olduğu Şekil 5.20'den görülmektedir. Şekil 5.21'de ise, kayma yüzeyi titreşim genliği $\pm 10^{-4}$ aralığında değişmektedir. Yaklaşık 10 saniye sonunda ise kararlı hale gelmektedir.



Şekil 5.21. GASMC kontrolör için kayma yüzeyi değişimi

Şekil 5.22'de GASMC ve K_p - K_I parametreleri Zigler-Nicholes yöntemiyle belirlenmiş olan PI kontrolöre ilişkin çıkış geriliminin birim basamak girişine ilişkin cevap eğrileri verilmiştir. Bu cevap eğrilerinden kontrolörlerin performans kriterleri elde edilmiş ve Tablo 5.1 de gösterilmiştir. Tablodan; minimum aşım, minimum erişme süresine, minimum durulma süresine ve yeterince küçük kalıcı hataya sahip olan çıkış geriliminin GASMC kontrolör ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.22. Sabit talep gücü altında GASMC ve PI kontrolöre ilişkin çıkış geriliminin birim basamak giriş cevap eğrileri

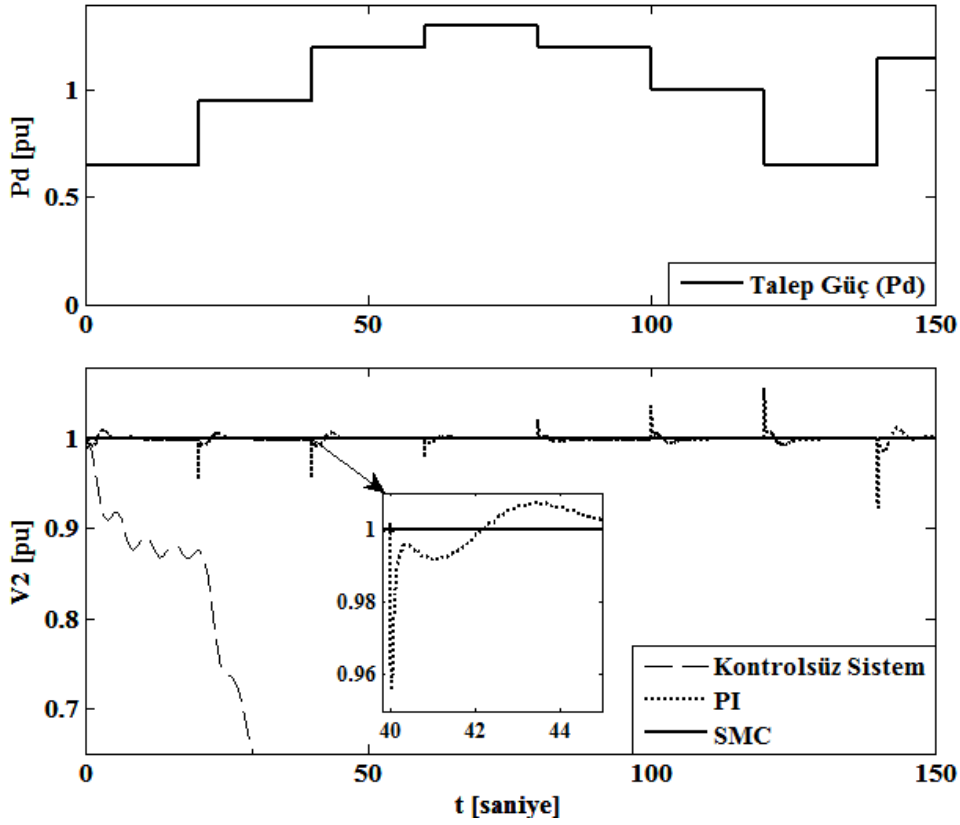
Tablo 5.1. GASMC ve PI kontrolörlü sistem için elde edilen amaç ölçüt değerleri

Kontrolör	M_p	r_s	t_p	s_t	e
PI	0.004	5	10	28	0.005
GASMC	0.0001	0.0001	3	0	0.001

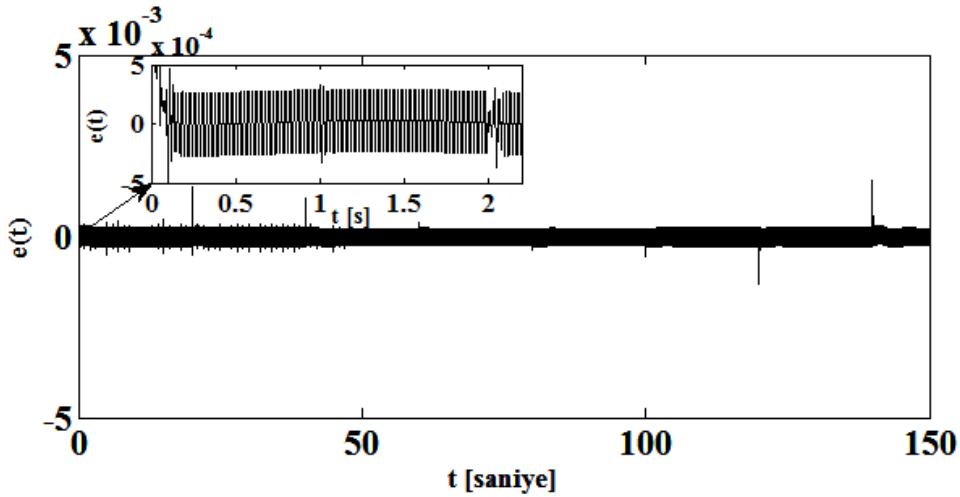
Değişken talep gücü altında elde edilen başarımlar:

Değişken talep gücüne bağlı olarak yürütülen benzetim çalışması sonucunda; değişken talep gücü değişimine bağlı olarak çıkış gerilimi, hata değişimi, kontrol işaretini değişimi, anahtarlama işaret değişimi ve x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimine ilişkin eğriler ayrı ayrı elde edilmiştir.

Şekil 5.23'de talep gücü değişim anlarında, PI kontrol gerilim düşümlerini önleyememiş ve sistemi istenilen 1.0 pu gerilim seviyesine çıkarmak için aşım ve durulma süresine ihtiyaç duymuştur. GASMC ise oldukça küçük bir hata ve aşım ile referans girişini yakalamaktadır.



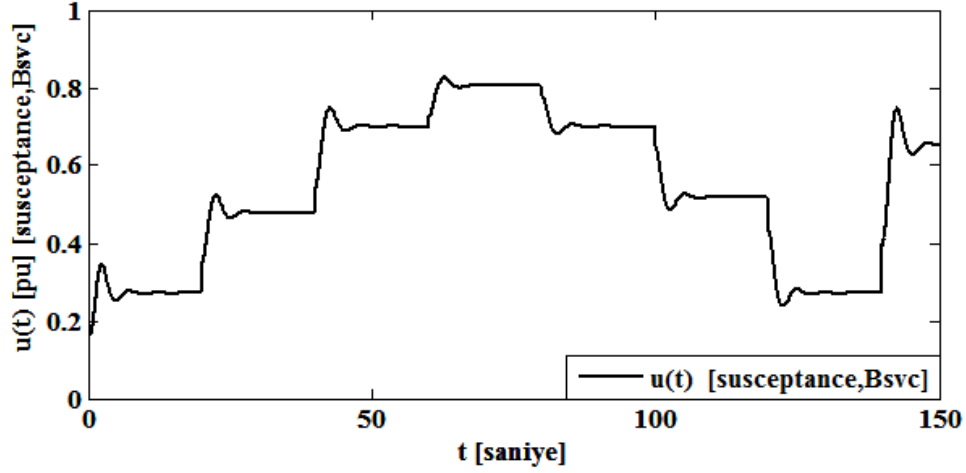
Şekil 5.23. Talep güç değişimine göre PI ve GASMC kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin çıkış gerilimi değişimi



Şekil 5.24. GASMC kontrolörlü SVC'li güç sistemine ilişkin çıkış gerilimi hata eğrisi

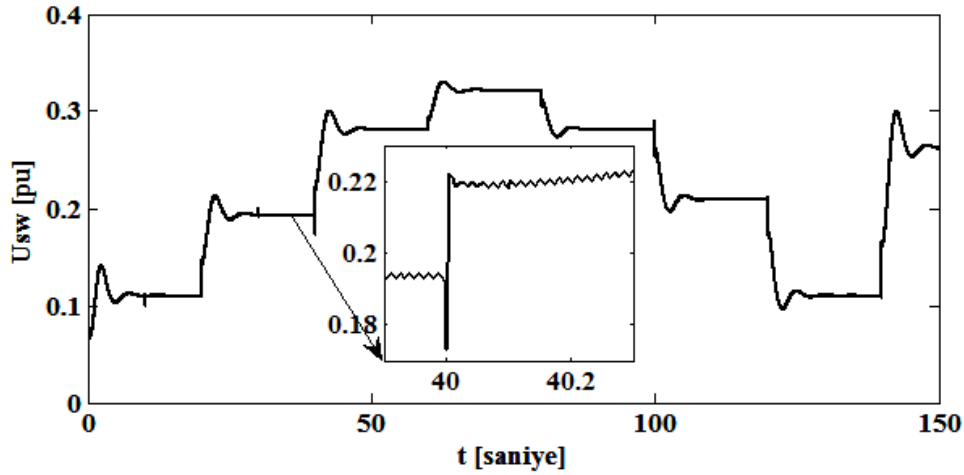
GASMC kontrolör için elde edilen çıkış gerilimi hatasının zamana göre değişimi Şekil 5.24'de verilmiştir. Şekilden, sürekli hal hatasının yaklaşık olarak ± 0.000281 aralığında değiştiği görülmektedir. Kontrolsüz sistemde ise belli bir gücün üzerinde gerilim çöküşü yaşanmaktadır. Artan talep güç seviyesi karşısında sistemin ihtiyaç

duyduğu susceptances değeri de artmaktadır ve 0.18-0.8 pu aralığında değişmektedir (Şekil 5.25).



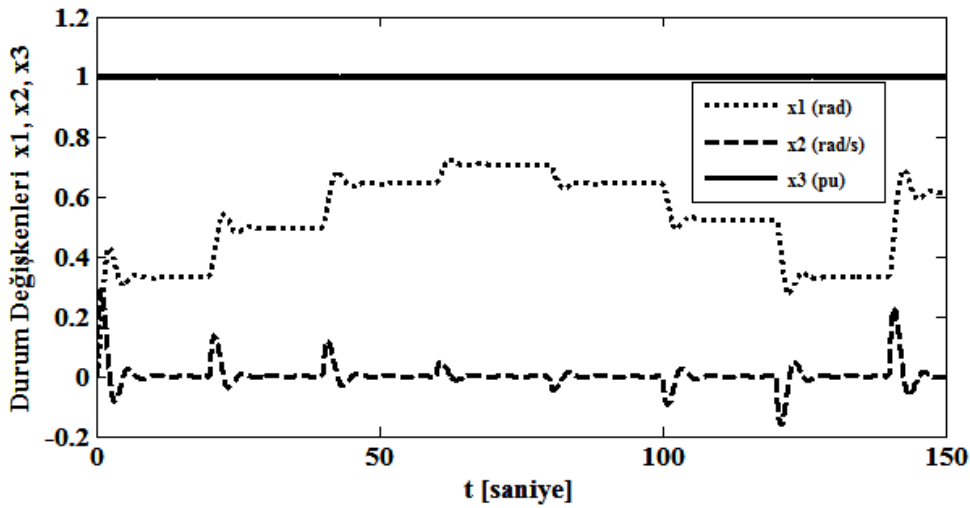
Şekil 5.25. GASMC'nin ürettiği kontrol işareti

GASMC'ye ilişkin anahtarlama kontrol işaretinin ($u_{sw}(t)$ -switching control) zamana göre değişim eğrisi Şekil 5.26'da verilmiştir.



Şekil 5.26. GASMC'ye ilişkin anahtarlama işaretinin zamana göre değişimi

GASMC kontrollü SVC'li güç sisteminin durum değişkenlerinin zamana göre değişimi Şekil 5.27'de gösterilmiştir. Şekilden, x_1 0.2-0.8 pu aralığında, x_2 sıfıra çok yakın, x_3 ise 1.0 pu ya oldukça yakın bir değişime sahip olduğu görülmektedir.

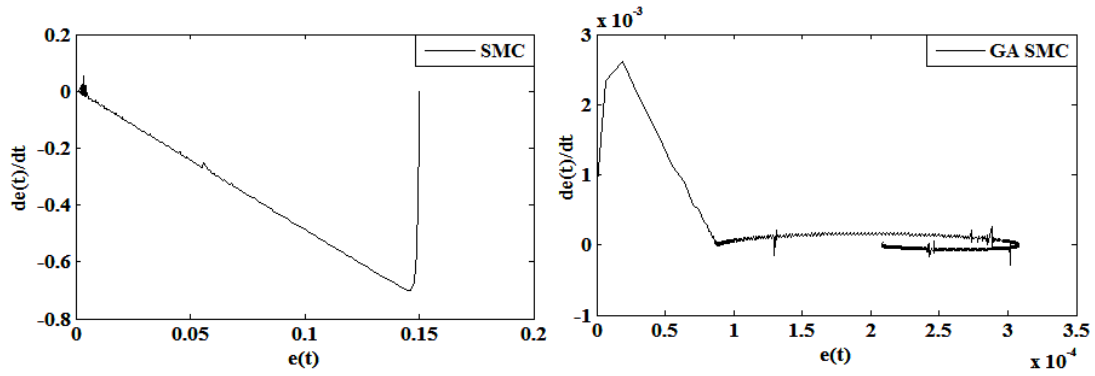


Şekil 5.27. GASMC kontrollü SVC'li güç sistemine ilişkin x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimi

Şimdi de aynı güç sisteminde değişen talep güçler için SMC ve GASMC kontrolörlere ilişkin benzetim sonuçlarından elde edilen başarımlarını karşılaştıralım: Kayan Kipli Kontrolün pratik sistemlere uygulanması için mekanik anahtarlama hızının azaltılması gerekir. Bunun için anahtarlama fonksiyonu Signum yerine Tansig fonksiyonu kullanılarak modellenenabilir. Söz konusu anahtarlama hızını azaltmak için benzetim çalışmalarında, $P_d=1.3$ pu seçilmiştir.

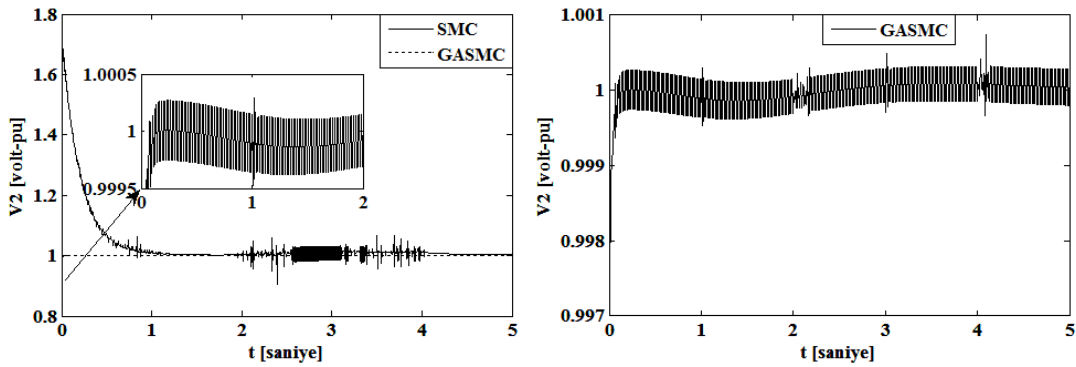
SMC ve GASMC tabanlı SVC'li güç sisteminin kontrolüne ilişkin benzetim çalışmalarında öncelikle, anahtarlama sinyallerinin grafikleri, akabinde anahtarlama sinyalinin Fast Fourier Transform (FFT) elde edilmiştir.

SMC ve GASMC metotlarının başarımlarını karşılaştırmak için; çıkış-giriş gerilim grafiği, talep güç değişimine bağlı çıkış gerilimi ve kontrol işareti değişimi grafiği, anahtarlama işaret değişimi grafiği, faz uzayı değişimi grafiği, erişme ve kayma evreleri grafiği, açılma hız ve açı değişimi arasındaki ilişki grafiği, kayma yüzeyi değişimi grafiği, x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimi grafiği elde edilmiştir.



