T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK SENKRON KOMPANZATÖRÜN PID KONTROLÖR İLE KONTROLÜ

Mustafa KARATAŞ

TEZ YÖNETİCİSİ

Prof.Dr.M.Salih MAMİŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

MALATYA
Mayıs 2011

Tezin Başlığı: Statik Senkron Kompanzatörün PID Kontrolör ile Kontrolü

Tezi Hazırlayan: Mustafa KARATAŞ

Sınav Tarihi: 28.04.2011

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Doç. Dr. Müslüm ARIKAN ….....

Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ ….....

Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ÖZGÜVEN ….....

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL
Enstitü Müdürü

Onur Sözü

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Statik Senkron Kompanzatörün PID Kontrolör ile Kontrolü” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mustafa KARATAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

STATİK SENKRON KOMPANZATÖRÜN PID KONTROLÖR İLE KONTROLÜ

Mustafa KARATAŞ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

126+X sayfa

2011

Danışman: Prof. Dr. M.Salih MAMİŞ

Enerji iletim sistemlerinde kontrol edilebilirlik ve sistem kapasitesinin artırılması konuları günümüzde büyük önem kazanmıştır. İletim hatlarının kuruluş amacı, yük ile iletim merkezleri arasındaki bağlantıyı sağlayarak yükteki değişik etkenlere bağlı değişimlerin en ekonomik şekilde karşılanmasını sağlamaktır. Son yıllarda iletim hatlarındaki yüklenme büyük ölçüde artmakta ve bu artış halen devam etmektedir.

Mevcut durumda kullandığımız iletim sistemlerinin çoğunda fiziksel sınırlamalar nedeniyle istenilen miktarda güç iletimi sağlanamamaktadır. Mevcut santrallerin daha verimli şekilde kullanılabilmesi için enerji iletim hatlarından daha fazla güç transfer edilmesi ve yeni santral ihtiyacının minimize edilmesi sağlanmalıdır. İletim sistemleri günümüzde mekanik veya elektromekanik kontrol elemanlarıyla kumanda edilmektedir. Esnek alternatif akım iletim sistemlerinden (Flexible AC Transmission Systems- FACTS) biri olan STATCOM, yüke paralel bağlanarak ve yapılan uygun denetimlerle güç sisteminde reaktif güç dengesini sağlamakta kullanılabilir. Böylece iletim hatlarının güç kapasitesi artırılmış olur.

Bu çalışmada kompanzasyonla ilgili temel kavramlar incelenmiş, esnek alternatif akım iletim hatları, STATCOM ve PID kontrol üzerinde çalışılmıştır. Sonuç olarak çalışmamızda bir iletim hattında STATCOM' un PID kontrolör ile kontrolününün MATLAB/Simulink ortamında çalışması incelenerek, elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: İletim Sistemi, Reaktif güç, FACTS, STATCOM, PID kontrol, MATLAB/simulink

ABSTRACT

MA Thesis

THE CONTROL OF STATIC SYNCHRONOUS COMPENSATOR WITH PID CONTROLLER

Mustafa KARATAŞ

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric and Electronics Engineering

126+X pages

2011

Supervisor: Prof. Dr. M.Salih MAMIS

During the last decades, the controllability and improvement of system capacity have become more important in power transmission systems. Electric power transmission lines were initially built to link remote load centres and generating plants by meeting the changes in load due to various factors in the most economical way. In recent years, a large demand has been placed on the transmission network, and demands will continue to increase.

In most of the existing transmission systems, a desired amount of power cannot be transferred due to some physical limitations. In order to exploit the existing power plants more efficiently, power capacity of transmission lines need to be increased. By this way, requirement of new power plants is minimized. In the past, mechanical or electromechanical control systems have been used. Nowadays, faster control methods have been improved. STATCOM, (FACTS-Flexible AC Transmission Systems), is connected parallel to the load to provide reactive power to balance the system. Thus, the power transmission line capacity is increased.

In this thesis, the basic concepts related to compensation are examined, flexible alternating current transmission lines, STATCOM and PID control are studied. Control of STATCOM in a transmission system by PID controller is realized in MATLAB / Simulink environment and the results are summarized.

KEY WORDS: Transmission Line, Reactive Power, FACTS, STATCOM, PID control, MATLAB/Simulink

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, tavsiye ve desteğini aldığım beni yönlendiren; bilgi ve birikimlerini bana aktaran ve değerli zamanını ayıran danışman hocam Sayın Prof. Dr. M.Salih MAMİŞ'e ;

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığında görev yapan tüm öğretim üyelerine;

Ayrıca tüm hayatım boyunca ilgi ve desteklerini benden esirgemeyen değerli aileme ve özellikle kardeşim Fahrettin KARATAŞ' a ve tüm sevdiklerime;

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
ÖZET		I
ABSTRACT		II
TEŞEKKÜR		III
İÇİNDEKİLER		IV
ŞEKİLLER LİSTESİ		VI
TABLOLAR LİSTESİ		X
SİMGELER VE KISALTMALAR		X
1.	**GİRİŞ**	**1**
2.	**KURAMSAL TEMELLER**	**4**
2.1.	Kompanzasyon ile İlgili Temel Kavramlar	**4**
2.1.1.	Anlık güç	**5**
2.1.1.1.	Direnç üzerindeki güç	**7**
2.1.1.2.	Bobin üzerindeki güç	**8**
2.1.1.3.	Kondansatör üzerindeki güç	**10**
2.1.1.4.	Görünür, aktif ve reaktif güç arasındaki ilişkiler	**10**
2.1.2.	Reaktif güç üreten araçlar	**12**
2.1.2.1.	Yağlı tip kondansatör	**13**
2.1.2.2.	Kuru tip kondansatör	**13**
2.1.3.	Transformatörlerin kompanzasyonu	**13**
2.2.	FACTS Sistemleri (Flexible AC Transmissions Systems)	**15**
2.2.1.	FACTS teknolojisinin avantajları	**16**
2.2.2.	FACTS teknolojisinin dezavantajları	**16**
2.2.3.	Enerji iletim sistemleri için başlıca FACTS cihazları	**17**
2.2.4.	FACTS cihazları	**17**
2.2.4.1.	Statik VAr kompanzatör (SVC)	**17**
2.2.4.2.	Statik senkron kompanzatör (STATCOM)	**17**
2.2.4.3.	Statik senkron seri kompanzatör (SSSC)	**18**
2.2.4.4.	Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC)	**18**
2.2.4.5.	Tristör kontrollü reaktör (TCR)	**19**
2.2.4.6.	Tristör anahtarlamalı reaktör (TSR)	**20**
2.2.4.7.	Tristör anahtarlamalı kapasitör (TSC)	**20**
2.2.4.8.	Tristör kontrollü faz açı regülâtörü (TCPAR)	**20**
2.2.4.9.	Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC)	**21**
2.2.5.	FACTS yapılarının sisteme etkileri	**21**
2.3.	STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)	**23**
2.3.1.	T-Statcom	**23**
2.3.2.	D-Statcom	**24**
2.3.3.	Statcom kontrol tekniği	**27**
2.3.4.	Statcom kontrol parametrelerinin hesaplanması	**30**
2.3.4.1.	Statcom reaktif güç hesabı	**30**
2.3.4.2.	Statcom da DC gerilim, modülasyon indeksi (m_a) ve efektif hat gerilimi hesabı	**31**
2.4.	Kontrol Sistemleri	**33**
2.4.1.	Geri besleme çevrimi	**35**
2.4.1.1.	Ölçüm	**36**
2.4.1.2.	Aktüatör	**36**
2.4.1.3.	Proses	**36**
2.4.1.4.	Otomatik kontrolör	**37**
2.4.2.	Kontrol sistemlerinde kullanılan denetleyiciler	**37**

2.4.2.1. Bulanık mantık denetleyici ile kontrol…… **37**
2.4.2.2. Yapay sinir ağları ile kontrol…… **39**
2.4.2.3. PID ile kontrol…… **40**
3. **MATERYAL VE YÖNTEM**…….... **41**
3.1. PID (Proportional-Integral-Derivative; Oransal-Integral-Türevsel) Kontrolörler..... **41**
3.1.1. PID denetleyicilerin karakteristikleri……..... **43**
3.1.1.1. Oransal denetleyici (K_p) …….. **43**
3.1.1.2. Integral denetleyici (K_i)..…… **43**
3.1.1.3. Türevsel denetleyici (K_d)..…… **43**
3.1.2. PID denetleyici katsayılarının sisteme etkisi…….…….. **43**
3.1.3. PID kontrol edici tasarımında izlenecek temel basamaklar…… **44**
3.1.4. Ziegler-Nichols (Z-N) tasarım metodu…….…..... **44**
3.2. Dönüştürücüler…….…..... **46**
3.2.1. Akım beslemeli dönüştürücüler ……..…….…..... **46**
3.2.2. Gerilim beslemeli dönüştürücüler..……..…….…..... **47**
3.2.3. Tek fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler…… **49**
3.2.4. Üç fazlı gerilim beslemeli dönüştürücüler…….…..... **53**
3.2.5. Darbe Genişlik Modülasyonlu Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler…… **58**
4. **ARAŞTIRMA BULGULARI VE UYGULAMALAR** **61**
4.1. Uygulama–1…… **61**
4.2. Uygulama–2…… **73**
4.2.1. Sistemde kullanılan bloklar..…… **76**
4.2.1.1. Generatör-1 bloğu…..…… **76**
4.2.1.2. Yük-1 bloğu..…….....…..... **76**
4.2.1.3. L1 iletim hattı bloğu…… **77**
4.2.1.4. Yük-2 bloğu..…….... **77**
4.2.1.5. L2 iletim hattı bloğu…… **77**
4.2.1.6. Yük-3 bloğu…..……..…….....…..... **78**
4.2.1.7. Generatör-2 bloğu..…….....…..... **78**
4.2.1.8. Ground bloğu……..…….....…..... **78**
4.2.1.9. Step V_{ref} bloğu……..……..…….....…..... **78**
4.2.1.10 STATCOM bloğu…..…….....…..... **79**
4.2.2. Sistem için hesaplanan STATCOM parametreleri..... **79**
4.3. Uygulama-3……..…….....…..... **92**
4.4. Uygulama-4……..…….....…..... **102**
4.5. Uygulama-5……..…….....…..... **114**
5. **SONUÇ**…… **121**
6. **KAYNAKLAR**…….... **122**
7. **ÖZGEÇMİŞ**…… **126**

ŞEKİLLER LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Akım ve Gerilimin Zamana Bağlı Değişimi……..	**5**
Şekil 2.2.	Bir Direnç Üzerinde Oluşan Güç ……....	**8**
Şekil 2.3.	Görünür, Aktif ve Reaktif Güçlerin Tanımı ve Aralarındaki İlişki…….	**11**
Şekil 2.4.1.	STATCOM Devre Şeması……..…	**16**
Şekil 2.4.2.	SSSC Devre Şeması ……..…	**16**
Şekil 2.5.	TCSC Devre Şeması ……	**19**
Şekil 2.6.	Üçgen Bağlı TCR ve Filtreler…….....	**19**
Şekil 2.7.	TCPAR Devre Şeması …….....	**20**
Şekil 2.8.	UPFC Devre Şeması…….....	**21**
Şekil 2.9.	STATCOM Devre Şeması……	**25**
Şekil 2.10.	STATCOM' un Genel Yapısı……	**25**
Şekil 2.11.	STATCOM' un Genel Eşdeğer Devre Yapısı, Gerilim Fazörleri ve Gerilim Dalga Biçimleri…..…….	**27**
Şekil 2.12.	STATCOM ve Genel Denetim Yapısı……..……	**29**
Şekil 2.13.	STATCOM' un Akım-Gerilim Karakteristiği…..……	**30**
Şekil 2.14.	Bir Otomatik Kontrol Sisteminin Blok Diyagramı…….	**33**
Şekil 2.15.	Açık Çevrim Kontrol Sisteminin Blok Diyagramı……	**33**
Şekil 2.16.	Çok Değişkenli Kapalı Çevrim Kontrol Sisteminin Blok Diyagramı…….....	**34**
Şekil 2.17.	Temel Öğeleriyle Süreç Denetim Sisteminin Gösterimi…….	**34**
Şekil 2.18.	Geri Beslemeli Bir Sistemin Genel Gösterimi……..	**35**
Şekil 2.19.	Geri Besleme Kontrol Çevrimi……	**36**
Şekil 2.20.	Bulanık Mantık Denetleyici Sistemi……...	**38**
Şekil 2.21.	Bulanık Mantık Denetleyici Blok Diyagramı……	**38**
Şekil 2.22.	Yapay Sinir Ağları ile Oluşturulan Bir Denetleyici ve Denetim Sistemi……	**39**
Şekil 3.1.	PID Kontrol Transfer Fonksiyonu…….....	**41**
Şekil 3.2.	PID Kontrol Edici Genel Gösterimi..……	**42**
Şekil 3.3.	Üç fazlı bir ABD……..……	**47**
Şekil 3.4.	Tek fazlı Tam Dalga GBD ve Akım-Gerilimlerinin Dalga Şekli……..……	**50**
Şekil 3.5.	GBD' nin Bir Faz Bacağı ve Bir Faz Bacağının Çıkış Geriliminin Dalga Şekli..……	**51**
Şekil 3.6.	Üç Fazlı İki Seviyeli GBD……..……	**54**
Şekil 3.7.	Şekil 3.6.' daki Üç fazlı GBD 'nin Akım ve Gerilimlerinin Dalga Şekilleri……..……	**55**
Şekil 3.8.	Ana Frekansın Dokuz Katı Bir Anahtarlama Frekansı ile DGM Dönüştürücünün Çalışması a) Bir Faz Bacağı, b) DGM Dalgaları……..……	**59**
Şekil 4.1.	$G(s)$ Transfer Fonksiyonunun Tasarımı……	**61**
Şekil 4.2.	$K = 100$ için $G(s)$ Fonksiyonu Tasarımı……	**62**
Şekil 4.3.	$K = 100$ için Sistem Cevabı……..	**62**
Şekil 4.4.	$K = 50$ için Sistem Cevabı……	**63**
Şekil 4.5.	$K = 25$ için Sistem Cevabı……..……..	**64**
Şekil 4.6.	$K = 500$ için Sistem Cevabı……..……	**64**
Şekil 4.7.	PID Denetleyici ile Tasarım…….....	**65**