Şekil 5.28. SMC ve GASMC kontrolör için faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri

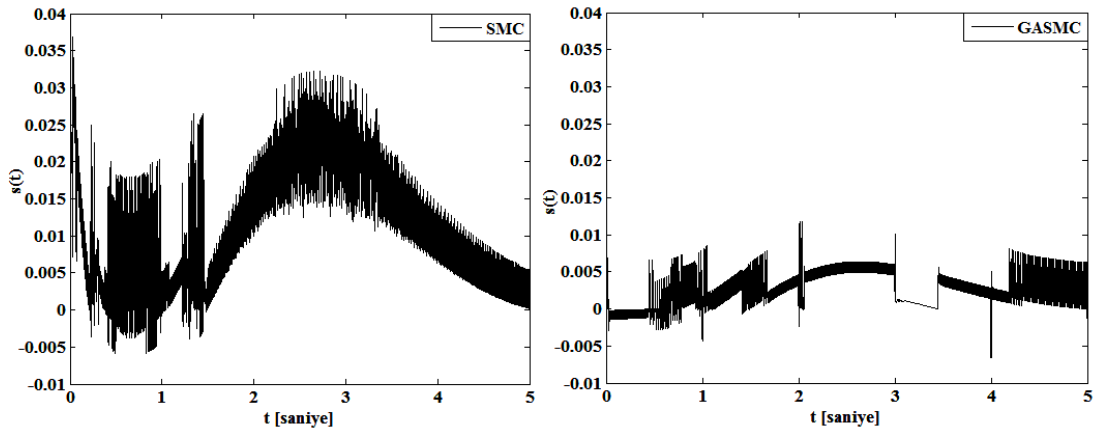
Şekil 5.28’de verilen SMC ve GASMC faz uzayı eğrilerinden, GASMC nin SMC ye göre çok daha hızlı ve küçük genlikli erişme ve kayma evresine sahip olduğu görülmektedir.



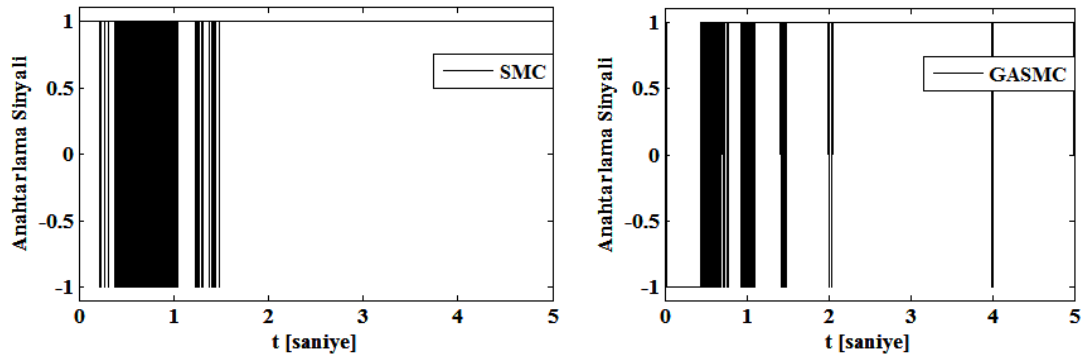
Şekil 5.29. SMC ve GASMC kontrolöre ilişkin çıkış gerilimi cevap eğrileri

Şekil 5.29’da SMC ve GASMC kontrolöre göre V_2 çıkış gerilimi değişimleri verilmiştir. Şekilden SMC kontrolde V_2 çıkış gerilimi 1.7 pu dan 1 saniye içerisinde 1 pu referans düzeyini yakaladığı ve yüksek hatalı ve titreşimli cevaplar verdiği görülmektedir. GASMC kontrolde ise düşük kalıcı hataya sahip ve minimal titreşimli (% 0.01) cevaplar vermektedir.

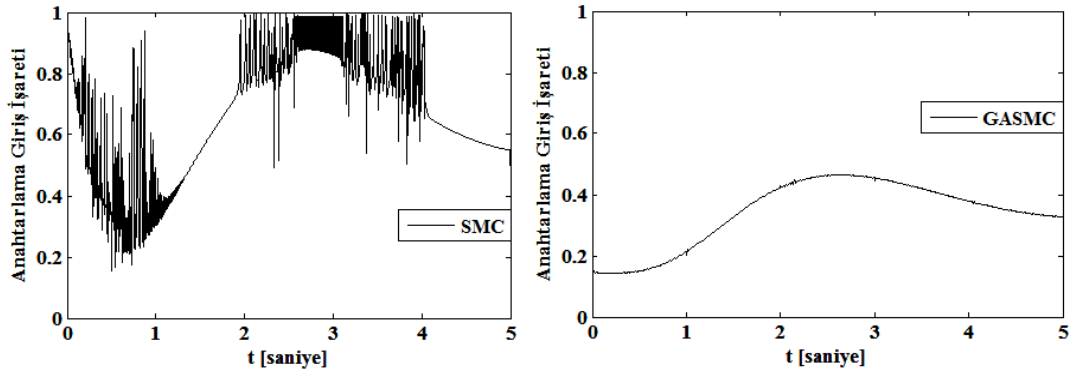
Şekil 5.30’da SMC ve GASMC kontrolöre ilişkin kayma yüzeyi değişimi verilmiştir. Şekilden, kayma yüzeyi titreşim genliğinin SMC kontrolde daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.30. SMC ve GASMC kontrolörler için kayma yüzeyi değişimi



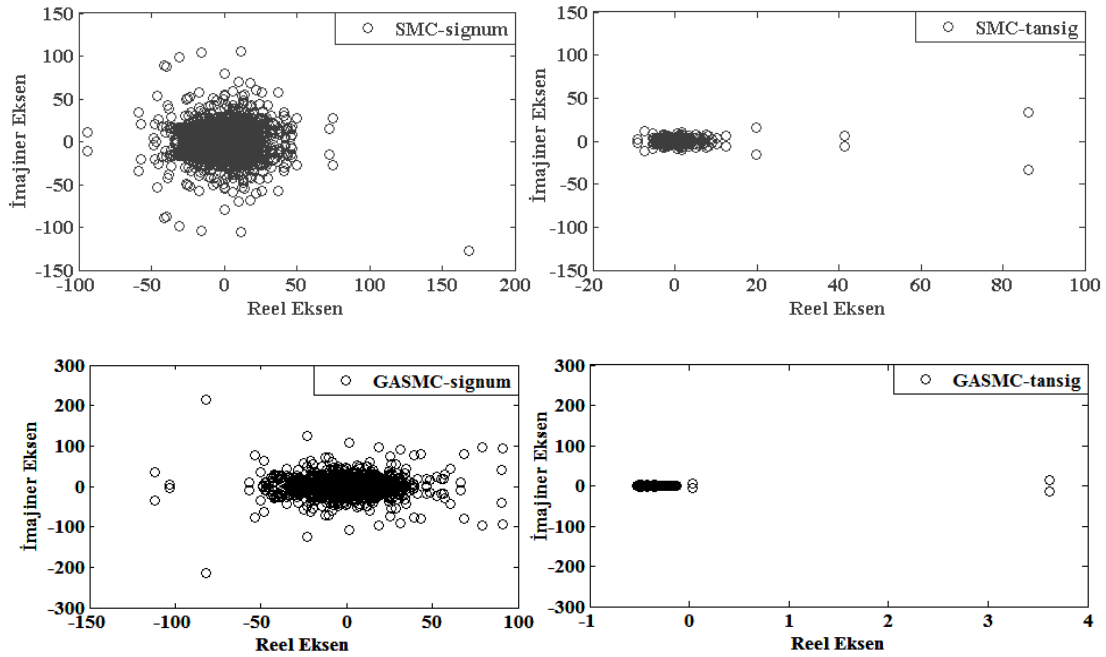
Şekil 5.31. Sign(.) fonksiyonunun kullanıldığı SMC ve GASMC için anahtarlama giriş işareti $u_{sw}(t)$ nin zamana göre değişimi



Şekil 5.32. Tansig(.) fonksiyonunun kullanıldığı SMC ve GASMC için anahtarlama giriş işareti $u_{sw}(t)$ nin zamana göre değişimi

Şekil 5.31 ve Şekil 5.32’de SMC ve GASMC’ye ilişkin şekiller incelendiğinde sign(.) fonksiyonu yerine tansig(.) fonksiyonu kullanımı, anahtarlama giriş işaretinin titreşim genliğini ve frekansını düşürdüğü görülmektedir. GASMC de tansig(.)

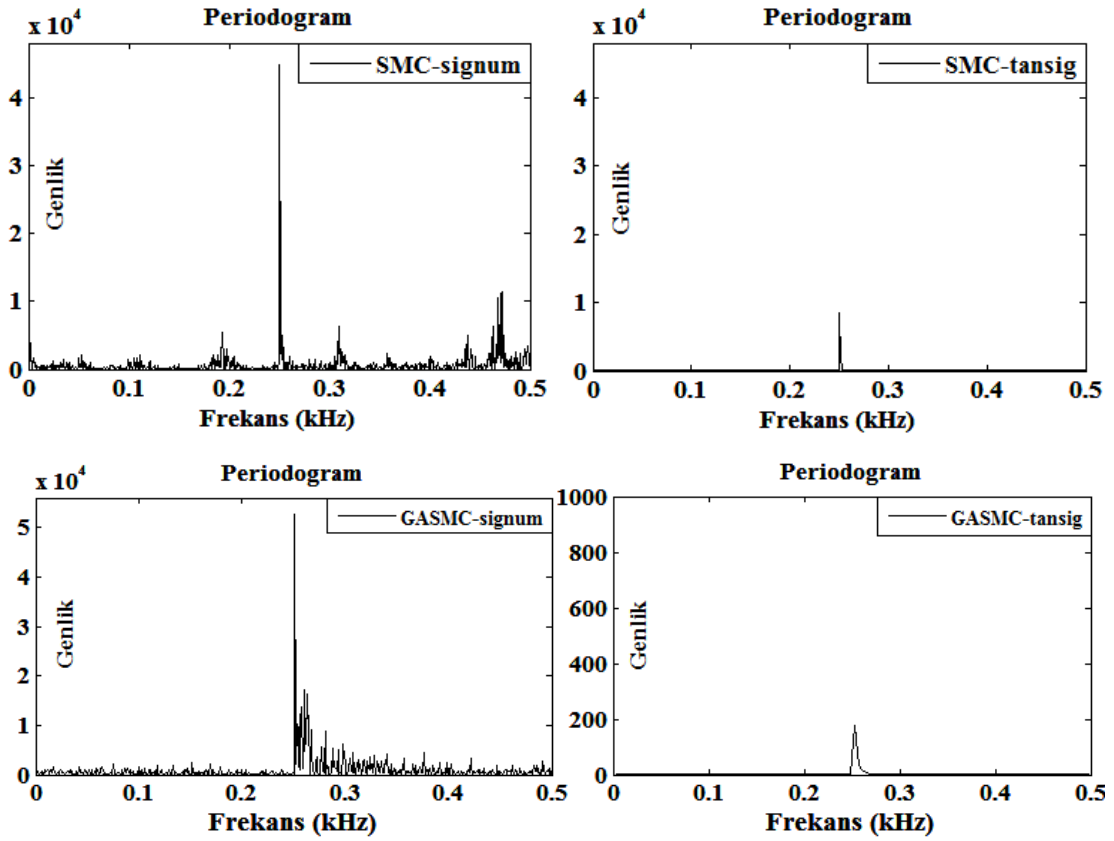
fonksiyonunun kullanımı genliği ve frekansı kabul edilebilir bir düzeye düşürmüştür. Bunun anahtarlama giriş sinyalinin FFT'sine ilişkin frekans analizleri yaparak farklı bir pencereden inceleyebiliriz. Sinyalin FFT si alındıktan sonra elde edilen Fourier katsayıları Şekil 5.33'de ve frekans analiz cevapları ise Şekil 5.34'de verilmiştir.



Şekil 5.33. Anahtarlama giriş sinyalinin FFT'sine ilişkin karmaşık Fourier dönüşüm katsayıları

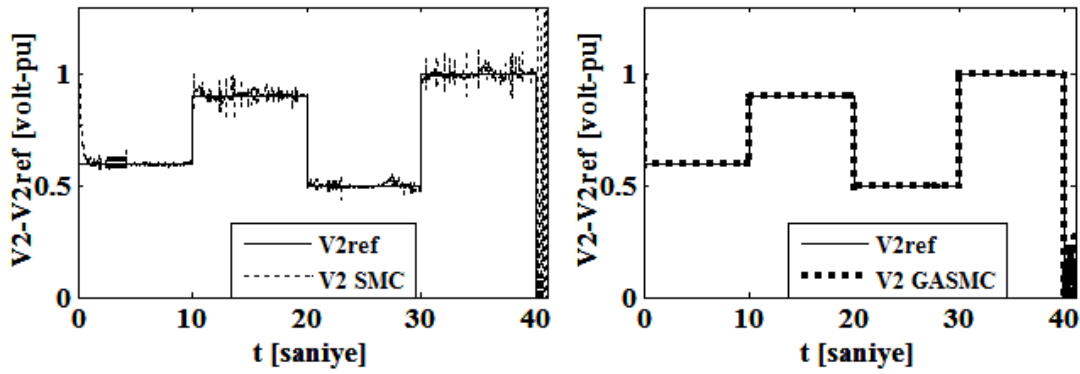
Şekil 5.33'de SMC ve GASMC'ye ilişkin $\text{signum}(\cdot)$ fonksiyonu için elde edilen benzetim sonuçlarından farklı fourier katsayılarının çokluğu ve sanal kök dağılımının yüksek olması, titreşimlerin gürültülü olduğu ve harmoniklerin oluştuğunu göstermektedir.

Aynı şekilde SMC ve GASMC'ye ilişkin $\text{tansig}(\cdot)$ fonksiyonu için elde edilen sonuçlarda ise elde edilen gerçel köklerin solda olduğu, fourier katsayılarının ise aynı genlik noktalarında toplandığı görülmektedir.



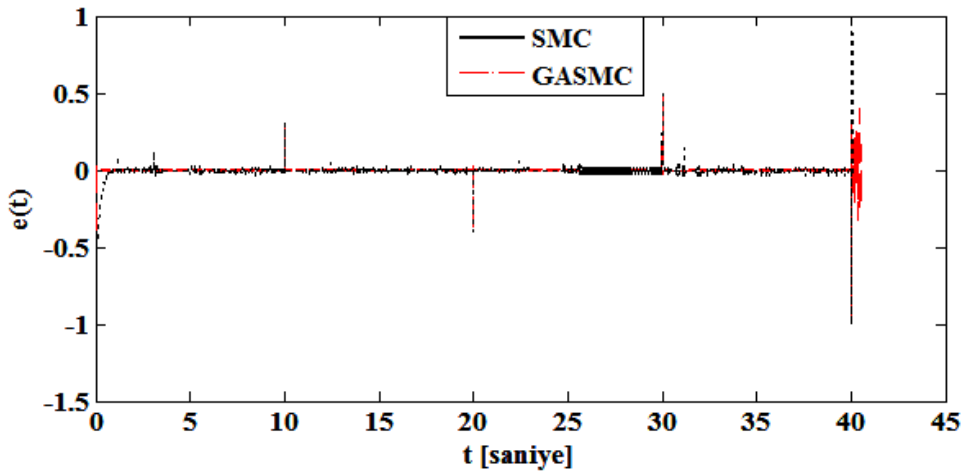
Şekil 5.34. Anahtarlama giriş sinyalinin FFT'sine ilişkin Frekans spektrumu

Periodogram, bir sinyalin güç spektral yoğunluğunun bir tahminidir. Şekil 5.34'de SMC ve GASMC'ye ilişkin $\text{signum}(\cdot)$ fonksiyonu için elde edilen benzetim sonuçlarında, SMC için elde edilen grafik de 250 Hz etkin frekansının dışında gürültü harmoniklerinin genlikleri 1×10^4 seviyesine kadar çıkmıştır. GASMC için ise söz konusu harmoniklerin genliği SMC ye göre daha düşük olmasına rağmen 0-500 Hz aralığında sürekli gürültü titreşim frekansına sahiptir. Şekil 5.34'de SMC ve GASMC'ye ilişkin $\text{tansig}(\cdot)$ fonksiyonu kullanıldığında, ise gürültü harmonikleri bastırılmış 250 Hz civarındaki etkin frekansa sahip olan işaretler elde edilmiştir. Harmoniklerin genlik düzeyi SMC metodunda 10^4 düzeyinde iken, GASMC metodunda 2×10^2 düzeyine azaltıldığı görülmektedir.



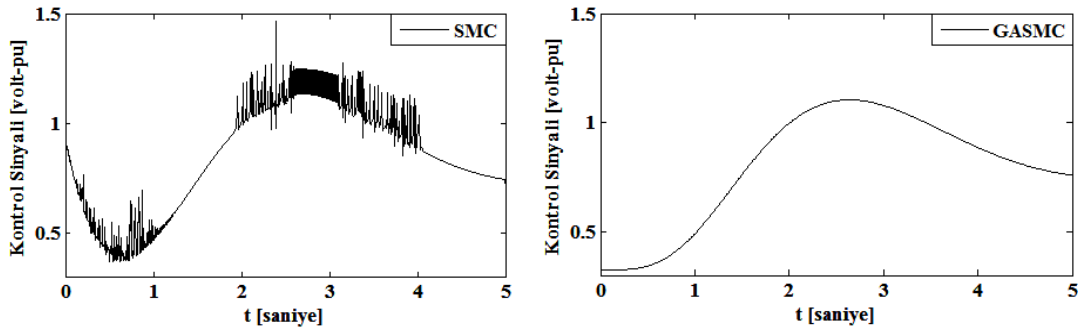
Şekil 5.35. SMC ve GASMC kontrolörlü sistemin değişik genlikli referans girişine ilişkin cevap eğrileri

Şekil 5.35’de SMC ve GASMC kontrolörlü güç sisteminin değişik genlikli referans girişine ilişkin cevap eğrileri verilmiştir. Şekil 5.36’da ise aynı sisteme ilişkin hata eğrileri verilmiştir. Söz konusu cevap eğrilerinden SMC kontrolörlü sistemin titreşimli ve geniş hata aralığına sahip bir cevap eğrisine, GASMC kontrolörlü sistemde ise titreşimsiz ve girişi oldukça küçük bir hatayla izleyen bir cevap eğrisine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.36. SMC ve GASMC kontrolörlü sistemin değişik genlikli referans girişine ilişkin çıkış hatasının zamana göre değişimi

Şekil 5.37’de SMC ve GASMC için kontrol sinyallerinin değişim grafikleri verilmiştir. Grafiklerden, SMC kontrol sinyali geniş bir değişim aralığına sahip iken GASMC’ye ilişkin kontrol sinyalinin çok dar bir değişim aralığına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5.37. Kontrol sinyallerinin değişimi

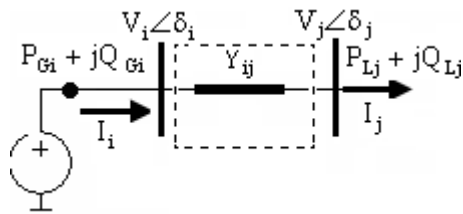
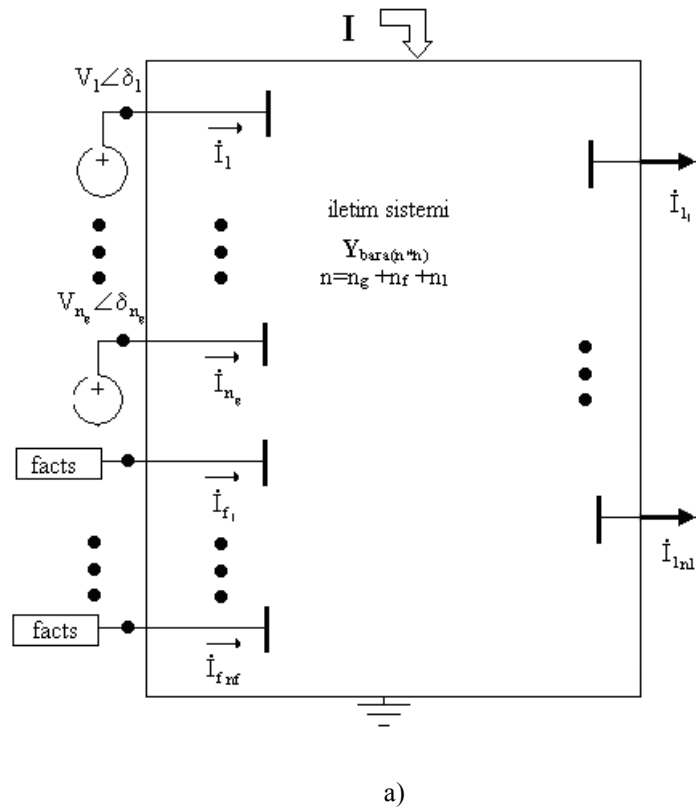
5.7. Kayan Kipli Kontrol Yönteminin SVC'li N-Baralı Güç Sistemine Uygulanması

5.7.1. İki kapılı şebekenin incelenmesi

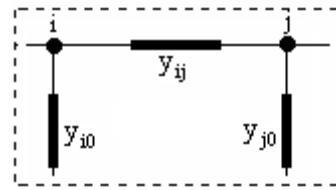
N-Baralı güç sistemi, yük akışı analizi ile iki kapılı şebekeye indirgenmiştir. Söz konusu indirgenme sırasında, yük barası ile, salınım barası olarak seçilen bir üretim barası dışındaki tüm baralardaki güç injeksiyonları, yönleri de göz önüne alınarak, bara admitans matrisine katılırlar. Böylelikle sistem o yüklenme durumu için korunmuş olur. Elde edilen yeni bara admitans matrisine “düğüm indirgeme tekniği” uygulanarak, ilgili bara ile salınım barası dışındaki tüm baralar indirgenir [69,100].

Modellenen bu tür iki kapılı sistemlerin admitans matrisleri simetrik olduğundan, $Y_{ij} = Y_{ji}$ yazılabilir. Ele alınan iki kapılı güç sisteminin pi eşdeğer devresi Şekil 5.38c'de verilmiştir. İndirgenmiş iki kapılı sistemin admitans matrisi ise aşağıdaki formda yazılabilir.

$$Y_{bus_{red}} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{ij} + y_{i0} & -y_{ij} \\ -y_{ji} & y_{ji} + y_{j0} \end{bmatrix} \quad (5.44)$$



b)



c)

Şekil 5.38.(a). N- Baralı güç sisteminin genelleştirilmiş gösterimi (b) İndirgenmiş eşdeğeri c) İki kapılı indirgenmiş sistemin pi eşdeğer devresi [69,100]

Şekil 5.38b'de gösterilen **i** ve **j** baraları arasında iki kapılı şebekeye ilişkin denklem 5.44 ile verilen admitans matrisine bakılarak pi eşdeğer devre sabitleri bulunabilir. Buna göre güç akışı eşitliklerinden **i**. baraya ilişkin P_{gi} aktif ve Q_{gi} reaktif güç, aşağıdaki eşitlikler ile verilebilir.

$$P_{gi} = V_i V_j (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad (5.45)$$

$$Q_{gi} = V_i V_j (c_1 \sin \delta - c_2 \cos \delta) + \frac{V_i^2 (d_1 b_2 - d_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_i V_j}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) - (d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] \quad (5.46)$$

Benzer şekilde j. baraya ilişkin aktif ve reaktif güçler için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\left. \begin{aligned} P_{ij} &= \frac{V_i V_j (b_1 \cos \delta + b_2 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_1 + a_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} \\ Q_{ij} &= \frac{V_i V_j (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_j^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (5.47)$$

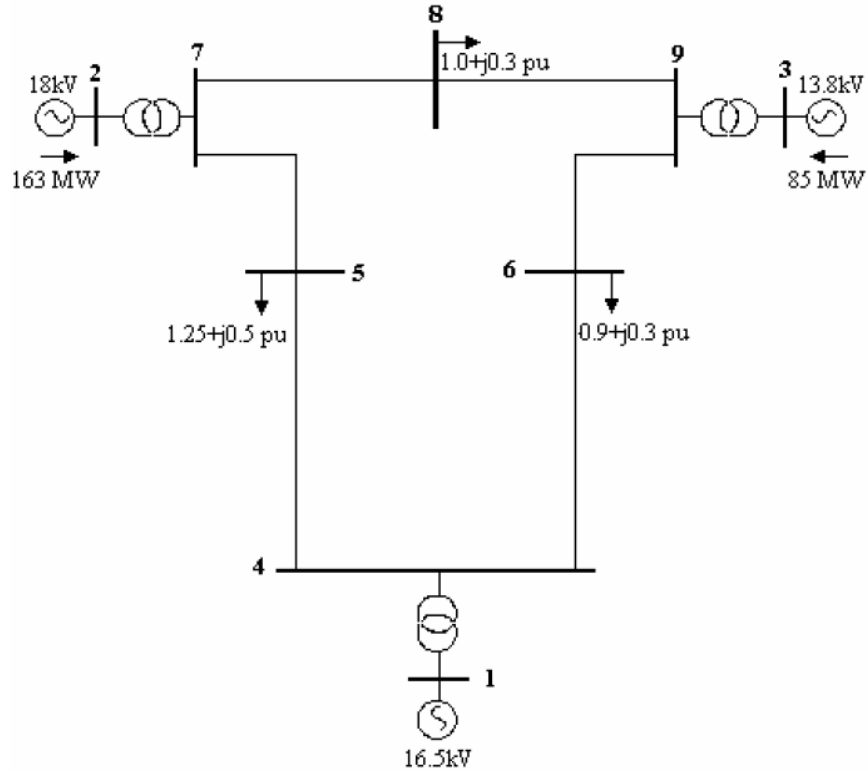
j. baraya bağlı olan SVC için Q_{ij} ifadesine ek olarak SVC'nin üretmiş olduğu reaktif güç $V_j^2 B_{svc}$ ilave edilir [69,99,]. Burada sisteme ilişkin iki kapılı indirgenmiş pi eşdeğer sabitleri,

$$\dot{A} = a_1 + ja_2, \quad \dot{B} = b_1 + jb_2, \quad \dot{C} = c_1 + jc_2, \quad \dot{D} = d_1 + jd_2$$

olarak tanımlanmıştır.

5.7.2. WSCC (Western System Coordinating Council) dokuz baralı sistem

Dokuz baralı güç sisteminin şematik çizimi Sekil 5.39'da verilmiştir. Burada sisteminin baz değerleri $S_{baz} = 100 \text{ MVA}$, $V_{baz} = 230 \text{ kV}$ olarak alınmıştır. Yük baralarından çekilen güçler ise normalize edilmiş (pu) olarak verilmiştir.



Şekil 5.39. Dokuz Baralı WSCC Sistemi

Ele alınan SVC'siz 9 baralı güç sisteminin iletim hattına ait bilgiler Tablo 5.2'de, güç akışına ilişkin bara gerilimi ve açı değerleri Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.2. SVC'siz dokuz baralı WSCC sisteminin hat verileri [69]

Hatların bağlı olduğu baralar	Hatların Omik direnç değerleri (R)	Hatların endüktif reaktans değerleri (X)	Hatların şönt admitans değerleri (y/2)
4-5	0.0100	0.0850	0.1760
4-6	0.0170	0.0920	0.1580
6-9	0.0390	0.1700	0.3580
7-8	0.0085	0.0720	0.1490
5-7	0.0320	0.1610	0.3060
8-9	0.0119	0.1008	0.0522

Tablo 5.3. SVC'nin kullanılmadığı 9 baralı WSCC sisteminin güç akışına ilişkin bara gerilim ve açı değerleri [69]

Bara no	Bara tipi	V (pu)	δ (der)	Bara güç değerleri	
				P(MW)	Q(MVar)
1	salınım	1.0400	0.0	71.641	27.045
2	PV	1.0250	9.280	163.00	6.6536
3	PV	1.0250	4.664	85.00	-10.8597
4	PQ	1.0258	-2.216	0.00	0.00
5	PQ	0.9956	-3.988	-126.01	-50.44
6	PQ	1.0127	-3.6875	-87.76	-29.25
7	PQ	1.0258	3.7197	0.00	0.00
8	PQ	1.0159	0.7275	-96.9	-33.91
9	PQ	1.0324	1.9667	0.00	0.00

PSAT programıyla sürekli güç akışı yapıldığında, $\frac{\Delta v}{\partial \lambda}$ değeri en büyük olan 5 numaralı baradır. Ayrıca bu baranın gerilimi 0.58 pu değerine kadar düşmektedir. Bu nedenlerden dolayı bu bara kritik bara olarak seçilmiştir [69, 100].

Ayrıca bara indirgeme yöntemiyle sistem 1 ve 5 numaralı baralardan oluşan iki baralı basit güç sistemine dönüştürülmüştür. Bu durumda 5 numaralı bara gerilimini 1 pu'ya yükseltmek için gerekli olan Y_{bus} admintansı aşağıdaki gibi elde edilmiştir [69].

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 0.6649 - j7.5136 & -0.5304 + j7.5640 \\ -0.5304 + j7.5640 & -0.1526 - j7.3574 \end{bmatrix}$$

Buradan ele alınan iki kapılı sistemin pi eşdeğer parametreleri de $\dot{A} = 0.9665 - j.0879$, $\dot{B} = 0.0092 + j0.1316$, $\dot{C} = -0.5486 + j0.2436$, $\dot{D} = 0.9946 + j0.0182$ olarak elde edilmiştir.

Şimdi de yukarıdaki 9 baralı WSCC sistemi için verilen verilerinden yararlanılarak N-baralı SVC'li güç sisteminin kontrolü için gerekli olan bir GASMC kontrolörü tasarlayalım:

Bu amaçla N-baralı güç sisteminin durum denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [69].

$$\left. \begin{aligned} \dot{\delta}(t) &= \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) &= \frac{1}{M} (P_m - V_1 V_2 (c_1 \cos \delta + c_2 \sin \delta) + \frac{V_1^2 (d_1 b_1 + d_2 b_2)}{b_1^2 + b_2^2} - \frac{V_1 V_2}{b_1^2 + b_2^2} [(d_1 b_1 + d_2 b_2)(a_1 \cos \delta + a_2 \sin \delta) + (d_1 b_2 - d_2 b_1)(a_2 \cos \delta - a_1 \sin \delta)] - 0.0125 \omega) \\ \dot{V}_2 &= \frac{1}{\tau} \left[\left(\frac{V_1 V_2 (b_2 \cos \delta - b_1 \sin \delta) - V_2^2 (a_1 b_2 - a_2 b_1)}{b_1^2 + b_2^2} - V_2^2 B_{SVC} - 0.5 \right) \right] \\ \dot{B}_{SVC} &= \frac{1}{\tau} (-V_{ref} - V_2) \end{aligned} \right\} (5.48)$$

Sistemin SMC kontrolü için,

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

şeklinde bir kayma yüzeyi seçilirse,

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + \lambda \dot{e} \\ e &= x_{3ref} - x_3 \\ \dot{e} &= \dot{x}_{3ref} - \dot{x}_3 \\ \ddot{e} &= \ddot{x}_{3ref} - \ddot{x}_3 \\ x_{3ref} &= \text{Sabit} \\ \dot{x}_{3ref} &= \ddot{x}_{3ref} = 0 \end{aligned} \right\} (5.49)$$

eşitlikleri yazılabilir.

Sabit-oransal değişimli erişme kuralı,

$$\dot{s} = -\rho \cdot \text{sign}(s) - K \cdot s$$

olarak seçilirse SMC kontrollü güç sistemine ilişkin aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\left. \begin{aligned} \dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} &= \ddot{x}_{3ref} - \ddot{x}_3 + \lambda(\dot{x}_{3ref} - \dot{x}_3) = -\rho.sign(s) - K.s \\ -\dot{x}_3 + \lambda(-\dot{x}_3) &= -\rho.sign(s) - K.s \\ \ddot{x}_3 + \lambda \dot{x}_3 &= \rho.sign(s) + K.s \\ \dot{x}_3 &= 3.781x_3 \cos x_1 - 0.26432x_3 \sin x_1 - 3.6775x_3^2 + 0.5x_3^2u - 0.25 \\ \ddot{x}_3 &= 3.781\dot{x}_3 \cos x_1 - 3.781x_3\dot{x}_1 \sin x_1 - 0.26432\dot{x}_3 \sin x_1 - 0.26432x_3\dot{x}_1 \cos x_1 \\ &\quad - 7.355x_3 + x_3u + 0.5x_3^2\dot{u} \end{aligned} \right\} (5.50)$$

Son eşitliklerde, bozucu ve kontrol giriş işaretinin türevi sıfır alınır ve x_2 çok küçük olduğu dikkate alınır,

$$\left. \begin{aligned} -3.781x_3\dot{x}_1 \sin x_1 &= -3.781x_3x_2 \sin x_1 = 0 \\ -0.26432x_3\dot{x}_1 \cos x_1 &= -0.26432x_3x_2 \cos x_1 = 0 \end{aligned} \right\} (5.51)$$

yazılabilir. Bu veriler ile SMC'li güç sisteminin eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