Şekil 4.8.	$K_p = 14{,}52 - K_i = 50{,}8581 - K_d = 0{,}9952$ için Sistem Cevabı……	**68**
Şekil 4.9.	$K_p = 13{,}20 - K_i = 50{,}8581 - K_d = 0{,}9952$ için Sistem Cevabı……	**69**
Şekil 4.10.	$K_p = 13{,}20 - K_i = 5{,}70 - K_d = 0{,}9952$ için Sistem Cevabı……	**70**
Şekil 4.11.	$K_p = 13{,}20 - K_i = 5{,}7 - K_d = 1{,}47$ için Sistem Cevabı……	**71**
Şekil 4.12.	$K_p = 13{,}00 - K_i = 5{,}00 - K_d = 1{,}47$ için Sistem Cevabı……	**72**
Şekil 4.13.	Simülasyonu Yapılan Sistem…..……..	**73**
Şekil4.14.1	Simülasyonu Yapılan Sistemin Ölçüm Bloğu……..	**73**
Şekil4.14.2	Simülasyonu Yapılan Sistemin STATCOM Bloğu……..	**74**
Şekil4.14.3	STATCOM' un Güç Bileşenleri Bloğu……..	**74**
Şekil4.14.4	Simülasyonu Yapılan Sistemin STATCOM Kontrol Bloğu….	**75**
Şekil 4.15.	Simülasyonu Yapılan Sisteme Ait Generatör-1Bloğu ve Parametre Değerleri……	**76**
Şekil 4.16.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Yük-1Bloğu ve Parametre Değerleri……	**76**
Şekil 4.17.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait L1 İletim Hattı Bloğu ve Parametre Değerleri……	**77**
Şekil 4.18.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Yük-2 Bloğu ve Parametre Değerleri……	**77**
Şekil 4.19.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait L2 İletim Hattı Bloğu ve Parametre Değerleri……	**77**
Şekil 4.20.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Yük-3 Bloğu ve Parametre Değerleri……	**78**
Şekil 4.21.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Generatör-2 Bloğu ve Parametre Değerleri……	**78**
Şekil 4.22.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Ground Bloğu……	**78**
Şekil 4.23.	Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Step Bloğu ve Parametre Değerleri……	**78**
Şekil 4.24.	Simülasyonu Yapılan Sisteme Ait STATCOM Bloğu ve Güç Parametre Değerleri……	**79**
Şekil 4.25.	AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1000)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı……	**83**
Şekil 4.26.	AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 2,\ K_i = 1300)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}17)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı……	**84**

Şekil 4.27. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 3,\ K_i = 1500)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı…… **84**

Şekil 4.28. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 2,\ K_i = 1000)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı…… **85**

Şekil 4.29. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1400)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı…… **85**

Şekil 4.30. V_{abc} ve I_{abc} Değişimleri……..…….. **86**

Şekil 4.31. V_{dc} Değişimi……..…….. **87**

Şekil 4.32. I_d ve I_q Değişimi……..…….. **88**

Şekil 4.33. m_a Değişimi……..…….. **88**

Şekil 4.34. Simülasyonu Yapılan Sistemde İletim Hattı Değişikliği…….. **92**

Şekil 4.35. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1400)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı…….. **93**

Şekil 4.36. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 8,\ K_i = 2000)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı…….. **94**

Şekil 4.37. V_{abc} ve I_{abc} Değişimleri……..…….. **95**

Şekil 4.38. V_{dc} Değişimi……..…….. **96**

Şekil 4.39. I_d ve I_q Değişimi……..…….. **97**

Şekil 4.40. m_a Değişimi……..…….. **97**

Şekil 4.41. Simülasyonu Yapılan Sistemde Yük Değişikliği…….. **102**

Şekil 4.42. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1400)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı…….. **103**

Şekil 4.43. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 6,\ K_i = 1800)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı…….. **104**

Şekil 4.44.	AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 2,\ K_i = 1000)$ DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$ Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$ Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ Sistem Cevabı.....	**105**
Şekil 4.45.	V_{abc} ve I_{abc} Değişimleri.....	**106**
Şekil 4.46.	V_{dc} Değişimi.....	**107**
Şekil 4.47.	I_d ve I_q Değişimi.....	**108**
Şekil 4.48.	m_a Değişimi.....	**108**
Şekil 4.49.	Simülasyonu Yapılan İletim Hattı.....	**114**
Şekil 4.50.	İletim Hattı ve Bara-2 Ölçüm Bloğu.....	**115**
Şekil 4.51.	Bara-2'nin Üç Faz Bacağında Ölçülen Gerilim.....	**115**
Şekil 4.52.	Bara-2'nin Tek Faz Bacağında Ölçülen Gerilim.....	**116**
Şekil 4.53.	İletim Hattına STATCOM' un Bağlanması.....	**116**
Şekil 4.54.	STATCOM Ölçüm Bloğu.....	**117**
Şekil 4.55.	STATCOM Bağlıyken Bara-2' de Ölçülen Gerilim.....	**117**
Şekil 4.56.	Bozucu Yükte İletim Hattı ve Bara-2 Ölçüm Bloğu.....	**118**
Şekil 4.57.	Bozucu Yükte Bara-2'nin Tek Faz Bacağında Ölçülen Gerilim.....	**118**
Şekil 4.58.	Bozucu Yükte İletim Hattına STATCOM Bağlanması.....	**119**
Şekil 4.59.	Bozucu Yükte STATCOM Bağlıyken Bara-2' de Ölçülen Gerilim.....	**120**

TABLOLAR LİSTESİ

		Sayfa
Tablo 2.1.	Elektriksel birimler ……	**12**
Tablo 2.2.	Güç dönüşümleri ……	**12**
Tablo 2.3.	Çeşitli güç ve gerilimlerdeki transformatörlerin kompanzasyon için gerekli kondansatör güçleri……	**14**
Tablo 3.1.	Denetleyici katsayılarının sisteme etkisi ……	**44**
Tablo 3.2.	Z-N metoduna göre PID parametlerinin seçimi ……	**45**
Tablo 3.3.	Üç Fazlı İki Seviyeli GBD için Anahtarlama Özelliği……	**56**
Tablo 3.4.	Üç Fazlı İki Seviyeli GBD' nin Faz-Nötr Gerilimi için Anahtarlama Özellikleri……	**57**
Tablo 4.1.	Karakteristik denklemin kökleri ……	**65**
Tablo 4.2.	Yük ve kaynak akımı nominal değerleri……	**90**
Tablo 4.3.	Bara ve STATCOM gerilim değerleri……	**90**
Tablo 4.4.	Bara ve STATCOM akım değerleri……	**91**
Tablo 4.5.	İletim hattı gerilim değerleri……	**91**
Tablo 4.6.	İletim hattı akım değerleri……	**91**
Tablo 4.7.	Sistem çalıştıktan sonra oluşan yük ve kaynak akımı değerleri..	**92**
Tablo 4.8.	Yük ve kaynak akımı nominal değerleri……	**99**
Tablo 4.9.	Bara ve STATCOM gerilim değerleri……	**99**
Tablo 4.10.	Bara ve STATCOM akım değerleri……	**100**
Tablo 4.11.	İletim hattı gerilim değerleri……	**100**
Tablo 4.12.	İletim hattı akım değerleri……	**101**
Tablo 4.13.	Sistem çalıştıktan sonra oluşan yük ve kaynak akımı değerleri..	**101**
Tablo 4.14.	Yük ve kaynak akımı nominal değerleri……	**110**
Tablo 4.15.	Bara ve STATCOM gerilim değerleri……	**111**
Tablo 4.16.	Bara ve STATCOM akım değerleri……	**111**
Tablo 4.17.	İletim hattı gerilim değerleri……	**112**
Tablo 4.18.	İletim hattı akım değerleri……	**112**
Tablo 4.19.	Sistem çalıştıktan sonra oluşan yük ve kaynak akımı değerleri..	**113**

SİMGELER VE KISALTMALAR

V	Gerilim Değeri (Volt)
A	Akım Değeri (Amper)
Hz	Frekans Değeri (Hertz)
R	Empedans veya Direnç Değeri (Ohm)
S	Görünür Güç (VA)
P	Aktif Güç (Watt)
Q	Reaktif Güç (VAr)
Φ	Faz açısı (Derece)
$Cos\,\Phi$	Güç Faktörü
X	Reaktans
K	Sistem Kazancı
e	Hata Sinyali
t	Zaman Sabiti
m_a	Modülasyon indeksi

1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişmeler ve refah seviyesinin yükselmesi nedeniyle işyerlerinde, konutlarda ve sanayide, reaktif enerjiyi fazla miktarda çeken cihaz ve makineler artmış bulunmaktadır. Bu tip cihazlar; çalışabilmeleri için aktif güç yanında bir de reaktif güç çekmektedirler. Akımın reaktif bileşeni; elektro dinamik prensibi ile çalışan motor, jeneratör vb. makinelerde manyetik alan doğurmaya yaramaktadır. Akımın reaktif bileşeni enerji sistemlerinde;

- Yüklenme kapasitesini düşürmekte;
- Enerji kayıplarını arttırmakta;
- Gerilim düşümünü arttırmakta;
- Verimi düşürmekte ve
- Enerji ve donanım maliyetini arttırmaktadır.

Sözü geçen olumsuzlukların giderilmesi için gerekli tedbirlerin alınması halinde, mevcut elektrik sistemimizle bir müddet daha yeni yatırımlar yapılmasına gerek kalmadan elektrik taleplerinin karşılanması ve elektrik şebekelerimizin verimli bir şekilde işletilmesi mümkün olacaktır. Bu tedbirlerden birisi de reaktif güç kompanzasyonudur. Enerji sistemindeki endüktif ve kapasitif yüklerin dengelenmesi, şebekenin ve yükün ihtiyacı olan reaktif gücün belli teknikler kullanılarak karşılanması işlemi reaktif güç kompanzasyonu olarak adlandırılır. Artan enerji ihtiyacının neden olduğu kayıpların en alt düzeye indirilmesi ve kullanıma sunulan elektrik enerjisinin, elektrik sistemlerinin üretim, iletim ve dağıtım kapasitelerinin arttırılması, reaktif güç akışının daha kaliteli hale getirilmesi amaçlarıyla reaktif güç kompanzasyonu gün geçtikçe daha yaygın bir biçimde uygulanmaktadır. Son yıllarda tristör denetimli güç kompanzasyon düzenleri gerek endüstriyel sistemlerin güç katsayılarını dinamik olarak düzenlemede gerekse de terminal geriliminin kararlığını sağlamada yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Enerji sistemlerinin kontrolünde en önemli problemlerden biri reaktif güç kompanzasyonudur. Reaktif güç, iletim sisteminde kayıpların artmasına, iletim hattının güç iletim kapasitesinin azalmasına ve hat sonundaki gerilimin genliğinde çok büyük değişmelere neden

olur. Bu yüzden alternatif akım güç sistemlerinde iletilebilir gücü arttırmak ve kayıpları azaltmak için reaktif güç kompanzasyonunun yapılması gerekir. Büyük güçlü ve hızlı devreye girip çıkan yüklerin güç faktörü geleneksel elektromekanik kompanzasyon düzenekleri ile düzeltilemez. Bunun nedeni geleneksel kompanzasyon sistemlerinin, yükün ani şekilde ihtiyaç duyduğu reaktif güç talebine hemen cevap verememesi ve ihtiyaç duyulan kapasitif reaktif gücün kompanzasyon sisteminden karşılanamamasıdır [1].

Sabit ve mekanik anahtarlamalı reaktör-kondansatör grupları ve senkron generatörler, iletim hatlarındaki gerilim profilini kontrol ederek kararlı durum güç akışını arttırmak için kompanzasyon amacı ile kullanılmaktadırlar. Ancak, geleneksel kondansatör ve reaktör grupları ile yapılan kompanzasyonun, sistemde meydana gelen değişimlere yeterince hızlı cevap verememesi gibi büyük bir dezavantajı vardır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, iletim hattının reaktif kompanzasyonunun güç elektroniği tabanlı devreler ile yapılması durumunda, güç sisteminin geçici ve dinamik kararlılığının iyileştirilebileceğini göstermektedir [2,3].