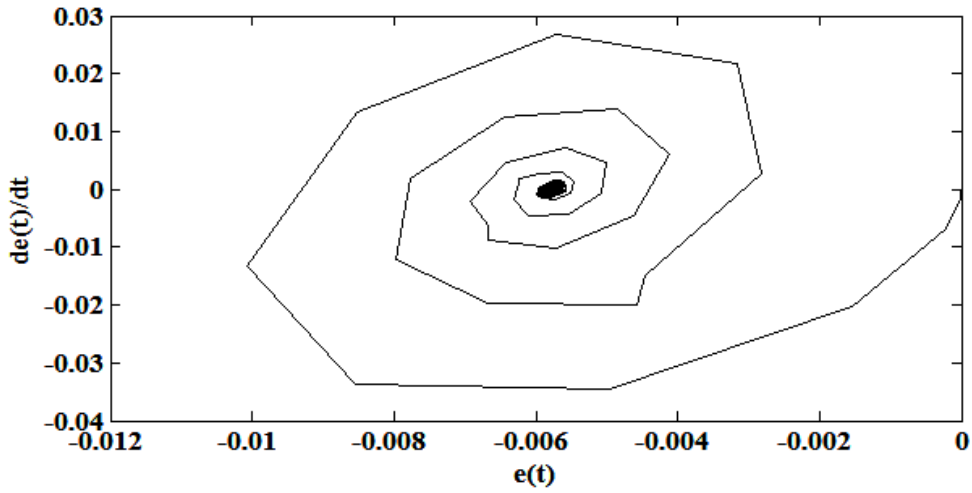
$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_3 &= 3.781\dot{x}_3 \cos x_1 - 0.26432\dot{x}_3 \sin x_1 - 7.355x_3 + x_3u \\ \ddot{x}_3 + \lambda \dot{x}_3 &= \rho.sign(s) + K.s \\ 3.781\dot{x}_3 \cos x_1 - 0.26432\dot{x}_3 \sin x_1 - 7.355x_3 + x_3u + \lambda \dot{x}_3 &= \rho.sign(s) + K.s \\ (3.781 \cos x_1 - 0.26432 \sin x_1 + \lambda).\dot{x}_3 - 7.355x_3 + x_3u &= \rho.sign(s) + K.s \end{aligned} \right\} (5.52)$$

$$u = \frac{(-3.781x_3 \cos x_1 + 0.26432x_3 \sin x_1 + 3.6775x_3^2)(3.781 \cos x_1 - 0.26432 \sin x_1 + \lambda)}{x_3 + (3.781 \cos x_1 - 0.26432 \sin x_1 + \lambda).0.5x_3^2} + \frac{0.25.(3.781 \cos x_1 - 0.26432 \sin x_1 + \lambda) + 7.355x_3 + \rho.sign(s) + K.s}{x_3 + (3.781 \cos x_1 - 0.26432 \sin x_1 + \lambda).0.5x_3^2} = u_{eq} + u_{sw} \quad (5.53)$$

İndirgenmiş N-Baralı Güç Sistem İçin Genetik Algoritma Tabanlı Benzetim Sonuçları:

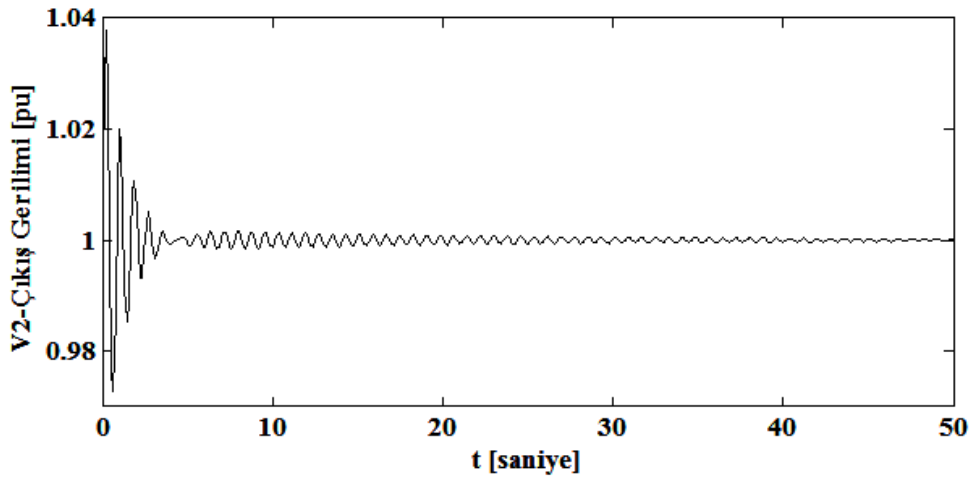
Amaçlanan N-Baralı güç sisteminin kontrolüne ilişkin genetik algoritma tabanlı benzetim sonuçları 1.25 pu luk sabit talep güç altında elde edilmiştir. Benzetim çalışması sonunda: Faz uzayı (erişme ve kayma evreleri) değişimi grafiği, çıkış

gerimi grafiği, kontrol değişkenin değişimi grafiği, kayma yzeyi değişimi grafiği, anahtarlama işareti değişim grafiği elde edilmiştir.



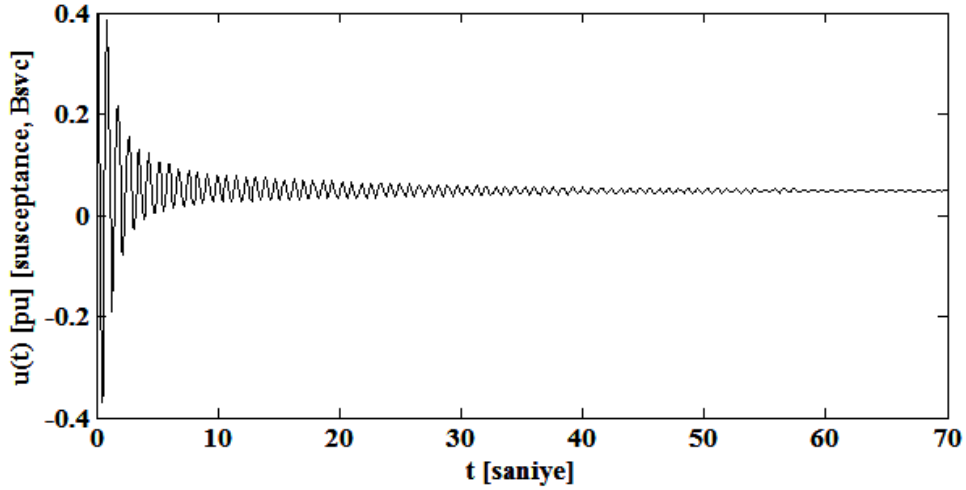
şekil 5.40. GASMC kontrolzrlz N-baralı gzc sistemine ilişkin faz uzayı değişimi, erişme ve kayma evreleri

şekil 5.40'da GASMC kontrollz N-baralı gzc sistemine ilişkin faz uzayı değişimi verilmiştir. şekilden gzc sistemine ilişkin faz portresi spiral bir şekilde orijine ulaşmaktadır. Bu değişim sistemin asimtotik kararlı olduğunu gzstermektedir [39].



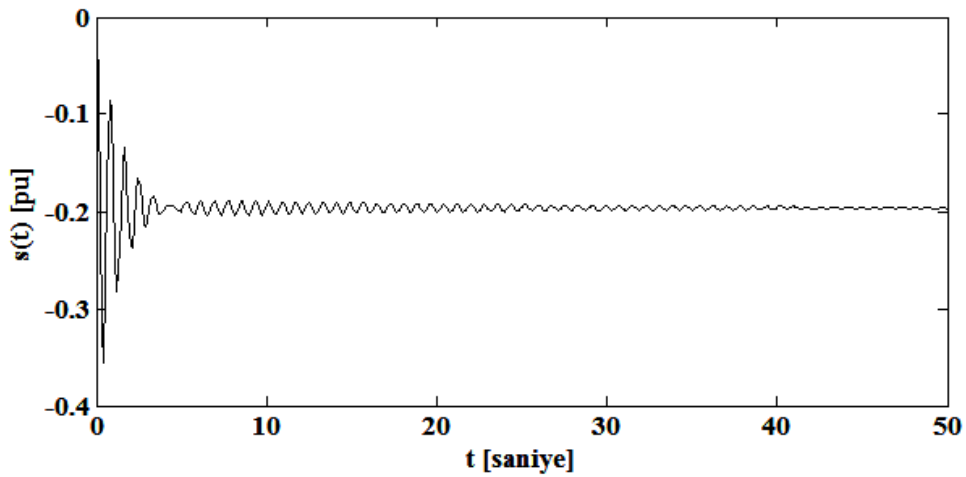
şekil 5.41. GASMC kontrolzrlz N-baralı gzc sistemine ilişkin birim basamak girişi cevap eğrisi

Şekil 5.41’de GASMC kontrollü N-baralı güç sistemine ilişkin birim basamak girişi cevap eğrisi verilmiştir. Şekilden sisteme ilişkin V_2 çıkış geriliminin yaklaşık 30 saniye sonunda uygun bir sürekli hal hatası ile referans girişine ulaşmaktadır.



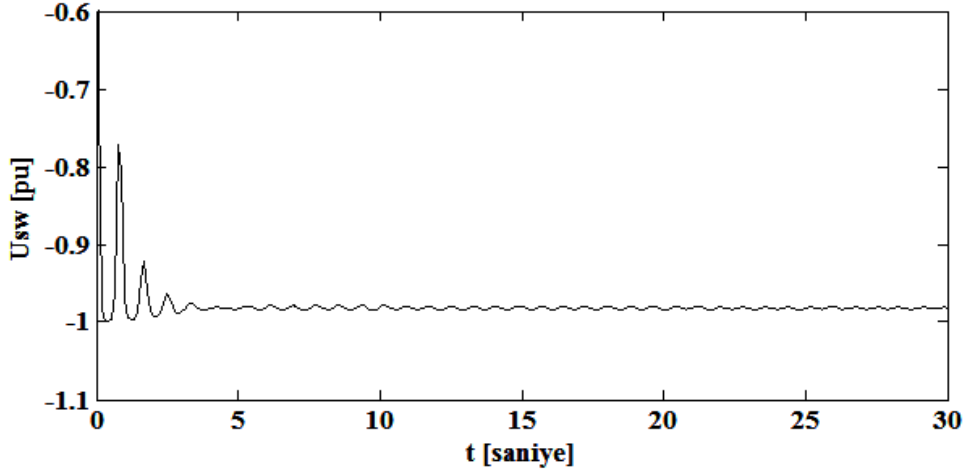
Şekil 5.42. N-baralı Sistemde GASMC'ye ilişkin kontrol sinyali

Şekil 5.42 ile verilmiş olan N-Baralı sistemin kontrol işareti ± 0.4 genlikli salınım aralığından başlayarak azalan genlikli bir değişim izleyerek 0.0047 pu luk bir denge noktasına oturmaktadır.



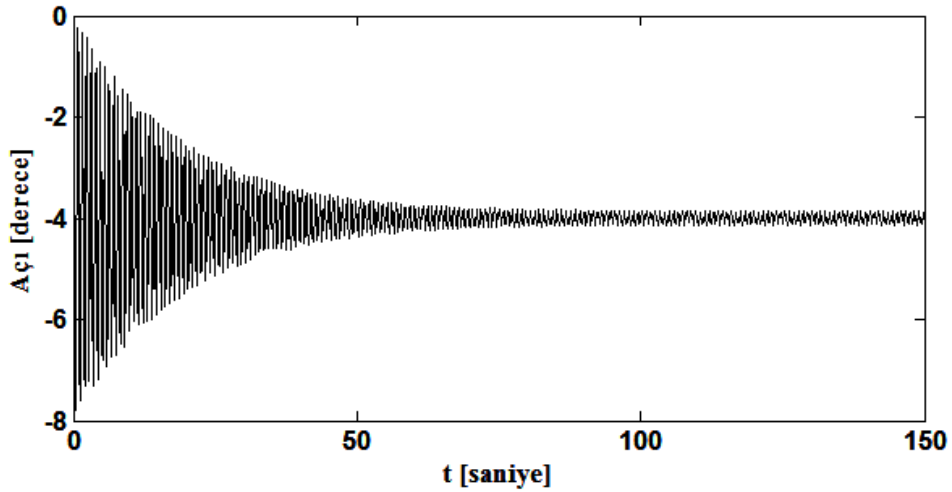
Şekil 5.43. GASMC kontrolörlü N-baralı güç sistemine ilişkin kayma yüzeyi değişimi

Şekil 5.43’de verilmiş olan N-Baralı sistemin kayma yüzeyi ilk saniyelerde -0.37 ve -0.08 aralığında sönümlü bir salınım yaparak 5.saniye civarında -0.2 pu’luk denge noktasına oturmuştur.



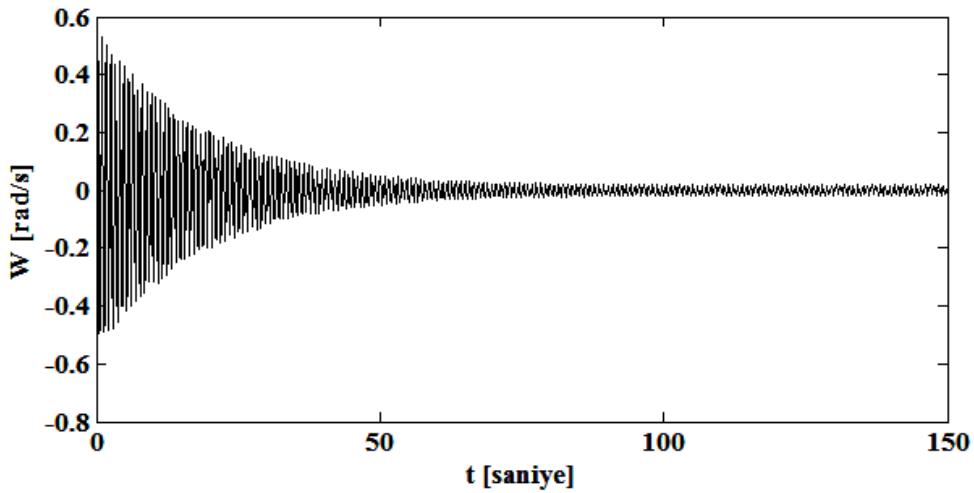
Şekil 5.44. GASMC kontrolörlü N-baralı güç sistemine ilişkin anahtarlama işaretinin zamana göre değişimi

Şekil 5.44’de verilmiş olan N-Baralı sistemin anahtarlama giriş işareti ilk saniyelerde -1 ve -0.76 aralığında sönümlü bir salınım yaparak 5.saniye civarında -0.99 ile -0.98 aralığında bir dengeye oturmuştur.



Şekil 5.45. GASMC kontrolörlü N-baralı güç sistemine ilişkin yük açısının değişimi

Şekil 5.45 ile verilen yük açısı değişiminde, yük açısı -4 derece civarındaki uygun bir hata toleransı bandı aralığında değişmektedir.



Şekil 5.46. N-baralı sistemde generatörün açısal frekansının zamana göre değişimi

Şekil 5.46'da verilen açısal frekans değişim aralığında, generatör açısal hızda senkronizma da kalmaktadır.

Buraya kadar elde edilen sonuçların, güç sisteminin güç akışı için Tablo 5.3 ile veriler ile uyumlu olduğu görülmektedir [69].

5.7.3. Üç makineli dokuz baralı WSCC sistemi simulink Yapısı

Bu yapıyı oluşturmak için hatların gerçek değerlerinin hesaplanması gerekir.

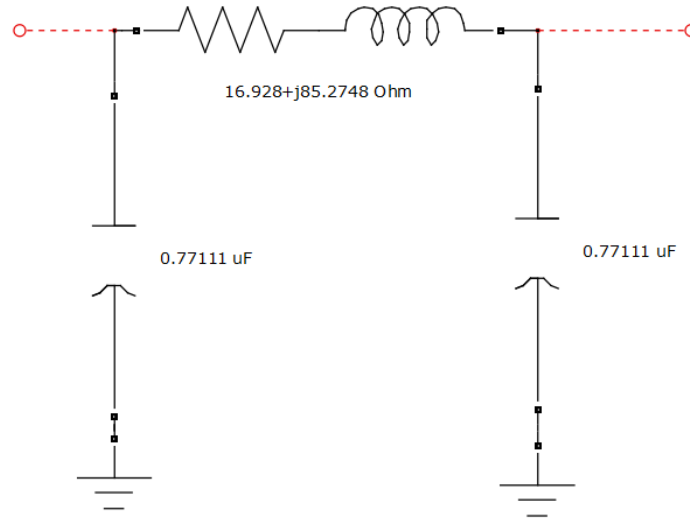
$$\left. \begin{aligned} Z_{base} &= \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(230\text{kV})^2}{100\text{MVA}} = 529\Omega \\ Y_{base} &= \frac{1}{Z_{base}} = 0.0019 \text{ Mhos} \end{aligned} \right\} (5.54)$$

Örneğin hat 5-7'in gerçek değerlerini hesaplırsak, Tablo 5.2'deki pu değerinden gerçek değerleri,

$$\left. \begin{aligned} Z_{gerçek} &= Z_{base} * Z = 529 * (0.032 + j0.1612) = 16.9280 + j85.2748 = R + jX \Omega \\ Y &= \frac{B}{2} = 0.153 * 0.0019 = 0.00029070 \text{ Mhos} \end{aligned} \right\} (5.55)$$

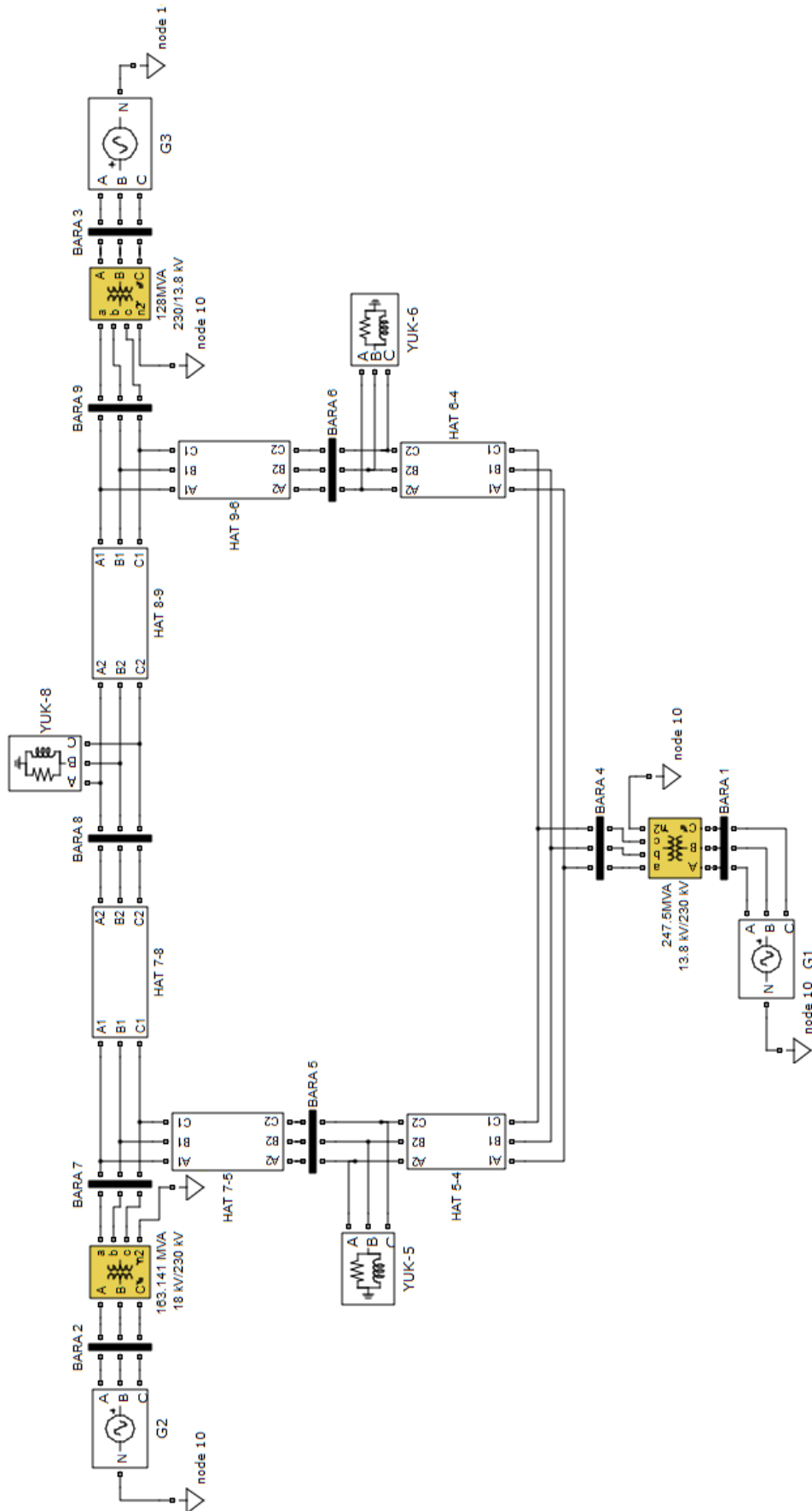
$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{X_L}{\omega} = \frac{85.2748}{2 * \pi * 60} = 0.2262 \text{ H} \\ C &= \frac{B_c}{\omega} = \frac{0.00029070}{2 * \pi * 60} = 0.77111 \mu F \end{aligned} \right\} \quad (5.56)$$

şeklinde hesaplarız. Hattın pi eşdeğer devresi Şekil 5.47'deki gibi çizilebilir.



Şekil 5.47. Hat 5-7'nin Pi eşdeğer devresi

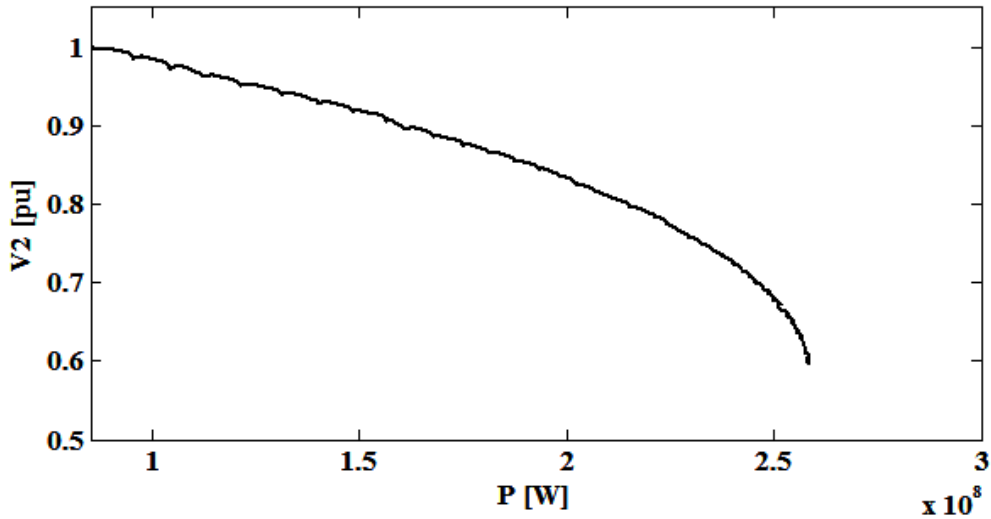
Hatların gerçek değerleri hesaplandıktan sonra WSCC simulink yapısı Şekil 5.48'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 5.48. 3- Makineli 9-Baralı WSCC Sistemi simulink yapısı

5. Bara için PV eğrisi:

5. Baradaki aktif ve reaktif güç adım adım arttırılarak PV eğrisi elde edilmiştir. PSAT programıyla bu baranın gerilimi 0.58 pu değerine kadar düşmektedir. Şekil 5.49'da söz konusu bu baranın gerilimi 0.59 pu değerine kadar düştüğü görülmüştür.



Şekil 5.49. 5. Bara PV eğrisi

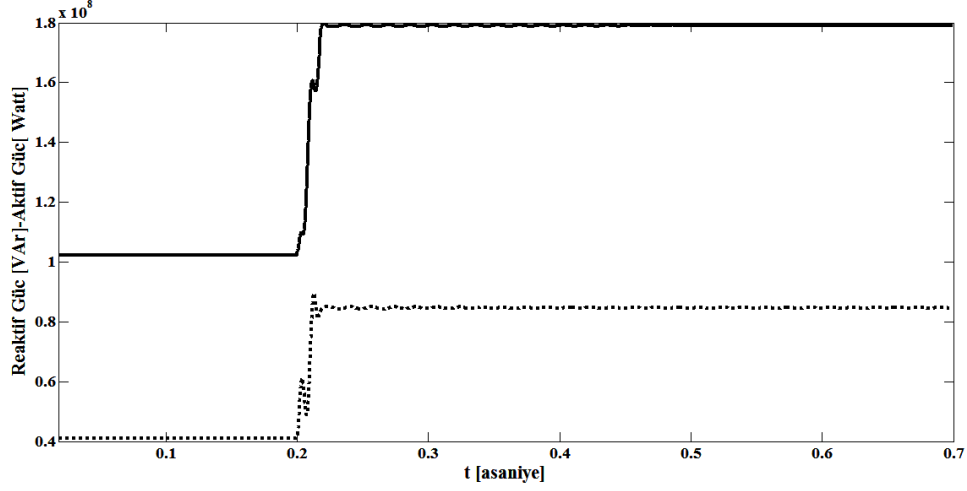
Gerilim değişimine karşı davranışları bakımından yükleri; sabit empedans, sabit akım ve sabit güç yükleri olarak üç guruba ayrılabilir. Sabit empedans yüklerinin başında; aydınlatma, ısıtma ve ark ocakları gelmektedir. Metalurji ve elektrokimya alanlarında, metal parlatma, metal kaplama ve elektroliz uygulamaları sabit akım yükleri sınıfına girmektedir. Kontrollü empedans yükleri ve asenkron motorlar ise sabit güç yükleri gurubunda değerlendirilebilir [101].

9 baralı SVC'li WSCC güç sisteminin 5. barasına farklı yükler bağlanarak aşağıdaki benzetim sonuçları elde edilmiştir.

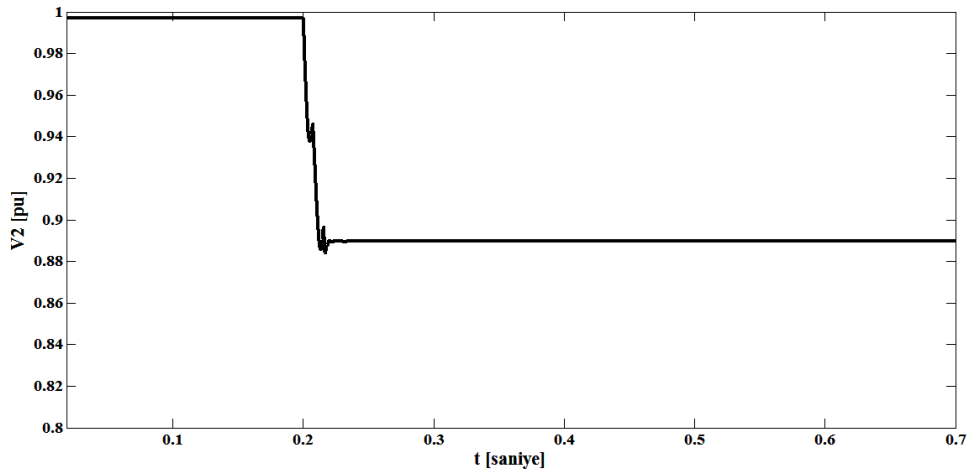
(a) 5. baraya sabit empedans yükünün bağlanması:

5.baraya bağlı olan sabit empedans yükünün 0.2'ci saniyede iki katına çıkartılması sonucunda, kompanzasyon yokken ve kompanzasyon varken benzetim sonuçları elde

edilmiştir. Kompanzasyon yokken elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.50 ve Şekil 5.51’de verilmiştir.



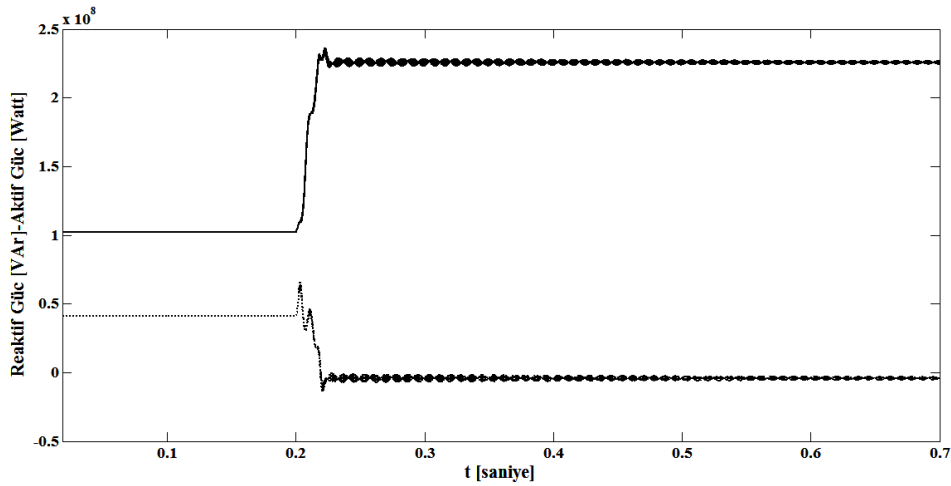
Şekil 5.50. Kompanzasyon yokken 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç



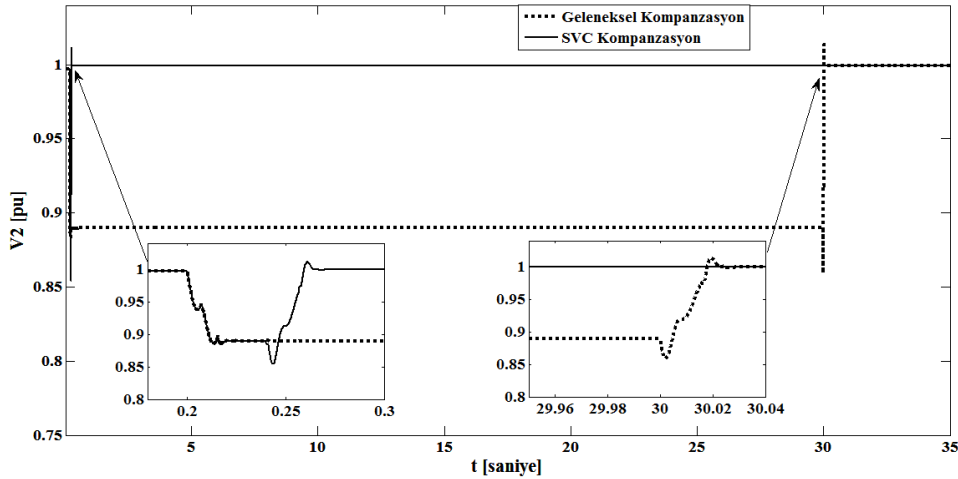
Şekil 5.51. Kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi

Şekil 5.51’de görüldüğü gibi, kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi 0.88 pu değerine kadar düşmektedir. Talep edilen güç iki katına çıkarılmasına rağmen gerilim düşmesinden dolayı Şekil 5.50’de görüldüğü gibi çekilen güç 1.8 katına kadar yükselebilmektedir.

Klasik Kompanzasyon ve SVC Kompanzasyon uygulandığında, elde edilen benzetim sonuçları ise Şekil 5.52 ve Şekil 5.53’de verilmiştir.



Şekil 5.52. Kompanzasyon uygulandığında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç



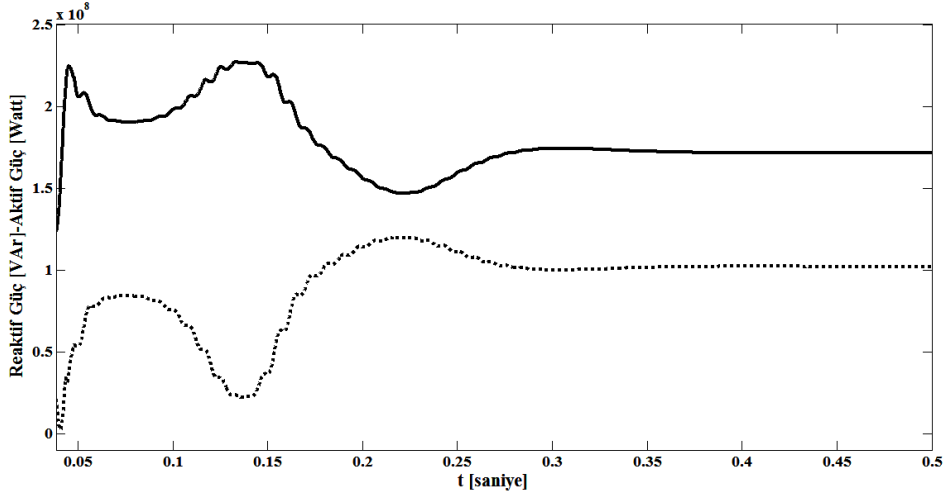
Şekil 5.53. Farklı kompanzasyonlar uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi

SVC'li sistem için, yeterli kompanzasyonla çekilen aktif güç iki katına yükselirken reaktif güç sıfırlanmıştır (Şekil 5.52). Geleneksel kompanzasyonla bu işlem 30 s sonra gerçekleşmektedir. Şekil 5.53'de SVC, geleneksel kompanzasyona göre çok daha kısa sürede gerilimi 1 pu değerine yükseltebildiğini gösteren bir cevap vermiştir. Tristör kontrollü kompanzasyon 40 ms ve elektromekanik kompanzasyon 30 s ölçüm süreleri dahil tepki süresine sahiptir [102].