Güç elektroniği anahtarlamalı dönüştürücü devreler ile endüktans veya kondansatörler olmaksızın doğrudan denetlenebilir bir reaktif güç üretebilme fikri, ilk olarak 1976'da Gyugyi tarafından ortaya atılmıştır [4]. 1980'lerin sonunda ise mevcut güç sistemlerinin kapasitesini artırmayı/geliştirmeyi ve işletimsel problemleri çözmeyi amaçlayan FACTS (Flexible AC Transmissions Systems) kavramı, Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (EPRI) tarafından yarı iletken güç teknolojisinin gelişimine paralel olarak, yeni bir teknolojik düşünce olarak ortaya atılmıştır. FACTS kontrolörü güç elektroniği tabanlı bir uygulama olduğu için, geleneksel mekanik kontrolörlere göre daha hızlıdır. Bu kontrolörler uygun bir şekilde ayarlandığı zaman, iletim sistemlerinin kararlı çalışma sınırlarını arttırır [5]. Bugüne kadar FACTS adı altında birçok güç akış kontrolörü önerilmiş ve dünya çapında birçok FACTS uygulaması gerçekleştirilmiştir. Güç elektroniği tabanlı kontrolörleri genel olarak; "Tristör Tabanlı Kontrolörler veya geleneksel Statik VAr Kompanzatörler (SVC)" ve Senkron Gerilim Kaynağı prensibine göre çalışan "Konverter Tabanlı Kontrolörler veya gelişmiş Statik VAr Kompanzatörler (ASVC)" olarak ikiye ayırmak mümkündür. Tristör tabanlı FACTS aygıtlarında, anahtarlama elemanı olarak tristör kullanılmaktadır. Tristör tabanlı FACTS aygıtlarından Tristör

Kontrollü Statik VAr Kompanzatör (TCSVC), ilk uygulanan FACTS aygıtıdır. 1970'lerin başında ark fırını kompanzasyonu için geliştirilen TCSVC, daha sonraki yıllarda enerji iletim uygulamaları için kullanılmıştır. En son geliştirilen FACTS kontrolörleri senkron gerilim kaynağı prensibine göre çalışan konverter tabanlı kontrolörlerdir. Bunların en çok kullanılanları ise STATCOM, Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC), hat arası güç akış kontrolü (IPFC) ve Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolü (UPFC)'dür.

FACTS sistemlerinin kontrol edilmesinde denetleyiciler kullanılmaktadır. Güç sistemlerinin kontrolünde kullanılan denetleyiciler sistemin istenilen çalışma sınırları içerisinde uygun denetimlerle çalışmasını sağlar. Kullanılan denetleyiciler sistemde otomatik kontrol sağlayarak, insan müdahalesine gerek olmaksızın çalışma şartlarını korumaktadır. Denetleyicinin görevi sistemi belirli limitler içinde tutmaktır. Bütün otomatik kontrol elemanları iç mekanizmalarına göre az değişiklik gösteren belirli genel sistem cevaplarını kullanırlar. Kontrol sistemlerinde en çok kullanılan denetleyiciler, BMD (Bulanık Mantık Denetleyici), YSA (Yapay Sinir Ağları) ve PID (Oransal-İntegral-Türevsel) denetleyicilerdir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kompanzasyon ile İlgili Temel Kavramlar

Elektrik enerjisinin, asrımızın en yaygın kaynaklarından biri olarak üretildiği, santralden en küçük alıcıya kadar dağıtımında en az kayıpla taşımanın yolları ve hesapları yapılmaktadır. Elektrik enerjisine ihtiyacın her geçen gün biraz daha artması, enerji üretiminin biraz daha pahalılaşması, taşınan enerjinin de kaliteli, ucuz ve iş gören aktif enerji olmasını daha zorunlu kılmaktadır. Güç sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmak, verimliliği arttırmak ve enerji tutumluluğunu sağlamanın en etkin önlemlerinden birini reaktif güç kompanzasyonu oluşturmaktadır.

Alternatif akım sistemlerinde; kayıpların en aza indirilmesi ve sistemin enerji kapasitesinin arttırılması için reaktif gücün kontrolü gereklidir. Güç sisteminde reaktif güç dengesi; şebeke aktif kayıplarını, elemanların ısınmasını ve bazı durumlarda güç sisteminin kararlılığını etkilemektedir. Kompanzatörler ile güç üretimi ve tüketimindeki büyük ve hızlı reaktif güç değişimlerini kontrol etmek mümkündür. Son yıllarda güç dönüştürücüleri gibi doğrusal olmayan yüklerin kullanımı sonucu iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesi bozulmuş ve kompanzasyon ihtiyacı artmıştır. Böylece doğrusal olmayan yüklerin ürettiği akım harmoniklerinden kaynaklanan gerilim harmonikleri ve kompanzasyon talebi ciddi bir problem haline gelmiştir [6]. Elektrik güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonunda; senkron kompanzatörler, doymuş reaktörler, anahtarlamalı kondansatörler ve bobinler sistem gerilimini kontrol etmek için kullanılmaktadır.
Tüm bu sistemlerden sonra, sadece küçük kondansatörlü bir gerilim kaynaklı evirici tabanlı STATCOM reaktif güç kontrolü için geliştirilmiştir. Bunlar “Gelişmiş Statik VAr Kompanzatörler” (Advanced Static VAr Compensator) olarak bilinmektedir. Reaktif güç kompanzasyonu veya kontrolü, bir güç sisteminde güç iletim kayıplarını en aza indirmek, güç iletim kabiliyetini artırmak, güç sistemini kararlı hale getirmek ve kaynak geriliminin sürekliliğini sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Tek veya üç fazlı devrelerde reaktif güç, kararlı durumda sinüzoidal akım ve gerilim dalga şekilleri için ortalama değer kavramı kullanılarak tanımlanmaktadır. Üç fazlı devrelerde anlık güç, geçici rejim de

dâhil olmak üzere akım ve gerilim dalga şekilleri için anlık değer kavramına dayalı olarak belirlenmektedir [7].

2.1.1. Anlık güç

Alternatif akım devrelerinde güç;

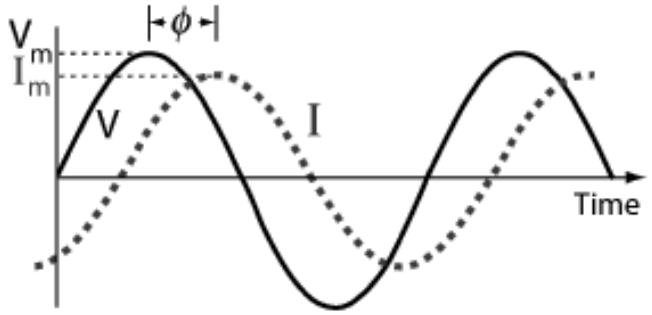
$$P = |V|.|I| \tag{2.1}$$

bağıntısıyla, istenilen ortalama güç ise;

$$P_{ort} = |V|.|I|.cos\alpha \tag{2.2}$$

bağıntısıyla verilir. Burada α gerilim ve akım arasındaki faz açısı, $cos\alpha$ ise güç faktörüdür. Ancak güç miktarı sürekli durumda anlık olarak değişiklik gösterir.

Anlık güç ise, (2.1)'de verilen bağıntıdan ve Şekil 2.1.'deki akım ve gerilim terimlerinin zamana bağlı olarak ifade edilmesiyle elde edilir.



Şekil 2.1. Akım ve Gerilimin Zamana Bağlı Değişimi

$$V = |V_m|.sin\omega t \tag{2.3}$$

$$I = |I_m|.sin(\omega t - Ø) \tag{2.4}$$

Burada herhangi bir t anındaki anlık güç ise;

$$P_{anlık} = |V_m|.|I_m|.sin\omega t.sin(\omega t - Ø) \tag{2.5}$$

$$sin(\omega t - \emptyset) = sin\omega t.cos\emptyset - cos\omega t.sin\emptyset \quad (2.6)$$

$$P_{anlık} = |V_m|.|I_m|.cos\emptyset.sin^2\omega t - V_m.I_m.sin\emptyset.sin\omega t.cos\omega t \quad (2.7)$$

Anlık ortalama güç denklemi ise (2.7)'deki denklemden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_{ort} = |V_m|.|I_m|.cos\emptyset.\frac{\int_0^T sin^2\omega t dt}{T} = \frac{V_m.I_m}{2}.cos\emptyset \quad (2.8)$$

(2.8)'de verilen denklemde ortalama akım ve ortalama gerilim ifadeleri yerine konduğunda;

$$V_{ort} = \frac{|V_m|}{\sqrt{2}} \quad \text{ve} \quad I_{ort} = \frac{|I_m|}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

$$P_{ort} = |V|.|I|.cos\emptyset \quad (2.10)$$

olarak bulunur [8].

Alternatif akım devrelerindeki güç, ani akım ve gerilim zamana bağlı olarak değiştiğinden, zamana bağlı olarak değişir. Değişim çok hızlı olduğundan oluşan ani güç yerine bir periyotluk zaman içindeki ortalama etki ile ilgilenmek daha anlamlıdır. Alternatif akım devrelerindeki güç, devredeki ortalama güç ölçülecek şekilde yapılmış ve kalibre edilmiş wattmetrelerle ölçülür.

Sinüs eğrisi biçimindeki bir gerilim, sabit değerlerde olan direnç, bobin ve sığanın veya bunların kombinasyonlarının uçlarına uygulandığında devreden geçen akım da sinüs fonksiyonudur. Akım, devre elemanlarının özelliklerine bağlı olarak, gerilimle aynı fazda olabilir veya gerilimle akım arasında bir faz farkı meydana gelir. Uygulanan gerilim,

$$v = |V_m|.sin\ \omega t \quad (2.11)$$

şeklinde ise ve akımla gerilim arasındaki faz farkı Ø ise akım şiddetinin ani değeri;

$$i = |I_m|.sin(\omega t \pm \emptyset) \quad (2.12)$$

olacağından devredeki ani güç;

$$P = i.v = |I_m|.|V_m|.sin\,\omega t.sin(\omega t \pm \emptyset) \quad (2.13)$$

şeklinde ifade edilebilecektir. Akım ile gerilimin çarpılması ile elde edilen eğrinin de sinüs eğrisi biçiminde olduğu gösterilebilir. Ayrıca gerilim ve akımın etkin değerleri kullanılarak ortalama gücün

$$P = i.v.cos\emptyset \quad (2.14)$$

olduğu da gösterilebilir. Buna göre tek fazlı alternatif akım devresindeki güç akım, gerilim ve güç faktörünün çarpımına eşittir. Bilindiği gibi (2.14) ifadesindeki $cos\emptyset$ terimine güç faktörü veya güç çarpanı denilmektedir [9].

2.1.1.1 Direnç üzerindeki güç

Sinüzoidal bir gerilim bir direncin uçlarına uygulandığında devreden geçen akım gerilimle aynı fazda olduğundan,

$$\emptyset = 0 \quad Cos\emptyset = 1 \quad (2.15)$$

dir. Dolayısıyla direnç üzerindeki ortalama güç;

$$P_R = |V|.|I|\ (volt.amper) \quad (2.16)$$

olacaktır. Görüldüğü gibi bu ifade doğru akım devrelerindeki güç ifadesinin aynıdır. Bu nedenle P_R için,

$$P_R = |V^2|/|R| = |I^2|.|R| \quad (2.17)$$

bağıntıları kolayca türetilebilir. Devre gerilimi,

$$v = |V_m|.sin\,\omega t \quad (2.18)$$

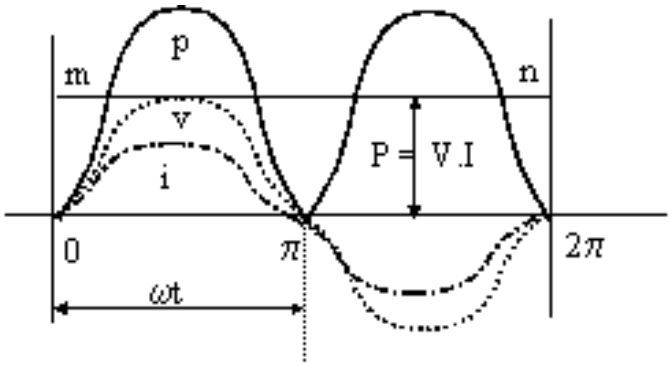
devre akımı,

$$i = (|V_m|/|R|).sin\,\omega t \quad (2.19)$$

şeklinde yazılabileceğinden, ani güç için;

$$p = |V^2{}_m|/|R|.sin^2\omega t \quad (2.20)$$

elde edilir. Şekil 2.2.'de v, i ve p'nin değişimleri gösterilmiştir. Görüleceği gibi güç eğrisinin tamamı pozitif değerler almaktadır. Gücün negatif değerleri yoktur.