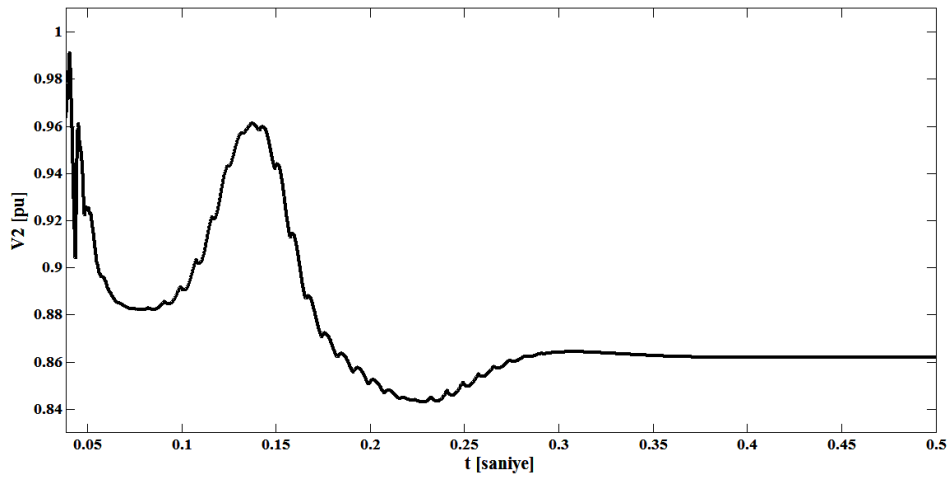
(b) 5. baraya sabit akım yükünün bağlanması:

5.Bardaki yüke ilaveten, dinamik sabit akım yükü bağlanırsa ve 0.01'ci saniyede güç çekmeye başlaması sonucunda, kompanzasyon yokken ve kompanzasyon varken

benzetim sonuçları elde edilmiştir. Kompanzasyon yokken elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.54 ve Şekil 5.55’de verilmiştir.



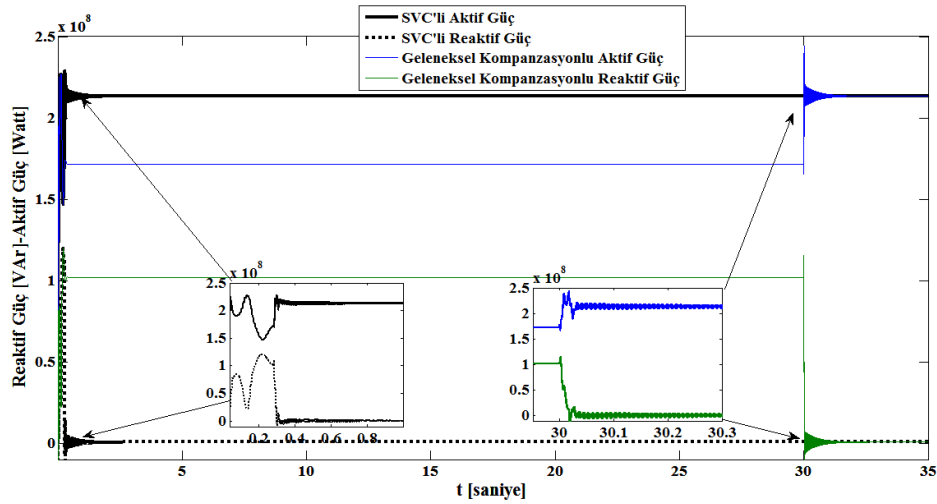
Şekil 5.54. Kompanzasyon yokken 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç değişimi



Şekil 5.55. Dinamik akım yükü altında kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi değişimi

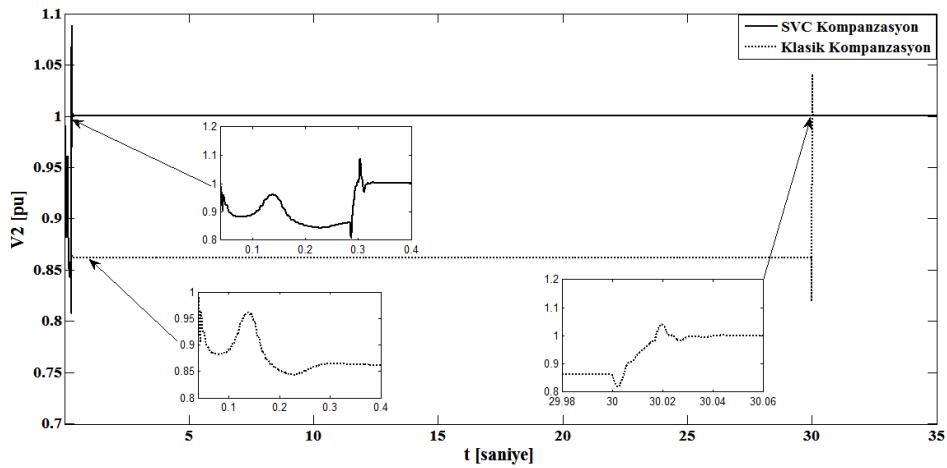
Şekil 5.55’de görüldüğü gibi, kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi 0.86 pu değerine kadar düşmektedir.

Klasik Kompanzasyon ve SVC Kompanzasyon uygulandığında, elde edilen benzetim sonuçları ise Şekil 5.56 ve Şekil 5.57’de verilmiştir.



Şekil 5.56. Dinamik akım yükü altında kompanzasyon uygulandığında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç

Dinamik akım yükü talep gücü 0.5 saniye ye kadar sürekli değiştirmektedir. 0.3 saniyede devreye giren tristör içeren SVC'li kompanzasyon gecikme süresi 40 milisaniye olduğu için gerilimi çok hızlı bir şekilde 1 pu değerine yükseltirken, elektro mekanik sistem içeren klasik kompanzasyon 30 saniye gecikmeyle gerilimi 1 pu değerine yükseltebilmiştir (Şekil 5.57).

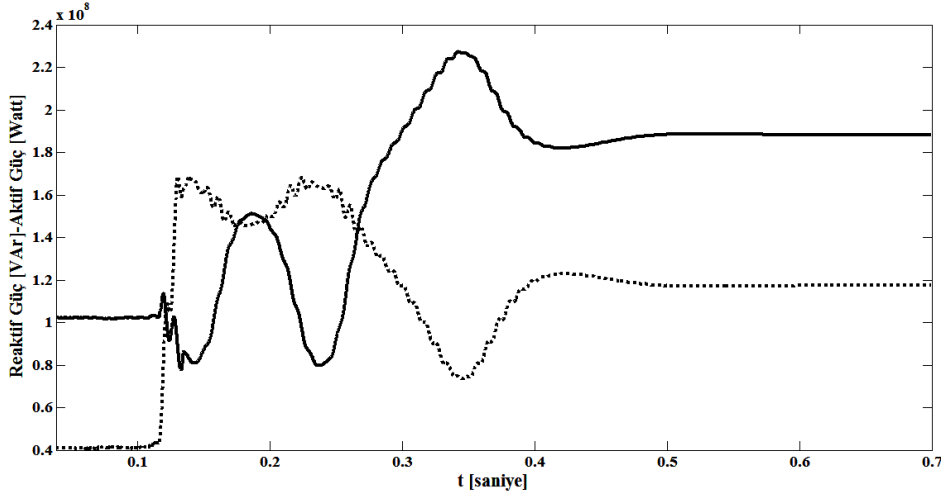


Şekil 5.57. Dinamik akım yükü altında kompanzasyon uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi

(c) 5. baraya sabit güç yükünün bağlanması:

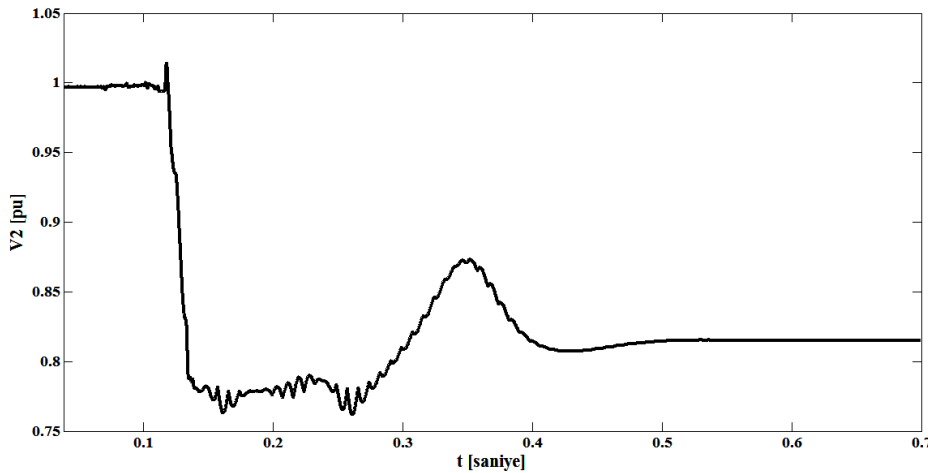
5. bardaki yüke ilaveten, asenkron motor (sabit güç yükü) bağlanırsa ve 0.1'ci saniyede güç çekmeye başlaması sonucunda, kompanzasyon yokken ve

kompanzasyon varken benzetim sonuçları elde edilmiştir. Kompanzasyon yokken elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.58 ve Şekil 5.59'da verilmiştir.



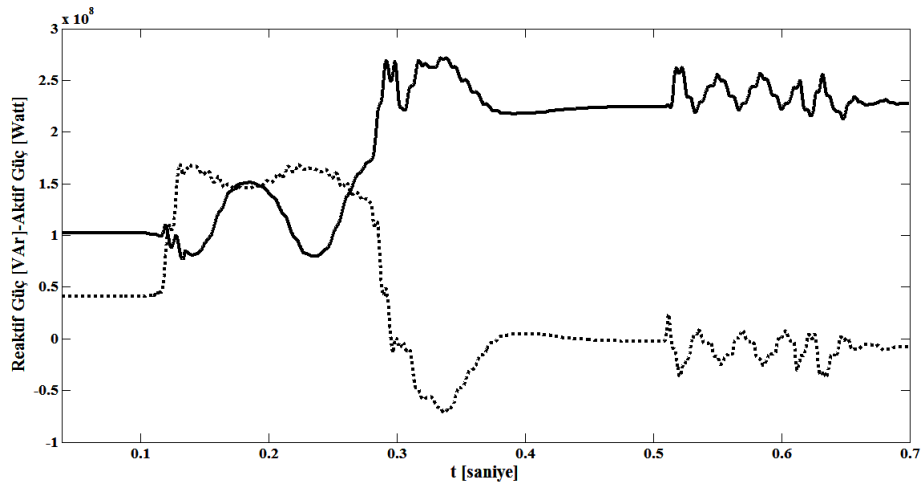
Şekil 5.58. Dinamik güç yükü altında kompanzasyon yokken 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç

Sabit güç yükleri, Şekil 5.58'de çekilen aktif ve reaktif güç değişimlerinden de görüldüğü gibi en problemlü güçlerdir. Şekil 5.59'da görüldüğü gibi, kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi 0.83 pu değerine kadar düşmektedir. 0.1'ci saniyede devreye giren kayan kipli kontrollü SVC'li kompanzasyonla gerilim 1 pu değerine yükselmiştir (Şekil 5.61).

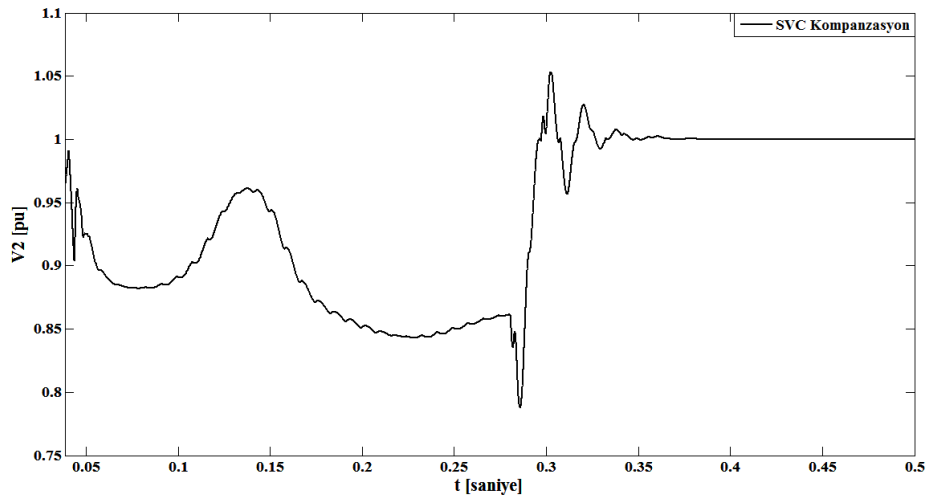


Şekil 5.59. Dinamik güç yükü altında kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi değişimi

SVC'li kompanzasyon uygulandığında, elde edilen benzetim sonuçları ise Şekil 5.60 ve Şekil 5.61'de verilmiştir. 0.3'cü saniyede devreye giren kayan kipli kontrollü SVC'li kompanzasyonla gerilim 1 pu değerine yükselmiştir (Şekil 5.61).



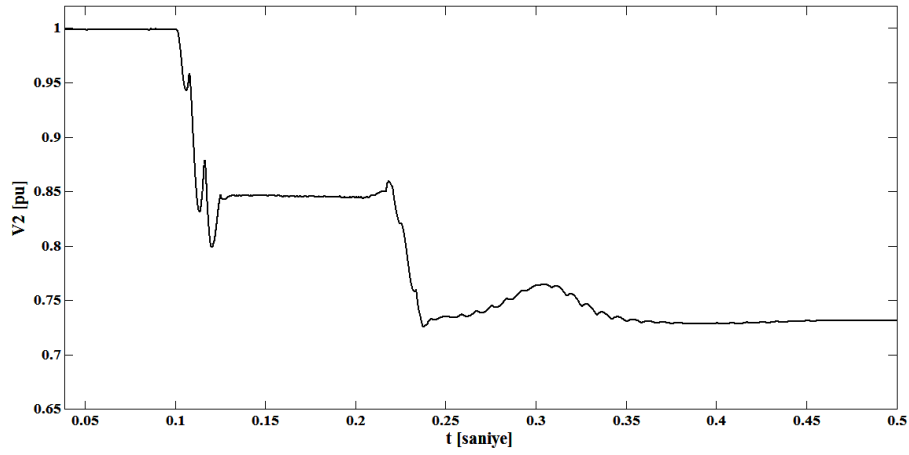
Şekil 5.60. Dinamik güç yükü altında kompanzasyon altında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç



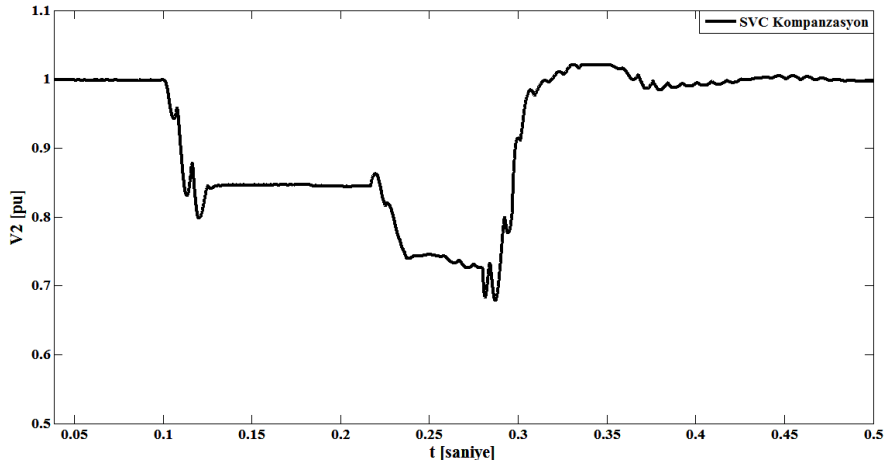
Şekil 5.61. Dinamik güç yükü altında kompanzasyon uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi

(d) İkili bozucu oluşma durumu:

Sistem normal çalışırken, 0.1 saniyede G2 generatörün iletim hatlarında bir kopma oluyor ve sisteme güç veremiyor. 5. bardaki yüke ilaveten, 30 MW aktif – 20 MVar reaktif güç çeken asenkron motor yük gurubu 0.2. saniye devreye girmektedir. Şekil 5.62'de görüldüğü gibi, kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi 2-7 baraları arasındaki iletim hattının kopması sonucu 0.84 pu değerine ve asenkron motorun devreye girmesiyle 0.73 pu değerine kadar düşmektedir. 0.3'cü saniyede devreye giren kayan kipli kontrollü SVC'li kompanzasyonla gerilim 1 pu değerine yükselmiştir (Şekil 5.63).