Şekil 2.2. Bir direnç üzerinde oluşan güç

Bunun anlamı gücün tamamının direnç üzerinde ısı enerjisine dönüştüğüdür. Bu tür güce aktif güç denir ve watt ile ölçülür [9].

2.1.1.2 Bobin üzerindeki güç

Sargı telinin direnci ihmal edilebilen bir bobinin uçlarına sinüzoidal bir gerilim uygulandığında akımın gerilimden 90° geride kaldığını biliyoruz. Faz farkı 90° olduğundan güç faktörü sıfır olacaktır. Dolayısıyla $V.I.cos\emptyset$ ile tanımlanan aktif güç sıfır olur.

Gerilimin ani değeri

$$V = |V_m|.sin\ \omega t \tag{2.21}$$

akımın ani değeri,

$$i = -|I_m|.cos\ \omega t \tag{2.22}$$

şeklinde yazılabileceğinden, ani güç;

$$p = i.v = -|I_m|.|V_m|.sin\ \omega t.\cos\omega t \tag{2.23}$$

ile ifade edilir. Ancak,

$$sin\ \omega t.\cos\omega t = \left(\frac{1}{2}\right).sin2\omega t \tag{2.23}$$

$$V_m = |V_L|/\sqrt{2}\ ,\qquad I_m = -|I_L|/\sqrt{2} = -I/\sqrt{2} \tag{2.24}$$

olduğu hatırlanarak,

$$p = -|V_L|.|I|.sin2\omega t \tag{2.25}$$

elde edilir. Güç maksimum değerine $wt = 45°$ için ulaşır ve

$$P_m = V_L.I \tag{2.26}$$

bulunur.

Güç eğrisinin frekansı gerilim eğrisinin frekansının iki katı olduğundan, gerilimin bir periyodunda güç 2 defa pozitif, 2 defa negatif çevrime sahip olur. Pozitif çevrimler ile negatif çevrimlerin alanları eşit olduğundan ortalama güç sıfırdır. Bunun anlamı gücün periyodik olarak üreteç ile bobin arasında takas

edilmesidir. Güç, devrede tüketilmemektedir. Bu nedenle üretecin ortalama çıkış gücü sıfırdır. Bu tür devrelerdeki güce Reaktif güç denir (Voltamper reaktif) (VAr) ile ölçülür. Bir devredeki reaktif güç,

$$Q = |I|.|V|.sin\emptyset \quad (VAr) \tag{2.27}$$

ile hesaplanır [9].

2.1.1.3 Kondansatör üzerindeki güç

Bir kondansatörün uçlarına sinüzoidal gerilim uygulandığında akım, gerilimden 90° ilerde olacak şekilde devreden akım geçer. Dolayısıyla aktif güç, $cos\omega = 0$ olduğundan, sıfırdır.

$$v = |V_m|.sin\ \omega t \tag{2.28}$$

$$i = |I_m|.cos\ \omega t \tag{2.29}$$

olarak ifade edilirse; anlık güç,

$$p = |I_c|.|V_c|.sin\ 2\omega t \tag{2.30}$$

Reaktif güç ise,

$$Q = -|V_C|.|I_C|.sin\emptyset\ (VAr) \tag{2.31}$$

elde edilir. Bu güçte $\omega t = 45°$ için maksimum değere ulaşır. Gerilimin bir periyodu süresince güç üreteç ile kondansatör arasında periyodik olarak takas edildiğinden üretecin ortalama çıkış gücü sıfırdır ve güç reaktif karakterlidir [9].

2.1.1.4 Görünür, aktif ve reaktif güç arasındaki ilişkiler

Bir alternatif akım devresindeki görünür güç;

$$S = |I|.|V| \tag{2.32}$$

ile tanımlanır ve Voltamper (VA) ile birimlendirilir. Aktif güç ise,

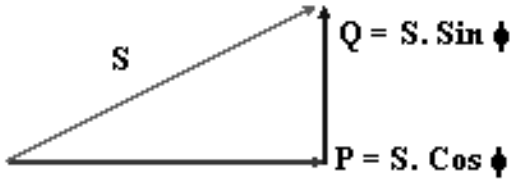
$$P = |I|.|V|.cos\emptyset \tag{2.33}$$

bağıntısı ile hesaplanır ve Watt (W) ile ölçülür. Reaktif güç ise,

$$Q = |I|.|V|.sin\emptyset \tag{2.34}$$

ile ifade edilir ve Voltamper reaktif (VAr) ile birimlendirilir.

Yukarıdaki bağıntılardan görüleceği gibi P ve Q, S'nin dik koordinatlardaki bileşenleridir.



Şekil 2.3. Görünür, aktif ve reaktif güçlerin tanımı ve aralarındaki ilişki

Buna göre,

$$S = (P^2 + Q^2)^{1/2} \tag{2.35}$$

$$Cosf = P/S \tag{2.36}$$

yazılabilir. (2.35)'deki P ve Q yerine (2.33) ve (2.34)'teki değerler yazılırsa,

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{V^2.I^2.sin^2\emptyset + V^2.I^2.cos^2\emptyset} \\ S &= \sqrt{V^2.I^2(sin^2\emptyset + cos^2\emptyset)} \\ S &= |I|.|V| \end{aligned} \tag{2.37}$$

sonucu elde edilir [9].

- Üç fazlı devrede tanımlanan anlık imajiner gücün fiziksel anlamının, her fazdaki anlık reaktif güçten oldukça farklı olduğuna dikkat edilmelidir.
- Üç fazlı sinüzoidal bir devrede anlık gerçek güç ve anlık imajiner gücün her ikisinin sabit olduğu açıktır. Anlık gerçek güç, alışılmış reaktif gücün her faz için üç katına tesadüf eder. Buna ek olarak anlık imajiner güç, her fazdaki reaktif gücün sayısal olarak üç katına eşittir.
- Anlık imajiner güç; ortalama değer kavramına dayalı alışılmış reaktif güçten tanım ve fiziksel anlam olarak oldukça farklıdır [8].

Tablo 2.1 Elektriksel birimler

Akım	Amper
Gerilim	Volt
Görünen (Sanal) Güç	VA
Aktif Güç	Watt
Reaktif Güç	VAr
Φ	Fi açısı
CosΦ	Aktif Güç Çarpanı
SinΦ	Reaktif Güç Çarpanı

Tablo 2.2 Güç dönüşümleri

0.001	1	1000	1000000
mW	W	kW	MW
mVAr	VAr	kVAr	MVAr
mVA	VA	kVA	MVA

2.1.2. Reaktif güç üreten araçlar

Tüketicilerin reaktif güç ihtiyaçlarını karşılamak için, dinamik faz kaydırıcılar, aşırı ikaz edilmiş senkron makineler (Senkron kompanzatörler) ve statik faz kaydırıcılardan yararlanılır:

Kondansatörlerin kayıpları çok düşük olup, nominal güçlerinin % 0.5'inin altındadır. Bakım masrafları ihmale gelebilecek kadar azdır. Tüketicilerin hemen

yanına ve istenilen büyüklükte tesis edilebilme kolaylıkları da vardır. Bu nedenle tercih edilirler.

Kompanzasyon tesislerinde 2 tip kondansatör kullanılır.

2.1.2.1. Yağlı tip kondansatör

Belli periyotlarda bakım gerektirirler (suyunun değişmesi vb.).

2.1.2.2. Kuru tip kondansatör

Bakım gerektirmezler. En kötü yanı harmoniklerinin fazla olmasıdır.

2.1.3. Transformatörlerin kompanzasyonu

Alternatif akım makinelerinin en önemlilerinden biri olan ve en çok kullanılan transformatörler bağlı oldukları üst gerilim şebekesinden endüktif reaktif güç çekerler. Bunlar bireysel olarak kompanze edilirler. Kondansatörler ya üst gerilim yâda alt gerilim tarafına bağlanabilirlerse de, hem pratik hem de ekonomik sebeplerle alçak gerilim tarafına bağlanmaları tercih edilir.

Transformatörün yükü daima değişebildiğinden, kompanzasyon için gerekli kondansatör gücü, en büyük reaktif güç ihtiyacına göre seçilmez. Aksi halde düşük yüklü saatlerde aşırı kompanzasyon baş gösterebilir ve transformatörün sekonder uçlarında gerilim yükselebilir. Ayrıca şebeke geriliminde harmoniklerin mevcut olması halinde, kondansatör şebekeden aşırı akım çekerek transformatörü aşırı yükleyebilir [6].

Transformatörlerin kompanzasyonunda kullanılacak kondansatörün, transformatörün boşta çektiği reaktif gücü karşılayacak mertebede olması gereklidir. Açıklanan sebeplerden dolayı transformatörün yüküne bağlı olmadan, nominal gücün % 5-% 10 değerinde sabit bir kondansatör bağlanmasını tavsiye ederler.

Tablo 2.3 Çeşitli güç ve gerilimlerdeki transformatörlerin kompanzasyonu için gerekli kondansatör güçleri

Yüksek Gerilimli Trafo			
Normal	6 kV'a kadar	6 ila 15 kV	15 kV'un üzeri
Trafo Gücü (kVA)	Kondansatör Gücü (kVAr)	Kondansatör Gücü (kVAr)	Kondansatör Gücü (kVAr)
10	1.5	1.5	2
25	2.5	2.5	3.5
50	5	6	8
63	6	8	10
100	8	10	12
125	10	10	12
160	10	12	15
200	12	15	20
250	15	20	25
315	20	20	25
400	20	25	30
500	25	30	35
630	30	35	40
1000	40	45	50
2000	60	65	80

2.2. FACTS Sistemleri (Flexible AC Transmissions Systems)

Günümüzde güç elektroniği elemanları, anahtarlama hızlarının yüksek olması nedeniyle kompanzasyon uygulamalarında tercih edilmektedirler. Güç sistemlerinde kompanzasyonunun yarı iletken anahtarlar ile yapılması durumunda, gerilim çökmelerinin önlenebileceği ve geçici ve dinamik kararlığı iyileştirebileceği görülmüştür. Yarı iletken tabanlı dönüştürücüler kullanılarak seri ve şönt reaktif kompanzatörler tasarlanabilir. Kompanzasyon için kullanılan bu tip aygıtlara FACTS aygıtları denir. Burada esneklik, çalışma noktasında veya kontrol girişinde meydana gelen herhangi bir değişime, sistemin hızlı bir şeklide cevap verme yeteneği olarak anlaşılır.

FACTS aygıtları, iletim hatlarının kompanzasyonunda kondansatör veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan, dönüştürücü devreleri kullanılarak güç sistemi ile reaktif güç alışverişi yapabilmektedirler. Son yıllarda tristör denetimli güç kompanzasyon düzenleri gerek endüstriyel sistemlerin güç katsayılarını dinamik olarak düzenlemede gerekse de terminal geriliminin kararlığını sağlamada yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [10].

Uygulamalarda karşılaşılan kompanzasyon problemlerinden biri reaktif güç salınımı hızlı bir biçimde dalgalanan büyük endüstriyel yükleri karşılamaya yönelik yük kompanzasyonudur. Yük kompanzasyonu amacıyla alışılagelmiş yöntemler yerine modern kompanzasyon yöntemlerinin kullanımı en uygun çözüm olmaktadır. Modern kompanzasyon yöntemlerini oluşturan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemlerinin diğer bir ifadeyle FACTS (Flexible AC Transmissions Systems) cihazlarının çok kısa zamanda tepki gösterme yeteneği, her fazın ayrı ayrı denetlenebilirliği özelliği ve dolayısıyla dengesiz yükleri kompanze etme yeteneği göz önüne alındığında yukarıdaki ayırım anlaşılır olmaktadır [10].

FACTS kavramının arkasındaki temel düşünce mekanik kontrolörlerin yerini daha güvenli ve daha hızlı olan güç elektroniği elemanlarının alması ve böylece var olan güç sistemi kapasitesinin kullanımını optimize etmek ve denetlenebilirliği artırmaktır. FACTS'in açılımındaki "esnek" ifadesi bu kontrolörlerin kontrol edilebilir olduğu gerçeğinden ileri gelmektedir.

FACTS kontrolörü güç elektroniği tabanlı bir uygulama olduğu için, geleneksel mekanik kontrolörlere göre daha hızlıdır. Bu kontrolörler uygun bir

şekilde ayarlandığı zaman, iletim sistemlerinin kararlı çalışma sınırlarını arttırır. FACTS kontrolörlerinin iki temel amacı vardır. Bunlardan birincisi, iletim sistemlerinin güç transfer kapasitesini arttırmak, ikincisi ise tanımlanan iletim rotaları üzerinde güç akışını kontrol etmektir [5].

En genel tanımıyla FACTS'ler; şebekenin yüksek gerilim kısmı ile güç elektroniği elemanlarını ve metotlarını birleştiren elektronik kontrolör yapılarıdır. FACTS teknolojisinin enerji sistemindeki uygulamalarında gerekli standartlaşmanın oluşması için ve FACTS cihazlarının dizaynında, işletmesinde ve projelendirilmesinde dikkat edilecek hususların belirlenmesi için 1980'lerde Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Instute) ve CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) olmak üzere birçok kuruluş çalışmalar yapmaktadır [10].

2.2.1. FACTS teknolojisinin avantajları

- Çok güvenli sistemler sunar,
- Sistemin arıza bakım ve onarımı kolaydır,
- Daha verimli enerji iletimi sağlar,
- Mevcut sisteme uyumlu olarak çalışabilir,
- FACTS uygulamaları şu an kullanılan iletim hatları üzerinde de kullanılabilir,
- Çok hızlı kontrol sağlar.

2.2.2. FACTS teknolojisinin dezavantajları

- Kullanılan elemanlar pahalı ve malzeme ihtiyacı ülkemiz için ancak ithalatla sağlanabilir.
- Sistemlerin kuruluşu, dizaynı, bakım ve onarımını yapacak yetişmiş eleman sayısı çok sınırlıdır.
- Yarı iletken elemanların bir sonucu olarak kontrol sistemlerinde kayıplar oluşur. Bu kayıplar elemanların ısınmasına neden olur.

- FACTS sistemlerin temelini oluşturan yarı iletken elemanların kontrolü için tetikleme (anahtarlama) işaretine ihtiyaç vardır. Bu anahtarlama FACTS uygulamalarında gerekli elektronik devreler ile sağlanmalıdır.
- FACTS teknolojisi yüksek gerilimlerde kullanıldığından elemanların izolasyonu ve yarı iletken şalterlerin özelliğinden hat ve yük tam olarak birbirinden izole edilemez. Bu da FACTS uygulamalarında bir problem olarak karşımıza çıkacaktır [11].

2.2.3. Enerji iletim sistemleri için başlıca FACTS cihazları

- SVC (Statik VAr Kompanzatör)
- STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)
- TCSC (Tristör Kontrollü Seri Kapasitör)
- SSSC (Statik Senkron Seri Kompanzatör)
- TSC (Tristör Anahtarlamalı Kapasitör)
- TCR (Tristör Kontrollü Reaktör)
- TSR (Tristör Anahtarlamalı Reaktör)
- TCPAR (Tristör Kontrollü Faz Açı Regülatörü)
- UPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü) şeklinde sıralanabilir.

2.2.4. FACTS cihazları

2.2.4.1. Statik VAr kompanzatör (SVC)

Elektriksel güç sisteminin (hat gerilimi gibi) parametrelerini kontrol edecek şekilde ayarlanabilir kapasitif veya endüktif akım çıkışlı paralel bağlı statik VAr generatörü veya çekicisidir.

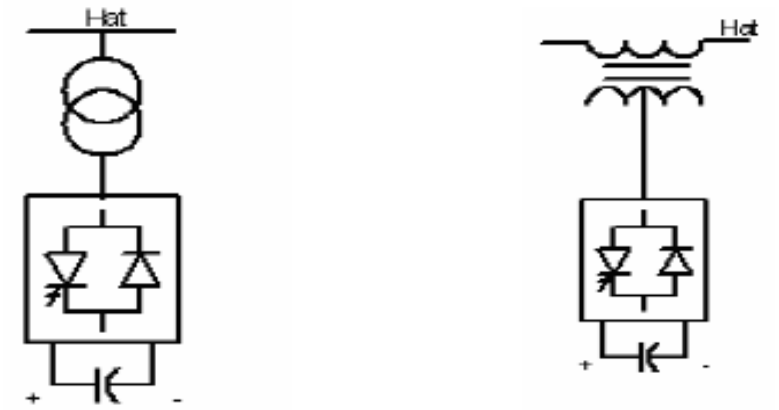
2.2.4.2. Statik senkron kompanzatör (STATCOM)

AC sistem gerilimini bağımsız olarak kontrol edebilen kapasitif veya endüktif akım çıkışlı paralel bağlı statik VAr kompanzatörü gibi çalışan statik senkron generatördür. STATCOM gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı konvertör

üzerine temellendirilmiştir. Çıkış gerilimi ile sistem gerilimi arasındaki faz farkına göre sistemden aktif güç çekilmekte veya sisteme aktif güç aktarılmaktadır. İçerdiği inverter anahtarları için yüksek güç ve akım kapasitesine sahip GTO (Kapıdan Kapanabilir Anahtar) anahtarlar kullanılmaktadır [12],[13],[14]. STATCOM paralel kompanzatörüne ait eşdeğer devre Şekil 2.4.a'da gösterilmiştir [15].

2.2.4.3. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC)

Harici bir elektrik enerjisi olmadan çalışan bir statik senkron generatördür. Hattın baştan başa reaktif gerilimini alçaltma ve arttırma amacıyla iletilen elektrik gücü kontrol edilebilir. STATCOM ünitesinin transformatör ile iletim hattına seri olarak bağlanmasıyla ortaya çıkmıştır. Bu sistem ile aktif güç kontrolü de yapılmaktadır [12],[13],[14]. SSSC paralel kompanzatörüne ait eşdeğer devre Şekil 2.4.b'de gösterilmiştir.

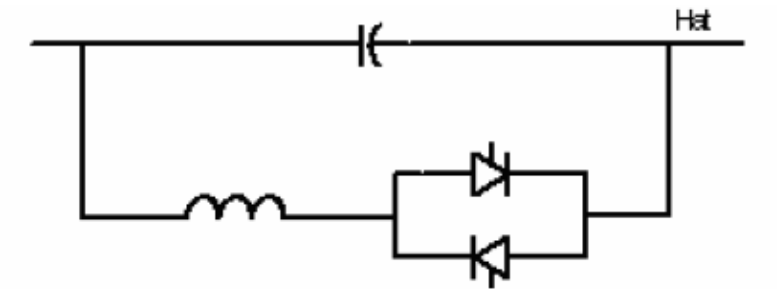


Şekil 2.4. a- STATCOM Devre Şeması b- SSSC Devre Şeması

2.2.4.4. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC)

Etkili güç ve kararlılık kontrolü için empedans veya faz açısı kontrolü gerekmektedir. Hattın seri empedansı endüktiftir. Bu empedans değerinin % 5-% 10'u rezistif etkinin sonucudur. TCSC kullanarak hattın doğal empedans değeri arttırılabilir. Güç sistemlerinin sabit empedans değerinin kontrolü için eklenen sistemler baskın osilasyon frekansı söndürmede sinyal modülasyonuna hızlı cevap vermelidir. Aksi takdirde arıza sırasında veya arızadan sonra kabul edilemez dinamik koşullara veya kararsızlığa sebep olur. TCSC hattın kapasitif

empedansını değiştirerek hattın güç taşıma kapasitesini kontrol edebilmektedir. TCSC seri kompanzatörüne ait eşdeğer devre Şekil 2.5.'te gösterilmiştir [16].

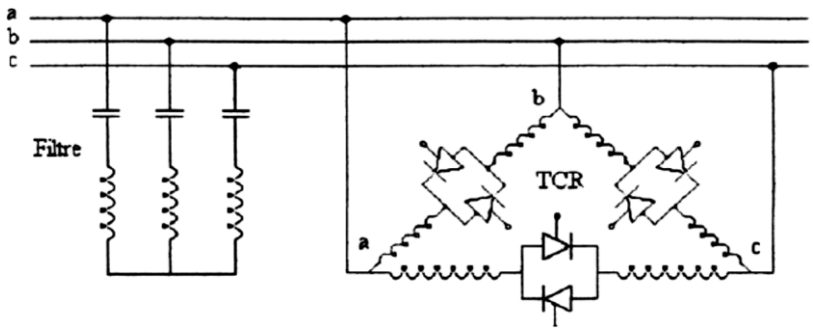


Şekil 2.5. TCSC Devre Şeması

2.2.4.5. Tristör kontrollü reaktör (TCR)

Tristör valfinin parçalı iletim kontrolü ile; etkin reaktansı sürekli değiştirilen paralel bağlı tristör kontrollü bir endüktördür. Tek başına kullanılmasına rağmen, daha çok Tristör Anahtarlamalı Kapasitör ile birlikte hızlı sonuç verir. TCR üç fazlı sistemlerde üçgen bağlanır. Reaktör devresine uygulanan gerilimin efektif değeri ve buna bağlı olarak reaktör akımı ihtiyaca göre sürekli olarak ayarlanabilir. Bundan dolayı bu sistem daha hassastır [17].

Bu sistem reaktif güç üretimi kademesiz ve hassas olarak yapılmaktadır. Tristörle kumanda edilen reaktörde tristör, sadece geçici olayların baş göstermediği gerilim değerinde, yani gerilimin tepe değerinde bulunduğu anda iletime geçmeyip her hangi bir anda da devreye alınabilir. Her ne kadar reaktif gücün ölçülmesi için en az yarım periyotluk bir süreye ihtiyaç varsa da ölçü o şekilde yapılabilir ki, ölçü değerleri sürekli olarak ve istendiği kadar kısa zaman aralıkları ile de alınabilir [17]. Şekil 2.6.'da üçgen bağlı bir TCR ile harmonikler için filtreler gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Üçgen Bağlı TCR ve Filtreler

2.2.4.6. Tristör anahtarlamalı reaktör (TSR)

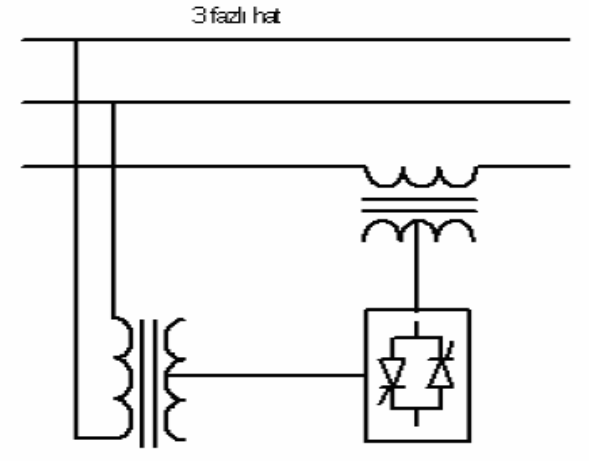
Tristör valfinin tam veya sıfır iletim kontrolü ile etkin reaktansı adımlı olarak değiştirilen paralel bağlı tristör anahtarlamalı bir endüktördür [17].

2.2.4.7. Tristör anahtarlamalı kapasitör (TSC)

Tristör valfinin tam veya sıfır iletim kontrolü ile etkin reaktansı adımlı olarak değiştirilen paralel bağlı tristör anahtarlamalı bir kapasitördür. TSC; alternatif akım kıyıcı ile buna seri bağlı bir kapasitörden meydana gelmektedir. Birden fazla TSC yapısı (güçleri birbirlerine yaklaşık eşit seçilerek) aynı yük barasına paralel olarak bağlanırlar. Reaktif güç talebi artıkça tristörler tetiklenerek ihtiyaç duyulan sayıda TSC devreye alınır.

2.2.4.8. Tristör kontrollü faz açı regülâtörü (TCPAR)

Tristör Kontrollü Faz Açı Regülâtörü hızlı değişen faz açısı sağlar. Faz kaydırması iletim hattının faz gerilimine dikey olarak gerilim bileşenleri eklenmesi veya çıkarılmasıyla yapılır. Gerilimin dik bileşeni diğer iki faz arasında bağlanan transformatörlerden sağlanır. TCPAR seri/paralel kompanzatörüne ait eşdeğer devre Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.

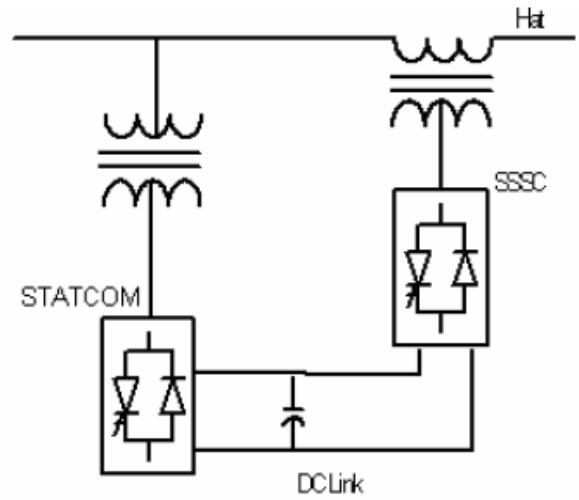


Şekil 2.7. TCPAR Devre Şeması

2.2.4.9. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC)

SSSC ve STATCOM'un birleşimi ile oluşur. SSSC'nin seri çıkış terminalleri ile STATCOM'un paralel çıkış terminalleri arasında çift yönlü reel güç akışını sağlayacak şekilde ortak bir DC link vasıtasıyla kuplajlanması sonucu elde edilir.