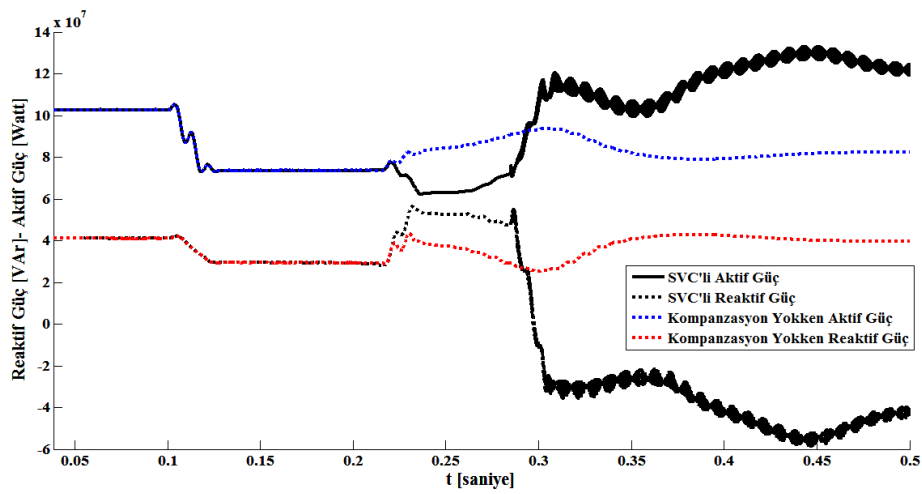


Şekil 5.62. Dinamik ikili bozucu altında kompanzasyon yokken 5. bara gerilimi değişimi



Şekil 5.63. Dinamik ikili bozucu altında kompanzasyon uygulandığında 5. bara gerilimi değişimi

Kompanzasyonla beraber 5.barada çekilen aktif güç artış ve reaktif güç azalmıştır (Şekil 5.64).



Şekil 5.64. Dinamik ikili bozucu altında 5. barada çekilen aktif ve reaktif güç değişimi

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, ilk kez SVC'li güç sistemine kayan kipli kontrol yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca kayan kipli kontrolün daha iyi performans göstermesi için, katsayılar genetik algoritmayla optimize edilmiştir. Benzetim çalışmaları ile GA'lı sonuçların daha iyi cevaplar verdiği gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında öncelikle SVC ve kayan kipli kontrolün güç sistemlerine uygulanması ile ilgili yapılmış çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiştir. SVC sisteminin karakteristiği elde edilerek doğrusal ve doğrusal olmayan çalışma aralığı belirlenmiştir. (3.5) eşitlikleriyle verilen ve seçilen çalışma noktasında SVC'li güç sistemi, $P_d = 0.8$ pu değeri civarında ve daha büyük talep güçlerde doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahiptir. Bu nedenle güç sistemi belli noktalarda Taylor serisi ile doğrusallaştırılarak durum uzay modeli denklemleri elde edilmiştir. Tasarlanan PID kontrolör ile bu noktalar için doğrusal olmayan ve doğrusallaştırılmış güç sistemleri gerilim cevaplarının aynı karar noktalarına gittiği görülmüştür. Ayrıca güç sisteminin çökme noktasına çok yakın bir noktada yapılan doğrusallaştırma sonucu elde edilen durum uzay modelinden sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bu transfer fonksiyonun kutupları incelendiğinde orijinde bir kutbu olduğu görülmüştür.

SVC'li güç sisteminin online kontrolü için kendinden ayarlamalı kutup yerleştirme ve YSA tabanlı kutup yerleştirme teknikleri önerilmiştir. Öncelikle kutup yerleştirme yöntemleri matematiksel modelleriyle verilmiştir. Kendinden ayarlamasız ve kendinden ayarlamalı (online) kutup yerleştirme kontrolör yapıları verilmiştir. Kutup yerleştirme için öncelikle kararlı bir referans noktası seçilmiştir. Seçilen bu nokta için doğrusal olmayan güç sistemi doğrusallaştırılmış ve sistemin transfer

fonksiyonu elde edilmiştir. Bu transfer fonksiyonundan yararlanarak referans noktasının kutupları elde edilmiştir. SVC'li güç sisteminin kutup yerleştirme ile kontrolü için, Ackermann yöntemiyle, gerekli geri besleme vektörü katsayılarını hesaplayan bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmayı da içeren alan on-line kapalı çevrim kontrolör yapısı verilmiştir. 150 saniyelik benzetim süresinde 1500 adet farklı çalışma noktası için k geri besleme satır vektörü katsayıları hesaplanmıştır. Bu hesaplamaların süresini azaltmak ve kontrolörün daha hızlı cevap verebilmesi için YSA tabanlı kutup yerleştirme yöntemi geliştirilmiştir. İki baralı güç sistemi için, kutup yerleştirme, YSA kutup yerleştirme ve geleneksel PID kontrolörün değişik talep güçler altında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu benzetim çalışmalarında; V_2 çıkış bara gerilimi, B_{svc} kontrol değişkeni, öz değerlerin değişim aralığı, durum değişkenlerinin değişimi ve geri besleme katsayılarının değişimi ayrı ayrı verilmiştir. Kontrolörlü güç sistemlerinin basamak cevapları performans kriterleri açısından tablolarla gösterilip karşılaştırılmıştır. Güç sistemlerine ilişkin öz değerlerin sanal kutupları çok dar bir aralıkta değişirken, reel kutupları çok daha geniş bir aralıkta değiştiği gözlenmiştir. Benzetim sonuçlarından ve performans kriterleri bakımından, önerilen YSA tabanlı kutup yerleştirme metodunun değişen talep güçler karşısında çıkış gerilimini seçilen referans gerilimine taşımada iyi bir performans gösterdiği ve oldukça kısa sürede cevap verdiğini gözlenmiştir. Ayrıca, YSA tabanlı kutup yerleştirme ile PID'ye göre aşım miktarı açısından % 0.55'lik ve sürekli hal hatası açısından % 125'lik bir iyileştirme yapıldığı gözlenmiştir.

SVC'li güç sistemine uygulamak amacıyla kayan kipli kontrol yöntemine ilişkin temel kavramlar açıklanmış ve kapalı çevrim kontrol yapısı gösterilmiştir. İki baralı güç sisteminin kayan kipli kontrol yöntemine göre matematiksel modeli elde edilerek, kararlılık analizi yapılmıştır. Değişik talep güçler altında, çıkışın-girişi izleyebildiği, çıkış bara gerilimi, anahtarlama işaret değişimi, faz portresi, açısız hız-açı değişimi, kayma yüzeyi değişimi ve durum değişkenlerinin zamana bağlı değişimleri grafiksel olarak ayrı ayrı elde edilmiştir. Çıkışın-girişi oldukça küçük bir hata ile takip edebilme yeterliliğine sahip olduğu görülmüştür. Çıkış bara gerilimi 1 pu civarında belli bir salınımlı hata aralığında elde edilmiştir. Erişme ve kayma

evrelerinin gerçekleşmeleri ve hatanın sifira götürüldüğü açık bir şekilde gözlenmiştir.

SVC'li güç sisteminin kayan kipli kontrolünün performansını iyileştirmek için katsayıları genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Kayan kipli kontrol için elde edilen başarımlar genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrol için de yapılmıştır. Bu başarımlar karşılaştırılarak gerekli performans incelemeleri ve irdelemeler yapılmıştır. Genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrolün başarımları kayan kipli kontrole göre daha iyi olduğu görülmüştür. Genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrol ve PI kontrolörlü güç sisteminin cevapları performans kriterleri açısından tablolarla gösterilmiştir. Genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrolün PI kontrolöre göre; aşım miktarı açısından % 0.39'luk, sürekli durum hatası açısından % 20'lik bir iyileştirmeye sahip olduğu gözlenmiştir.

Tezde SVC'li doğrusal olmayan güç sisteminin kayan kipli kontrol yöntemiyle denetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarından, çıkışın girişi takip ettiği, faz uzayında hatanın sifira götürüldüğü, kayma yüzey değişim aralığının makul bir aralıkta elde edildiği görülmüştür. Önerilen kayan kipli kontrol yönteminin değişen talep güçler karşısında çıkış gerilimini seçilen referans gerilimine taşımada iyi bir performans gösterdiği gözlenmiştir.

Kayan kipli kontrolün pratik sistemlere uygulanması için mekanik anahtarlama sayısının azaltılması gerekir. Bu aynı zaman da, çatırdama sorunun giderilmesini ve gürültülerin yok edilmesini sağlayacaktır. Bunun için anahtarlama fonksiyonu $\text{Signum}(\cdot)$ yerine $\text{Tansig}(\cdot)$ fonksiyonu tercih edilmiştir.

Kayan kipli kontrol ve genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrol için $\text{sign}(\cdot)$ fonksiyonu yerine $\text{tansig}(\cdot)$ fonksiyonu kullanımı, titreşim genliğini ve frekansını düşürmüştür. Bunu daha ayrıntılı olarak incelemek için sinyalin FFT si alınarak Fourier genlik katsayıları ve frekans analizleri yapılmıştır. $\text{Signum}(\cdot)$ fonksiyonuyla elde edilen sonuçlarda farklı fourier katsayılarının çokluğu ve sanal kök dağılımının yüksek olması, titreşimlerin gürültülü olduğu ve harmoniklerin oluştuğunu göstermektedir. $\text{Tansig}(\cdot)$ fonksiyonu ile elde edilen sonuçlarda ise gerçek kökler

elde edildiği ve köklerin solda olduğu, fourier katsayılarının aynı genlik noktalarında toplandığı görülmektedir. Bir sinyalin güç spektral yoğunluğunu gösteren periodogram grafikleri incelendiğinde; `signum(.)` fonksiyonuyla elde edilen sonuçlarda, kayan kipli kontrol için elde edilen grafik de 250 Hz etkin frekansının dışında gürültü harmonikleri 1×10^4 seviyesine kadar çıkmıştır. Genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrol için bu harmoniklerin genliği kayan kipli kontrole göre daha düşük olmasına rağmen 0-500 Hz aralığında sürekli gürültü titreşim frekansına sahiptir. Kayan kipli kontrol ve genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrol yapısında `tansig(.)` fonksiyonu kullanıldığında, gürültü harmonikleri bastırılmış 250 Hz civarındaki etkin frekansa sahip olan işaretler elde edilmiştir. İşaretlerin genlik düzeyi kayan kipli kontrol için 10^4 düzeyinde iken, genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrolde ise 2×10^2 düzeyine azaltıldığı görülmektedir.

Son uygulama olarak kayan kipli kontrol yöntemi SVC içeren N-Baralı sisteme uygulanmıştır. Bu uygulamalar için iki baralı sisteme dönüştürülmüş olan 9 baralı WSCC sisteminin bara admittans matrisinden elde edilen A, B, C, D katsayılarından yararlanılmıştır [69,100]. Öncelikle genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrol için kayan kipli kontrol sisteminin matematiksel modeli elde edilmiş ve sabit talep güç altında kayan kipli kontrol başarımları, generatör için açılma frekans ve yük barası içi açı ve gerilim değişimleri gösterilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarından indirgenmiş N-baralı güç sistemleri için genetik algoritma tabanlı kayan kipli kontrolün performansın iyi olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, 9 baralı WSCC sisteminin gerçek sisteme çok daha uygun olan simulink modeli elde edilmiştir. Bu modelde kritik bara PSAT programıyla 5. bara olduğu belirlenmiştir. Söz konusu baraya farklı yük modelleri bağlanarak kompanzasyonsuz, klasik kompanzasyonlu ve SVC kompanzasyonlu benzetim sonuçları elde edilmiştir. Çekilen yük iki katına çıkartıldığında, SVC'li sistem için, yeterli kompanzasyonla çekilen aktif güç iki katına yükselirken reaktif güç sıfırlanmıştır. Geleneksel kompanzasyonla bu işlem 30 s sonra gerçekleşmektedir.

Bir başka senaryoya göre fiziksel olarak 2-7 baraları arasındaki iletim hattı bağlantısının kopması sonucu, ikinci generatör sisteme güç verememiş ve kritik bara olan 5. barada gerilim düşümü %16 düzeyinde yaşanmıştır. Asenkron motorun

devreye girmesiyle bu düşme %27 oranına kadar yükselmiştir. 0.3'cü saniyede devreye giren kayan kipli kontrollü SVC'li kompanzasyonla gerilim 1 pu değerine yükselmiştir.

Yapılan kaynak araştırması sonucunda, incelenen kaynaklar arasında, SVC'li doğrusal olmayan güç sisteminin denetiminde, kayan kipli kontrol yönteminin uygulanmadığı görülmüştür. Söz konusu sisteme ilk kez bu tezde kayan kipli kontrol yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca kayan kipli kontrolün daha iyi performans göstermesi için, katsayılar genetik algoritmayla optimize edilmiştir. Elektrik tesislerinde, genetik algoritma uygulanmıştır. Benzetim çalışmaları ile GA'lı sonuçların daha iyi cevaplar verdiği gösterilmiştir.

6.2. Öneriler

Tez kapsamında SVC'li güç sistemleri için önerilen kontrol teknikleri diğer gerilim kararlayıcıları içinde kullanılabilir. Özellikle kontrolörlerin katsayılarını belirlemede yeni geliştirilen arı, ısı, karınca ve sürü optimizasyon metotları sınanmalıdır.

Farklı güç sistem iyileştiricilerinin, farklı baralarda uyumlu bir şekilde kullanılması güç sisteminin daha kolay kontrolünü ve yüksek kapasitelerde kullanılmasını sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] DEMİRÖREN, A., ZEYNELGİL, L., Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, Birsen Yayınevi, p.1-15/204-232, 2004.
- [2] ESLAMI, M., SHAREEF, H., MOHAMED, A., KHAJEHZADEH, M., A Survey on Flexible AC Transmission Systems (FACTS), Przegląd Elektrotechniczny, p.1-11, 1a, January 2012.
- [3] GYUGYI, L., Flexible AC Transmission systems(FACTS), in Inst.Elect.Eng.power and energy Series 30, Y.H.Song and A.T. Johnsd, Eds.London, U.K , ch.1, 1999.
- [4] IEEE SPECIAL STABILITY CONTROLS WORKING GROUP, Static Var compensator models for power flow and dynamic performance simulation, IEEE Tran. on Power Systems, Vol.9, No.1, February 1994.
- [5] WANG Y, CHEN H, ZHOU R., A nonlinear controller design for SVC to improve power system voltage stability, Electrical Power and Energy Systems 22, p. 463–470, 2000.
- [6] FANG, D.Z., YANG, X., CHUNG, T.S., WONG, K.P., Adaptive fuzzy-logic SVC damping controller using strategy of oscillation energy descent, IEEE Power & Energy Society, vol. 19, p. 1414 – 1421, 2004.
- [7] BIAN, X.Y., CHUNG, C.Y., WANG, K.W., TSE, C.T., Choice of SVC location/signal and its controller design by probabilistic method, Electric Power Systems Research, vol. 71, p. 35–40. September 2004.
- [8] RAHİM, A.H.M.A., NOWICKI, E.P., MALIK, O.P., Enhancement of power system dynamic performance through an on-line self-tuning adaptive SVC controller, Electric Power Systems Research, p. 801–807, June 2006.
- [9] YOU, R.,NEHRIR, M.H., PIERRE, D.A., Controller Design for SVC and TCSC to Enhance Damping of Power System Oscillations, Electric Power Components and Systems, _vol. 35, p. 871 - 884, 2007.

- [10] YAN, R., DONG, Z.Y., SAHA, T.K., MA, J., Nonlinear robust adaptive SVC controller design for power systems, Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, p. 1-7, Pittsburg-PA, 20-24 July 2008.
- [11] ROBAK, S., Robust SVC controller design and analysis for uncertain power systems, Control Engineering Practice, Volume 17, Issue 11, Pages 1280–1290, November 2009.
- [12] ADEMOYE, T., FELIACHI, A.; KARIMI, A., Coordination of synergetic excitation controller and SVC damping controller using particle swarm optimization, Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE, p.1 – 8, San Diego-CA, 24-29 July 2011.
- [13] KHANDANI, F., SOLEYMANI, S., MOZAFARI, B., Optimal allocation of SVC to enhance Total Transfer Capability using Hybrid Genetics Algorithm and Sequential Quadratic Programming, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 8th International Conference on p. 861-864, Khon Kaen, 17-19 May 2011.
- [14] ESLAMI, M., SHAREEF, H., MOHAMED, A., KHAJEHZADEH, M., Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 5th International, p. 6-7, Shah Alam, Selangor, June 2011.
- [15] ZABAIYOU, T., DESSAINT, L.A., OKOU, F.A., GRONDIN, R., Coordinating Control of Static VAR Compensators and Synchronous Generators Based on Selected Remote Measurements, Electric Power Components and Systems, 39:405–422, 2011.
- [16] UTKIN, V.I., Variable Structure Systems With Sliding Modes, IEEE Transactions On Automatic Control, AC-22, 2, p. 212-222, April 1977.
- [17] UTKIN, V.I., Sliding mode control in discrete-time and difference systems, book chapter, Springer Berlin/Heidelberg, April 10, 2006.
- [18] BEKIROĞLU, N., BOZMA, H.I., ISTEфанOPULOS, Y., Model Reference Adaptive Approach To Sliding Mode Control, Proceeding Of The American Control Conference, 2, 15, p.1028-1032, June 1995.
- [19] HUNG, J.Y., GAO, W., HUNG, J.C., Variable Structure Control: A Survey, IEEE Transactions On Industrial Electronics, 40, 1, p. 2-22, February 1993.