Harici bir elektrik enerjisine ihtiyaç duymadan eşzamanlı seri reel ve reaktif güç kompanzasyonu yapar. İletim hattının gerilimi, empedansı ve açısı yada alternatif olarak hattaki reel ve reaktif güç akışını eşzamanlı veya seçmeli olarak kontrol edebilecek seri gerilim üretimi UPFC ile sağlanabilir. UPFC bağımsız kontrol edilebilen paralel reaktif güç kontrolü sağlayabilir. UPFC kompanzatörüne ait eşdeğer devre Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. UPFC Devre Şeması

2.2.5. FACTS yapılarının sisteme etkileri

- Şebekedeki güç akışları denetlenebilmekte
- Hatların güç taşıyabilme kapasiteleri arttırılabilmekte
- Şebekedeki senkronaltı rezonans, gerilim kararsızlığı, güç osilasyonları ve geçici kararlılık gibi sorunlara çözüm bulunabilmektedir.
- Şebekede meydana gelebilecek hızlı olaylara çok kısa süreler içinde müdahale edilebilmektedir. FACTS kontrolörleri güç elektroniğine dayalı yapılar olup çalışmaları genel olarak yarıiletken anahtarların açma ve kapamalarına dayanır.

FACTS'lar iletim şebekelerinin kullanım kapasitesini arttıracak güç elektroniği temelli kontrolör yapılarıdır. Bu kontrolörler çok hızlı çalıştığı gibi iletim sisteminin sorunsuz çalıştığı güvenlik sınırlarını genişletir. FACTS'ların gelişimini yarı iletken tetikleme elemanları sağlamıştır. FACTS kullanımı sistemlerin kontrol edilebilirliğini arttırmakta, FACTS cihazları ile kompanzasyon tekniği yük gerilimini kararlı hale getirmekte, sistem için en az kayıpla daha verimli çalışma koşulları sağlanmaktadır [18].

2.3. STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör)

Son yıllarda, elektrik güç kalitesine olan ilgi bu alanda yapılan yasal düzenlemelerden dolayı artmıştır. Gerilim regülâsyonu elektrik dağıtım sistemlerinde sistem kalitesini önemli ölçüde etkileyen güç kalitesi problemlerinden biridir. Bilindiği gibi bir elektrik güç sisteminde gerilimin genliği, güç sistemine reaktif güç vererek veya güç sisteminden reaktif güç çekerek kontrol edilebilir. Senkron generatörler, mekaniksel anahtarlamalı kondansatör endüktans ve doyumlu reaktörler, sistem gerilimini bu yöntemle kontrol etmek için uzun süreden beri iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanılmaktadırlar [19]. Ancak bu geleneksel kondansatör ve reaktör grupları ile yapılan kompanzasyonun sistemde meydana gelen değişimlere yeterince hızlı cevap verememesi gibi büyük bir dezavantajı vardır. Zaman içerisinde yarıiletken anahtar teknolojisindeki gelişmeler ve güç kalitesine olan ilgi, gerilim dalga şeklinin kalitesini geliştirmek için şebekeye bağlanan birçok donanımın geliştirilmesine neden olmuştur. Bu donanımlar; modern güç elektroniğine dayandırılan Esnek Alternatif Akım iletim Sistemleri (FACTS) olarak bilinir [20].

FACTS aygıtları ise inverter tabanlı aygıtlardır. Bunların en çok kullanılanları STATCOM, statik senkron seri kompanzatör dur. STATCOM hem dağıtım hem de iletim sistemlerinde kullanılan inverter tabanlı bir FACTS aygıtıdır. Şebekeye paralel bağlanmaktadır. STATCOM sistemleri, ± Q MVAr aralığında, şebeke frekansında (50Hz) sürekli, hem endüktif hem kapasitif reaktif güç üretebilmektedir. Bu açıdan rakip sistemlere üstünlük sağlamaktadır. STATCOM sisteminin bir diğer üstünlüğü ise geniş bir çıkış gerilimi aralığı için maksimum reaktif güç üretiminin neredeyse sabit kalmasıdır. Bu açılardan STATCOM sistemi, dağıtım ve iletim sistemlerinin güç kalitesi problemlerinin çözümünde doğrudan kullanılabilecek geleceğin teknolojisi olarak gözükmektedir [21].

2.3.1. T-Statcom

STATCOM iletim sistemlerinde gerilim regülâsyonu ve sistem kararlılığını geliştirmek için kullanılır ve “Transmission-STATCOM (TSTATCOM)” olarak adlandırılır.

2.3.2. D-Statcom

D-STATCOM Dağıtım sistemlerinde ise gerilim regülâsyonu, güç faktörü düzeltme, yük dengeleme ve yükün harmonik kompanzasyonu için kullanılır ve Distribution-STATCOM olarak adlandırılır.

Yük barasına bağlanan bir D-STATCOM, hem sistemin daha güvenli çalışmasına hem de daha kaliteli bir gerilimin tüketici tarafından kullanılmasına yardımcı olur.

Her iki STATCOM'un devre yapısı aynı olup, bir inverter, DC-hat kondansatörü, filtre, bağlantı transformatörü ve bir kontrol devresinden oluşmaktadır [22].

STATCOM (Statik Senkron Kompanzatör) güç elektroniği temelli bir esnek alternatif akım iletim sistemi yapısıdır. STATCOM bağlı olduğu şebekede meydana gelen değişimlere hızlı tepki verebilme yeteneği ile dinamik kararlılığa önemli derecede katkıda bulunabilmektedir. Bu yetenek STATCOM yapısında kullanılan denetim devresi ile ilgilidir.

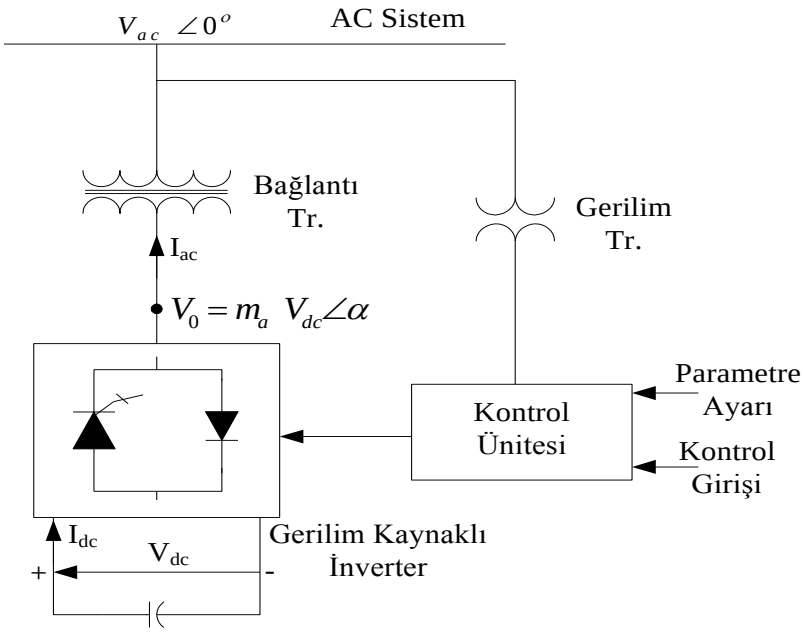
Gelişmiş Statik VAr Kompanzatör (ASVC) olarak bilinen STATCOM, güç sisteminden reaktif akım çekecek şekilde kontrol edilen ve bir DC enerji depolama elemanı ile üç fazlı sistem arasına bir inverter bağlanarak yapılan FACTS kontrolörüdür. STATCOM iletim hattına şönt bağlanmaktadır.

STATCOM iletim hattından kontrollü bir reaktif akım çekerek bağlantı noktasında iletim hattının gerilimini düzenlemektir. Bu işlem STATCOM'un esas fonksiyonudur [23]. Bu FACTS kontrolörü sürekli rejim durumunda, dönen bir senkron kompanzatörün çalışma karakteristiklerini gösterdiği için STATCOM ismi verilmiştir.

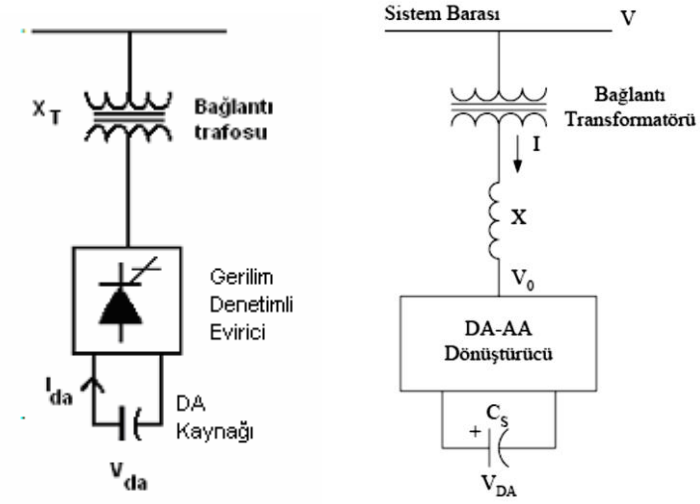
Şekil 2.9.'da görüldüğü gibi en basit halde, bir STATCOM kontrolörü; bir bağlantı transformatörü, gerilim kaynaklı inverter ve dc enerji depolama elemanından oluşmaktadır. Enerji depolama elemanı oldukça küçük bir kondansatör olduğundan STATCOM iletim sistemi ile sadece reaktif güç alış verişi yapabilir. Eğer dc kondansatör yerine bir akümülatör veya diğer bir DC gerilim kaynağı kullanılırsa, kontrolör çalışma bölgesini genişleterek iletim sistemi ile aktif ve reaktif güç alışverişi yapabilir. STATCOM'un çıkış geriliminin genliği ve faz açısı değiştirilebilir. Bunun için STATCOM devresindeki inverterin

AC çıkış geriliminin genlik ve frekansının ayarlanması gerekir. Bu ise inverter kısmında yapılır.

STATCOM ifadesi başka bir deyişle şarj edilmiş bir sığaç, bir doğru gerilim kaynağı olarak kullanılarak bir evirici ve bağlantı trafosu ile AC sistemine bağlanabilmektedir. Evirici çıkışındaki gerilim, hattaki gerilimden küçük veya büyük tutularak AC sisteminden çekilen veya AC sistemine verilen tepkin güç denetlenebilmektedir. İşte bu yapı (STATCOM) statik senkron kompanzatör olarak bilinmektedir. Şekil 2.10.'da STATCOM'un genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.9. STATCOM Devre Şeması



Şekil 2.10. STATCOM'un Genel Yapısı

Bir STATCOM aslında ideal bir eşzaman makineye yakındır. Öyle ki iki cihaz da temel frekansta dengeli 3 fazlı sinüzoidal gerilim üretirler. Bu gerilimin genliği ve faz açısı her ikisinde de denetlenebilir. Ancak STATCOM eylemsizlik momentine sahip değildir. Dolayısıyla çok hızlı bir şekilde denetlenebilmektedir. Her ikisi endüktif veya kapasitif tepkin güç üretebilirler. STATCOM denetimli tepkin bir güç kaynağıdır [24].

İnverter temelli FACTS cihazlarından STATCOM, Tristör tetiklemeli Statik VAr kompanzatör limitlerini aşmak amacıyla dizayn edilmiş olup reaktif güç kompanzasyonu ile bağlı bulunduğu sistem geriliminin belirli sınırlarda kontrolüne imkân sağlamaktadır. Bağlı bulunduğu AC sistem gerilimi ile inverter çıkış geriliminin büyüklüğü STATCOM reaktif gücünü tayin etmektedir [25].

Reaktif güç, STATCOM çıkış geriliminin değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Eğer STATCOM çıkış gerilimi AC sistem geriliminden büyük ise reaktif akım STATCOM'dan AC sisteme doğru akmakta ve AC sisteme reaktif güç aktarılmaktadır. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° ilerde olup aktarılan güç kapasitiftir. Eğer STATCOM çıkış gerilimi sistem geriliminden küçük ise reaktif akım AC sistemden STATCOM'a doğru akmakta ve sistemden reaktif güç çekilmektedir. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° geride olup sistemden endüktif güç çekilmektedir. STATCOM çıkış geriliminin AC sistem gerilimine eşit olması durumunda reaktif akım ve reaktif güç sıfır olmaktadır.

Kapasitör, inverter için gerekli DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. İnverter çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Transformatör rezistansının ihmal edilmesi durumunda AC sistemden STATCOM'a akan aktif güç;

$$P = 3.\frac{V_{ac}.V_{inv}}{X}.sin\alpha \qquad (2.22)$$

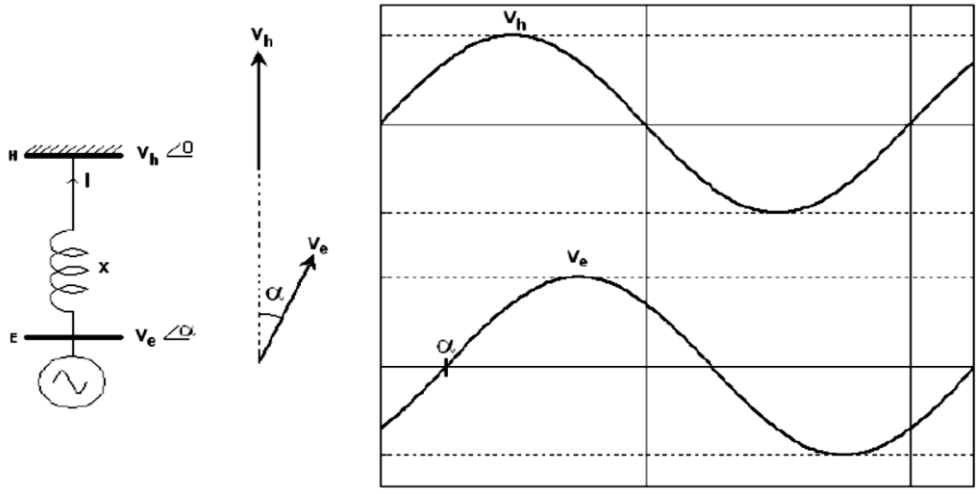
olarak ifade edilir [26]. Burada V_{ac} AC sistem geriliminin, V_{inv} ise inverter çıkış geriliminin etkin değerleri, X trafoların eşdeğer reaktansı ve α gerilimler arası faz farkıdır. Bu durumda $\alpha > 0$ ise inverter çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazdadır. Çekilen aktif güç $P > 0$ olduğunda kapasitör şarj olur. Açının

negatif olması durumunda çekilen aktif güç $P < 0$ olmakta ve kapasitör deşarj olmaktadır. Sürekli durumda inverter çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç trafo ve inverter kayıplarını karşılamaktadır.

2.3.3. Statcom kontrol tekniği

İnverter temelli FACTS cihazlarından STATCOM, Tristör tetiklemeli Statik VAr kompanzatör limitlerini aşmak amacıyla dizayn edilmiş olup reaktif güç kompanzasyonu ile bağlı bulunduğu sistem geriliminin belirli sınırlarda kontrolüne imkân sağlamaktadır. Bağlı bulunduğu AC sistem gerilimi ile inverter çıkış geriliminin büyüklüğü STATCOM reaktif gücünü tayin etmektedir [25].

STATCOM genel yapı bakımından bir reaktans ve bu reaktansın gerisinde yer alan bir gerilim kaynağı ile temsil edilebilir. STATCOM' un genel çalışma ilkesi Şekil 2.11.'deki eşdeğer devreden yararlanılarak elde edilen çıkış barası güç bağıntıları ile anlaşılabilir.



Şekil 2.11. STATCOM'un Genel Eşdeğer Devre Yapısı, Gerilim Fazörleri ve Gerilim Dalga Biçimleri

Bara sabit genlik ve faz açılı (V_h genlikli ve 0 derece faz açılı) sonsuz güçlü bir şebekeye bağlantı barası olarak kabul edilebilir. Evirici çıkışındaki gerilimin genliği V_e, faz açısı α ve ara bağlantı reaktansı X olmak üzere baradan STATCOM'un verdiği güçler aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$Q = \frac{V_h.(V_e.cos\alpha - V_h)}{X} \quad (2.23)$$

$$P_s = \frac{V_h.V_e}{X}.sin\alpha \quad (2.24)$$

İdeal durumda toplam kayıpların sıfır olduğu düşünülürse $P_s = 0$ olmalıdır. Bu da ancak $\alpha = 0$ olması durumunda gerçekleşir. O halde ideal durum için tepkin güç akısı 3 farklı durumda gerçekleşebilir.

1. durum: $V_e > V_h$ durumunda

$$Q = \frac{V_h.(V_e - V_h)}{X} > 0 \quad (2.25)$$

olacaktır. Yani baradan dışarıya bir tepkin güç verilir. STATCOM bağlı olduğu şebekede kapasitif bir yük gibi davranacaktır.

2.durum: $V_e = V_h$ durumunda

$$Q = \frac{V_h.(V_e - V_h)}{X} = 0 \quad (2.26)$$

olacaktır. Yani barada herhangi bir tepkin güç alışverişi olmayacaktır.

3.durum: $V_e < V_h$ durumunda

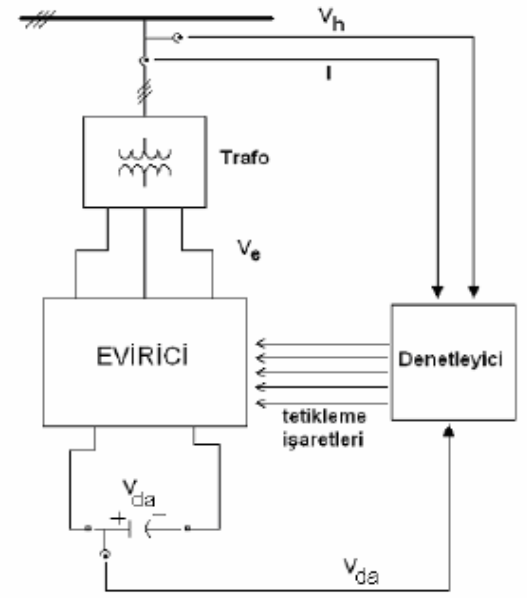
$$Q = \frac{V_h.(V_e - V_h)}{X} < 0 \quad (2.27)$$

olacaktır. Yani baradan eviriciye doğru bir tepkin güç çekilir. STATCOM bağlı olduğu şebekede endüktif bir yük gibi davranacaktır. Sığaç uç geriliminin sürekliliğinin sağlanması için trafo, evirici ve sığaç etkin güç kayıplarının baradan karşılanması zorunludur. Bu yüzden α açısı gerçek uygulamalarda 0.1°-2° arasında tutularak gerilimin devamlılığı sağlanır.

STATCOM'un baradan verdiği ya da çektiği tepkin gücün Q denetimi evirici çıkışındaki V_e geriliminin genliğinin değiştirilmesi ile mümkündür. O halde

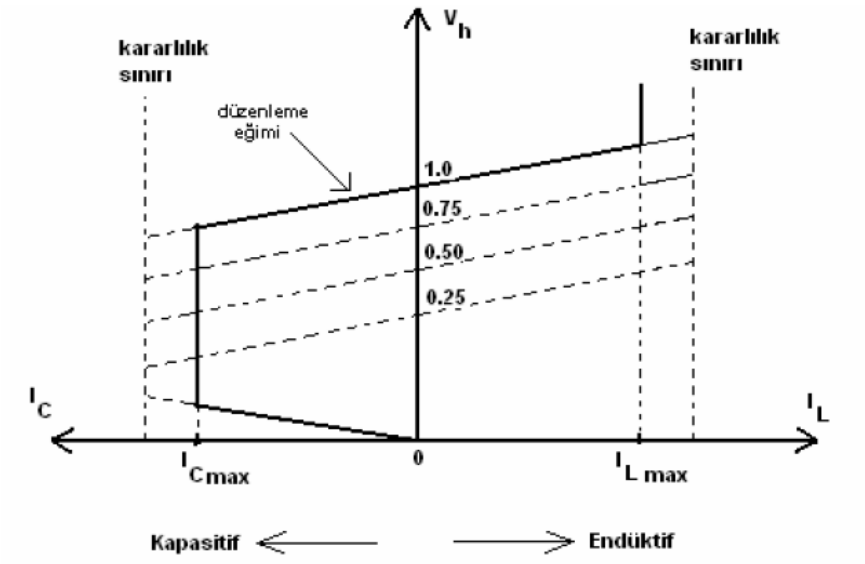
evirici girişindeki doğru gerilim ile çıkışındaki alternatif gerilim arasındaki doğrusal orantıdan dolayı tepkin gücün denetimi sığaç doğru gerilimi değiştirilerek yapılır. Bu amaçla sığacın amaca uygun olarak şarjı veya deşarjı yapılarak tepkin güç denetimi yapılabilir. Bu şekilde yapılan tepkin güç denetimi dolaylı denetim adını alır. α açısı toplam kayıpların üstünde bir etkin gücün çekilmesini sağlayacak kadar büyük tutulursa sığaç şarj olacak ve evirici çıkışı gerilimi olan V_e gerilimi büyüyecektir.

Bu da STATCOM'un baradan verdiği tepkin gücünün artmasını sağlayacaktır. Denetim işlemi Şekil 2.12.'de gösterildiği gibi evirici çıkışındaki akım ve gerilim işaretleri işlenerek uygun tetikleme işaretlerinin üretilmesi ile sağlanır. Doğrudan denetim yönteminde evirici girişindeki sığacın gerilimi de denetim işaretlerinin üretilmesinde kullanılır [27].



Şekil 2.12. STATCOM ve Genel Denetim Yapısı

STATCOM denetiminde kullanılan ana düşünce uç geriliminin değişimine bağlı olarak üretilen veya tüketilen tepkin gücün değiştirilmesi fikridir. Uç gerilimi referans değerinin ne kadar üzerinde olursa STATCOM'un bağlı olduğu şebekeden o oranda tepkin güç çekmesi ve ne kadar altında olursa STATCOM'un bağlı olduğu şebekeye o oranda tepkin güç vermesi sağlanır. Bu durum STATCOM'un Şekil 2.13.'teki akım-gerilim karakteristiğinde açıkça görülmektedir.



Şekil 2.13. STATCOM'un Akım-Gerilim Karakteristiği

2.3.4. Statcom kontrol parametrelerinin hesaplanması

STATCOM'da güç ve kontrol hesaplamaları için kullanılan parametreler 3 aşamada hesaplanmaktadır.

2.3.4.1. Statcom reaktif güç hesabı

STATCOM'dan sisteme aktarılan veya sistemden çekilen reaktif güç aşağıdaki formüle göre hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{V_s.V_{inv}.cos\alpha - {V_s}^2}{X} \qquad (2.28)$$

burada;

Q = STATCOM Reaktif Gücü

V_s = Şebeke gerilimi

V_{inv} = İnverter çıkış gerilimi

X = Hattın Reaktansı (STATCOM eş değer devresinde hat reaktansı yaklaşık olarak 0,8-1,0 arasında değer alır.)

α = Gerilimler arası faz farkı (Kapasitör uç geriliminin sürekliliğinin sağlanması için trafo, evirici ve kapasitör etkin güç kayıplarının karşılanması

zorunludur. Bu yüzden α açısı gerçek uygulamalarda 0.1°-2° arasında tutularak gerilimin devamlılığı sağlanır.)

2.3.4.2. Statcom da DC gerilim, modülasyon indeksi (m_a) ve efektif hat gerilimi hesabı

STATCOM'da güç hesaplamaları için V_{dc} gerilim sabit kabul edilerek m_a modülasyon indeksinin değiştirilmesiyle inverterin AC çıkış geriliminin genliği hesaplanır.

Sistemin m_a modülasyon indeksi değişimi, STATCOM için çalışma durumlarına göre 3 şekilde belirlenir.

Modülasyon indeksi hesaplamalarda $0 < m_a < 1$ aralığında ve aritmetik artış oranında,

$$m_{aind} < m_{astndby} < m_{acap} \tag{2.29}$$

orantısında seçilmektedir.

$$m_{astndby} = \frac{m_{acap}+m_{aind}}{2} \tag{2.30}$$

aritmetik ortalama oranından $m_{astndby}$ değerine uygun olarak m_{acap} ve m_{aind} değerleri hesaplanmaktadır.

Modülasyon indeksi standby durumunda genelde 0,75 civarında alınmaktadır.

Örnek olarak;

$m_{astndby} = 0.74$ alınırsa

$m_{aind} < m_{astndby} < m_{acap} = 0.66 < 0.74 < 0.82$ olarak seçilebilir.

STATCOM'da m_a modülasyon indeksine uygun olarak V_{dc} gerilimi;

$$V_{dc} = \frac{V_{ef}}{m_a}.2 \tag{2.31}$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada V_{ef} gerilimi ise,

$$V_h = \frac{V_s}{\sqrt{3}} \qquad V_{ef} = V_h.\sqrt{2} \tag{2.32}$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

Sistemdeki parametreler ise;

V_s = Şebeke gerilimi
V_{dc} = DC hat şebeke gerilimi
V_{ef} = Efektif hat gerilimi
m_a = Modülasyon indeksi
V_h = Hat gerilimi

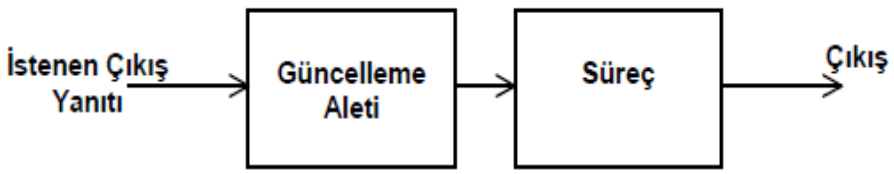
şeklindedir.