- [20] UTKIN, V.I., Sliding mode control electromechanical systems, Taylor&Francis, 1999.
- [21] AMER, A.F., SALLAM, E.A., ELAWADY, W.M., Adaptive fuzzy sliding mode control using supervisory fuzzy control for 3 DOF planar robot manipulators, Applied Soft Computing, vol. 11, Issue 8, p. 4943–4953, December 2011.
- [22] CORRADINI, M.L., FOSSI, V., GIANTOMASSI, A., IPPOLITI, G., Discrete time sliding mode control of robotic manipulators: Development and experimental validation, Control Engineering Practice, 9 May 2012.
- [23] BENCHAIIB, A., RACHID, A., AUDREZET, E., Sliding mode input-output linearization and field orientation for real-time control of induction motors, IEEE Trans. Power Electron., vol. 14, no. 1, p. 3-8, 1999.
- [24] VAEZ-ZADEH, S., ZAMANIAN, M., Permanent Magnet DC Motor Sliding Mode Control System, International Journal of Engineering, Vol. 16, No. 4, Transactions A: Basics, p. 367-376, 2003.
- [25] HUANG, S.J., WANG, S.S., Mechatronics and control of a long-range nanometer positioning servomechanism, Mechatronics, Vol. 19, Pages 14–28, 2009.
- [26] HSU, C.F., B.K., FPGA-based adaptive PID control of a DC motor driver via sliding-mode approach, Expert Systems with Applications, Vol. 38, Issue 9, p. 11866–11872, 2011.
- [27] LAVANYA, M., BRISILLA, R.M., SANKARANARAYANAN, V., Higher order sliding mode control of permanent magnet DC motor, Variable Structure Systems (VSS), 12th International Workshop on, p. 226 – 230, 12-14 Jan. 2012.
- [28] RATH, J.J., Effective Speed Control in 3-Phase BLDC Motor by Reaching Law based Sliding Mode Technique, International Journal of Computer Applications, Vol. 43, pp. 25-32, 2012.
- [29] SHTESSEL, Y., BAEV, S., BIGLARI, H., Unity Power Factor Control in Three-Phase AC/DC Boost Converter Using Sliding Modes, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.55, p. 3874-3882, 2008.
- [30] HU, J., SHANG, L., HE, Y., ZHU, Z.Z., Direct Active and Reactive Power Regulation of Grid-Connected DC/AC Converters Using Sliding Mode Control Approach, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 26, , p. 210-222, 2011.

- [31] HUANG, Z., EDWARDS, R.M., LEE, K.Y., Fuzzy-adapted recursive sliding-mode controller design for a nuclear power plant control, Nuclear Science, IEEE Transactions on, Vol. 51, p. 256 – 266, 2004.
- [32] DONG, Z., Nonlinear State-Feedback Dissipation Power Level Control for Nuclear Reactors, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 58, p. 241-257, 2011.
- [33] JAFAROV, E.M. AND TASALTIN, R., Design of autopilot-output integral sliding mode controllers for guided missile systems with parameter perturbations, Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, vol. 73, no. 1, p. 16-25, 2001.
- [34] SINGH, S.N., STEINBERG, M.L. AND PAGE, A.B., Nonlinear adaptive and sliding mode flight path control of F/A-18 model, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 39, no. 4, p. 1250-1262, 2003.
- [35] HESS, R.A. AND WELLS, S.R., Sliding Mode Control Applied to Reconfigurable Flight Control Systems, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 26, No. 3, p. 452-463, May-June 2003.
- [36] PROMTUN, E., SESHAGIRI, S., Sliding Mode Control of Pitch-Rate of an F-16 Aircraft, Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control Seoul, Korea, p. 1099-1104, July 6-11, 2008.
- [37] ALI REZA PARTOVI, A.R., XINHUA, W., LUM, K. Y., HAI, L., Modeling and Control of a Small-Scale Hybrid Aircraft, Preprints of the 18th IFAC World Congress, Milano (Italy), p. 10385-10390, 2011.
- [38] WANG, T., XIE, W., ZHANG, Y., Sliding mode fault tolerant control dealing with modeling uncertainties and actuator faults, ISA Transactions Vol. 51, Pages 386–392, 2012.
- [39] AHMED, M., Sliding Mode Control for Switched Mode Power Supplies, Ph.D. Thesis, Lappeenranta University of Technology Digipaino, Lappeenranta- Finland, December 2004.
- [40] BELTRAN, B., BENBOUZID, M., AHMED-ALI, T., MANGEL, H., DFIG-Based Wind Turbine Robust Control Using High-Order Sliding Modes and a High Gain Observer, International Review on Modelling and Simulations 4, vol. 3, p. 1148-1155, 2011.
- [41] CHEN, J., PENG, Y., HAN, W., GUO, M., Adaptive fuzzy sliding mode control in PH neutralization process, Procedia Engineering, vol. 15, p. 954–958, 2011.

- [42] ZHOU, J., WANG, Y., ZHOU, R., GUO, G., A novel sliding mode servo controller for hard disk drives, *Intelligent Control and Automation*, vol.4, p.3272-3277, 2002.
- [43] MORRIS, S., DASH, P.K., BASU, K.P., A Fuzzy Variable Structure Controller For STATCOM”, *Electric Power Systems Research(Elsevier)*, p.23-44, 2003.
- [44] VEGA, A.C., MORALES, J.DE.L., FRIDMAN, L., PENA, O.S., JIMENEZ, M.T.M., Robust excitation control desing using sliding mode technique for multimachine power systems, *Electric Power Systems Research(Elsevier)*, p.1627-1634, 2008.
- [45] YI, L., ZHAO, J., Adaptive Backstepping Sliding Mode Desing For TCSC, 6th World Congress on intelligent Control and Automation, June 21-23, Dalian, China, 2006.
- [46] SAFIE, S.I., MAJID, MD.S., HASIMAH, A.R., WAHAB, A., YUSRI, H.M., SMC power System stabilizer for single machine connected to infinite bus, 2’nd IEEE international conference on Power and Energy, 1-3 December 1-3, 2008.
- [47] HONG, C.M., TZENG, H.W., WANG, S.Y., HUANG, C.W., Desing of a static reactive power compensator using fuzzy sliding mode control, *Proceeding of the 33rd Conference on Decision and Control Lake Buena Vista, FL-December 1994*.
- [48] ALCALDE, V.H.C., FERNANDES, A.A., L.R.S.JR., “Electrical Power Systems Stabilization trough Compensation by using Variable Structure Control”, *Proceeding of the 2006 international Workshop on Variable Structure Systems, Alghero,,Italy, june 5-7,2006*.
- [49] MAHAYANA, D., ANWARI, S., Robust Chattering Free Adaptive Neuro Sliding Mode Contol for SVC System, *International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Selangor, Malaysia, 5-7 August 2009*.
- [50] ÖZDAL, O., Model Dayanaklı Kayan Kipli Denetim, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi FBE, Ankara, 2008.
- [51] KIZMAZ, H., Asılı Sarkacın Kayma Kipli Kontrolü” Yüksek Lisans Tezi, SAU FBE, Sakarya, Haziran 2009.
- [52] ŞİRİN, H. O., İnsansız Bir Kara Aracı İçin Hız Denetim Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi FBE, Ankara, 2009.

- [53] BUĞDAY, Y., İki Eksenli Bir Helikopterin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi FBE, Ankara, 2010.
- [54] KOCA, G. Ö., Dört Kol Mekanizmalı Mekatronik Bir Sistemin Akıllı Yöntemlerle Kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi FBE, Elazığ, 2010.
- [55] FİDAYE, Ü., Elektromekanik Eyletimli Bir Kanat Tahrik Sistemi İçin Denetleyici Tasarımı Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi FBE, İzmir, 2010.
- [56] GÖKALAN, R., Rüzgar türbin Uygulamasında Sürekli Miknatıslı Senkron Jeneratörün Hız Sensörsüz Alan Yönlendirme Kontrolü ve Şebeke Bağlantısı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi FBE, İzmir, 2011.
- [57] KAYIŞLI, K., Birim Güç Faktörlü Dayanıklı Dönüştürücü Devresinin Tasarlanması ve Gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi FBE, Elazığ, 2011.
- [58] YAĞIZ, N., YÜKSEK, İ. , KEPÇELER, T., Düzlemsel Esnek Kollu Bir Robotun Kayan Kipli Denetimi, Politeknik Dergisi Cilt: 4 Sayı: 2 s. 15-19, 2001.
- [59] HACIOĞLU, Y., Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrol Tasarımı ve Robot Yörünge Takibinde Uygulanması, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, İstanbul 17–19 Kasım 2005.
- [60] KÖKSAL, M.İ., HAMAY, Y.S., GAZI, V., FIDAN B., Yapay Potansiyel Fonksiyonlar ve Kayan Kipli Denetim Sürü Denetimi, Çok Erkinli ve Haberleşmeli Dinamik Kontrol Sistemleri Çalıştayı, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, 6 Haziran 2007.
- [61] NALBANTOĞLU, M., ORHAN, A., BAYINDIR M.İ., Sonsuz Baraya Bağlı Bir Senkron Generatörün Uyarma Kontrolü İçin Kayma Kipli Güç Sistemi Kararlılık İçin Tasarımı, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [62] YANNIER, S., SABANOVIC, A., Piezoelektrik Aktüatörler için Analog Kayan Kipli Denetleyici, TOK'07 Bildiriler Kitabı İstanbul, 5-7 Eylül 2007.
- [63] EFE, M.Ö., Kesir Dereceli Kayan Kipli Denetim, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul, 13-15 Kasım 2008.
- [64] EKER, İ., Sliding Mode Control with PID Sliding Surface and Experimental Application to An Electromechanical Plant, ISA Transactions, vol.45, p.109-118, Number 1, January 2006.
- [65] BEBEK, Ö., GÜNAY, M., ŞABANOVIÇ, A., GÖKTUĞ G., Zamanlama Kayışı Servo Sistemin Değişken Yapılı Sistem Denetimi, ELECO 2002, p.202-206, Bursa, Turkey, 18-22 December, 2002.

- [66] YÜCEL, A.N., BUĞDAY, Y., EFE, M.Ö., Bir DC Motorun Gerçek Zamanlı Kontrolünde Üç Yöntem, TOK'08 Bildiriler Kitabı, İstanbul, syf. 280-285, 13-15 Kasım 2008.
- [67] DEMIRTAŞ, M., ALTUN, Y., LAB-VIEW Kullanarak Dönen Tek Ters Sarkacın Gerçek Zamanlı Kayan Kip Kontrolü, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [68] ACHA, E., FUERTE-ESQUIVEL, C. R., AMBRIZ-PEREZ, H., ANGELES-CAMACHO, C., FACTS Modelling and Simulation in Power Networks, John Wiley, p. 1-6, England, 2004.
- [69] ABACI, K., Gerilim Kararlılığının İyileştiricilerinin Çatallaşma ve Kaotik Analizleri, Doktora Tezi, SAU FBE, Sakarya, Mayıs 2007.
- [70] http://en.wikipedia.org/wiki/Static_VAR_compensator
- [71] EMİNOĞLU, U., FACTS Elemanları Kullanılan Güç Akış Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi FBE, 2003.
- [72] RUSEJLA, P.S., GLAVIC M., Effect of FACTS Devices on Steady State Voltage Stability, Univesity of Tuzla, Bosnia and Hrzegovina.
- [73] HURMA, H.N., PID Kontrolör ve PLC Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ FBE, İstanbul, Haziran 1998.
- [74] KÜÇÜKER, A., Asılı Sarkaç Sisteminde Konum Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, sayfa 1-11, Haziran 2007.
- [75] KUO, Y.L., WU, T.L., Open-Loop and Closed-Loop Attitude Dynamics and Controls of Miniature Spacecraft Using Pseudowheels, Computers & Mathematics with Applications, 7 April 2012.
- [76] AKSOY, S., Programlanabilir Lojik Denetleyiciler, Değişim Yayınları, sayfa 133-150, Sakarya, 2004.
- [77] WANG, J., SONG, A., ZHU, Q., Adaptive PID Temperature Controller Based on Fuzzy Logic, Applied Mechanics and Materials, vol. 8, p. 1455-1458, 2011.
- [78] BİNGÜL, Z., Matlab ve Simulink'le Modelleme/Kontrol-I, Birsen Yayınevi, 2005.
- [79] UÇAR, C., Endüstriyel Sistemlerde İleri Kontrol Algoritmalarının Uygulanması, İTÜ FBE, İstanbul, Ocak 2007.

- [80] BURNS, R.S., *Advanced Control Engineering*, Butterworth-Heinemann, London 2001.
- [81] KÖSE, E., ABACI, K., AKSOY, S., YAMAÇLI, S., *Farklı Karakteristik Yapıda Kritik Yüklenme Sınırında Olan Güç Sistemlerinin Statik VAR Kompensator(SVC) ile Kontrolü*, TOK'09. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, YTÜ-İstanbul, 13-15 Ekim 2009.
- [82] AKSOY, S., *Sistem Teorisi Ders Notları*, Sakarya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya.
- [83] ZIEGLER, JG., NICHOLS, NB., ROCHESTER, NY., *Optimum Settings for Automatic Controllers*. Transactions of ASME, vol.64, pp. 759-768, 1942.
- [84] ASTRÖM, KJ., HAGGLUND, T., *Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins*. Automatica, vol.20, no.5, pp. 645-651, 1984.
- [85] HANG, CC., ASTRÖM, KJ., HO, WK., *Refinements of the Ziegler-Nichols tuning Formula*. IEE Proceeding-D, vol.138, no.2, March 1999.
- [86] OGATA, K., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 2002.
- [87] KUMAR, R., KHAN, M., *Pole Placement Techniques for Active Vibration Control of Smart Structures: A Feasibility Study*, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 129 / 601, October 2007.
- [88] ARVANITIS, K.G., *A Periodic Multirate Adaptive Pole Placer for Possibly Nonminimum Phase Plants*, Transactions of the ASME, 668 / vol. 121, December 1999.
- [89] YONEZAWA, H. et al., *Study of a STATCOM Application for Voltage Stability Evaluated by Dynamic PV Curves and Time Simulations*, Power Engineering Society Winter meeting, vol.2, p. 1471-1476, IEEE, 2000.
- [90] ELMAS, Ç., *Yapay Zeka Uygulamaları*, Seçkin Yayıncılık, 2007.
- [91] AKAT, S.B., EFE, M.Ö., *Bir Manyetik Askı Sisteminin Kontrolünde Dört Yöntemin Karşılaştırılması*, TOK'07 Bildiriler Kitabı, İstanbul, sayfa 265-270, Eylül 2007.
- [92] ARIKAN, H., GÖZÜKIZIL, Ö.F., ÖZGÜR, D., *Genel Matematik II*, Değişim Yayınları, sayfa 5-13, Sakarya, Nisan 2002.
- [93] YU, X., XU, J. X., *Variable Structure Systems: Towards the 21st Century*, 274, Springer, p. 1-31, Berlin, 2002.

- [94] YAZICI, İ., Model Referans Kayan Kipli Kontrolör Tabanlı Güç Sistem Kararlayıcı Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, sayfa 51-65, Haziran 2008.
- [95] EDWARDS, C., COLET, E. F., FRIDMAN, L., Advances in Variable Structure and Sliding Mode Control, 334, Thoma M., Morari M., Springer, pp. 90-120, Berlin, 2006.
- [96] KJAER, M.A., Sliding Mode Control, Ders Notu, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, İsveç, 2004.
- [97] PERRUQUETTI, W., BARBOT, J.P., Sliding Mode Control In Enginering, Marcel Dekker Inc, New York, pp. 20-47, 2002.
- [98] BODUR, F.N., Tasıt Süspansiyon Sistemlerinin Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrolü, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, syf. 30-60, Temmuz 2008.
- [99] KRISTINSSON, K., DUMONT, G.A., Genetic Algorithms in System Identification, in 3rd IEEE Int. Symp. Intell. Contr., Arlington, VA, pp. 597-602, 1988.
- [100] AJJARAPU, V., CHRISTY, C., The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis, Transaction on Power Systems, vol. 7, p. 416-423, February 1992.
- [101] YALÇIN, M.A., Elektrik Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya.
- [102] www.elektrolojik.com.tr/ Katalog 2011-Schneider Electric

ÖZGEÇMİŞ

Ercan KÖSE, 09.09.1970 de Malatya'da doğdu. İlk, Orta, lise eğitimine Malatya'da devam etti. 1995'de Anadolu Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliğinden mezun oldu. 1996-2004 yılları arasında çeşitli devlet kurumlarında Mühendis ve Öğretmen olarak görev yaptı. 2004 yılından beri Mersin Üniversitesi, Tarsus Teknik Eğitim Fakültesi, Elektronik-Bilgisayar Öğretmenliği bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. 2005'de Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında mezun olduktan sonra, 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında doktora eğitimine başladı. Halen doktora çalışmasını tez aşaması safhasında devam ettirmektedir. Evli ve ikiz çocuk babasıdır.