2.4. Kontrol Sistemleri

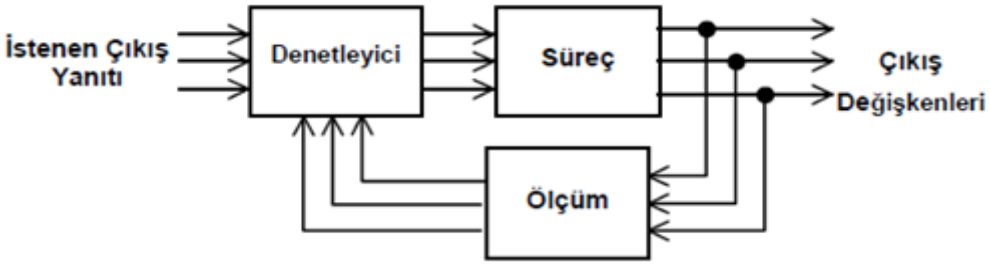
Otomatik kontrol; kontrol işlemlerinin, kontrol edilmek istenen olay etrafında kurulmuş bir karar mekanizması tarafından, doğrudan insan girişimi olmaksızın gerçekleştirilebilmesidir. Daha açık bir şekilde, bir büyüklük ya da koşulun gerçek değerini ölçüp, istenen değerle karşılaştırarak ortaya çıkan farkı azaltacak yönde bir işaret üreterek, istenen değerde insan aracılığı olmaksızın tutulmasıdır [28]. Bir kontrol sisteminin üç temel öğesi vardır. Bu üç öğenin birbirleriyle ilişkisi Şekil 2.14.'te gösterilmiştir. Amaç x girişleri ya da sürücü, işaretler ile belirlenir, sonuçlar ise y çıkışları ya da kontrol edilen değişkenleri etkiler. Genel olarak kontrol sisteminin amacı, kontrol sisteminin elemanları aracılığı ile girişleri kullanarak, çıkışları önceden belirlenmiş bir şekilde kontrol etmektir [29]. Çıkışın ya da kontrol edilen büyüklüğün denetim altında tutulması bakımından kontrol sistemleri, açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol sistemleri olarak ikiye ayrılır. Şekil 2.15.'te görüldüğü gibi açık çevrim kontrol sistemlerinde kontrol işareti, çıkıştan yani kontrol edilen büyüklükten bağımsızdır. Şekil 2.16.'da verilen kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise kontrol işareti, çıkış işaretiyle ya da çıkışla orantılı bir işaretle referans işaret arasındaki farka ya da bunların toplamına bağlı olan kontrol sistemidir. Bu tip sistemler geri beslemeli kontrol sistemleri olarak da adlandırılır. Şekil 2.17.'de temel öğeleri içeren bir kapalı çevrim süreç denetim sisteminin öbek gösterimi verilmiştir [28].



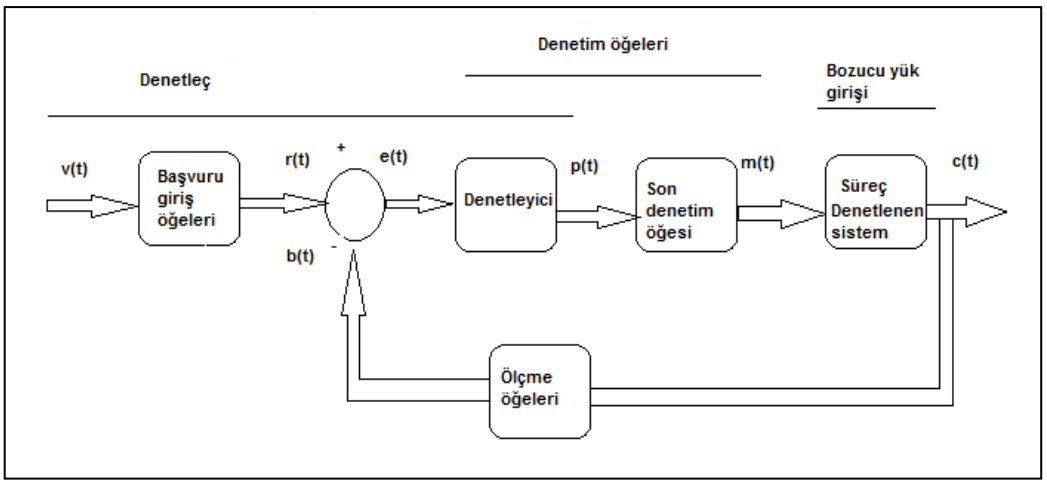
Şekil 2.14. Bir Otomatik Kontrol Sisteminin Blok Diyagramı



Şekil 2.15. Açık Çevrim Kontrol Sisteminin Blok Diyagramı



Şekil 2.16. Çok Değişkenli Kapalı Çevrim Kontrol Sisteminin Blok Diyagramı



Şekil 2.17. Temel Öğeleriyle Süreç Denetim Sisteminin Gösterimi

Şekil 2.17.'de verilen sistem parametrelerini incelediğimizde;

$v(t)$ (Ayar noktası–set point): Denetlenen değişkenin istenen değerini ayarlayan giriş değişkeni.

$r(t)$ (Başvuru girişi–reference input): Ayar noktası ile bağlantılı, sistemi denetleyebilmek için karşılaştırma işareti olarak kullanılan değer.

$b(t)$ (Ölçülen başvuru girişi–reference input): Denetlenen değişkenin işlevi olan ve başvuru girişi ile karşılaştırılan işaret.

$e(t)$ (Hata–error): Başvuru girişi ile ölçülen değişken arasındaki fark.

$p(t)$ (Denetleç çıkışı–controller output): Son denetim öğesini sürmekte kullanılan işaret.

$m(t)$ (İşlemlenen değişken–manipulated variable): Doğrudan denetlenen değişkenin değerini değiştirmek üzere hata işaretinin işlevi olarak değişen nicelik ya da koşul.

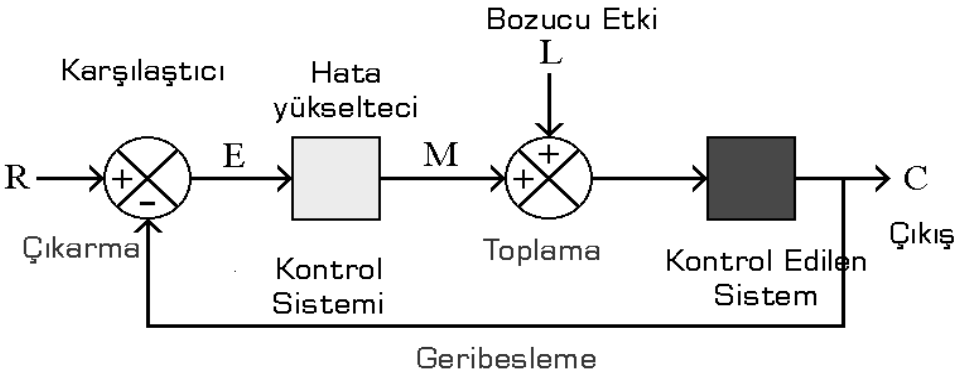
$u(t)$ (Bozucu etken–disturbance): Denetlenen değişkenin değerini değiştirmeye eğilimli ve sisteme birçok noktadan etki edebilen işaret.

$c(t)$ (Denetlenen değişken–control variable): Denetlenen sistemin doğrudan ölçülen ve denetlenen büyüklüğü şeklindedir.

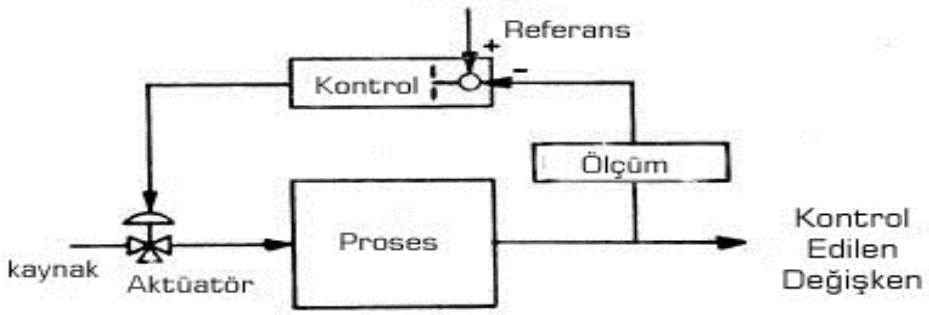
Otomatik bir denetleyici, denetlenen değişkenin gerçek değerini istenen değerle karşılaştırarak sapmayı belirler ve en küçük olası sapmayı elde etmek için gereken karşı hareketleri üretir. Otomatik denetleyicinin bu karşı hareketi üretmesinde kullanılan yönteme denetim kipi denir. Kullanılacak denetim kipinin seçimi, kontrol edilecek sistemin yapısına ve sistemdeki etkenlere bağlı olarak yapılır [28]. Otomatik kontrol, bir sistem değişkeninin referans adı verilen, istenilen belirli bir değerde bulunmasını sağlamaktır. Günümüzde kontrol sistemleri denilince akla gelen genellikle geri beslemeli kontrol sistemleridir. (Feedback Control Systems). Geri besleme, kontrol edilen değişkenin ölçülerek ve bu bilginin yardımıyla değerinin değiştirilerek kontrol edilmesidir [30].

2.4.1. Geri besleme çevrimi

Şekil 2.18.'de genel olarak verilen geri beslemeli bir kontrol sisteminin, geri besleme kontrol çevrimi Şekil 2.19.'da göstermektedir.



Şekil 2.18. Geri Beslemeli Bir Sistemin Genel Gösterimi



Şekil 2.19. Geri Besleme Kontrol Çevrimi

Şekil 2.19.'da verilen sistemdeki parametreleri incelediğimizde;

2.4.1.1. Ölçüm

Çevrim tarafından kontrol edilen değişkenin gösterilebilmesi için ölçüm yapılmalıdır.

2.4.1.2. Aktüatör

Bütün sistemlerde enerji veya madde sağlayan ve ölçüm sinyalini değiştiren bir aktüatör bulunmalıdır. Genellikle bu bir tür valftir ama bir motor hızı,ısıtıcı vs. olabilir.

2.4.1.3. Proses

Kontrol fonksiyonu gerçekleştirilirken, otomatik kontrolör çıkış sinyalini oluşturmak için referans değeri ile ölçüm değerini kullanır. Bu sinyallerin kesinliği ve hızlılığı kontrolörün ölçümü düzgün kontrol edebilmesi üzerindeki temel limitlerdir. Eğer ölçüm elemanı kesin bir sinyal yollayamıyorsa veya ölçümde bir gecikme varsa kontrolörün proses üzerindeki etkisinde düşme olacaktır. Bunun yanında kontrolörün referans değeri de kesin bir şekilde belirtilmelidir. Referans değeri kontrolörün kendisi tarafından üretilir. Bu referans değerindeki kalibrasyon hataları, ölçüm değerinin kontrolör tarafından yanlış değere getirilmesine sebep olacaktır

2.4.1.4. Otomatik kontrolör

Çevrimin son elemanı otomatik kontrolördür ve görevi ölçümü kontrol etmektir. Kontrol ölçümü belirli limitler içinde tutmak demektir. Bütün otomatik kontrol elemanları İç mekanizmalarına göre az değişiklik gösteren belirli genel sistem cevaplarını kullanırlar. Geri beslemeli otomatik kontrolün temelini oluşturan kavramlardan birisi, kontrol çevriminin kapalı olmasıdır. Bu bilginin çevrim içinde devamlı olarak dolaşması anlamına gelmektedir. Kontrolör sistemi kontrol etmeli, sistem ölçüme etki etmeli ve ölçüm sinyali de kontrolöre iletilmelidir. Eğer yol herhangi bir noktada kesilirse, çevrim açık hale gelir. Çevrim açık hale geldiğinde otomatik kontrolör manuel duruma geçer ve artık sistemi kontrol edemez hale gelir. Dolayısıyla kontrolörlerden gelen ölçüm sinyalleri sisteme etki etmez ve otomatik kontrolün varlığı ortadan kalkmış olur [30].

2.4.2. Kontrol sistemlerinde kullanılan denetleyiciler

Kontrol sistemlerinden en bilinenleri olan BMD (Bulanık Mantık Denetleyici), YSA (Yapay Sinir Ağları) ve PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolörleri incelersek;

2.4.2.1. Bulanık mantık denetleyici ile kontrol

İlk bulanık mantık denetim küçük bir buhar makinesinin kontrolü olarak Mamdani ve Assilian tarafından gerçekleştirilmiştir. Bulanık Mantık denetim algoritması, sezgisel denetim kurallar kümesinden oluşmaktadır ve dilsel terimleri ifade etmek için bulanık kümeler ve kuralları değerlendirmek için bulanık mantık kullanılmaktadır. BMD sistem temel yapısı dört ana parçadan oluşur: bulanıklaştırma birimi, bilgi tabanı, karar üretme mantığı ve durulaştırma birimi [31]. Bulanık mantık denetim sistemi Şekil 2.20.'de gösterilmiştir.



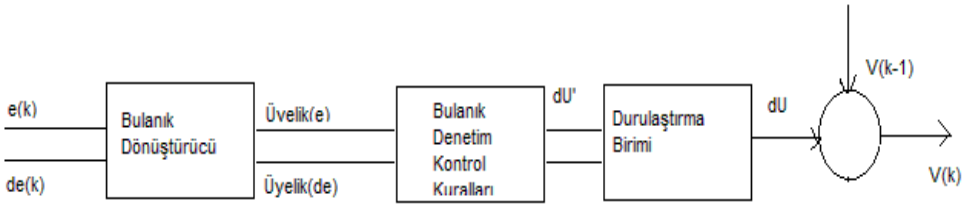
Şekil 2.20. Bulanık Mantık Denetleyici Sistemi

Bulanıklaştırma operatörü, veriyi belirli grup içinde bir değere ve bu değer dışındaki bütün noktalarda sıfır olan üyelik fonksiyonu haline getirir. Bilgi tabanı, denetlenecek sistemle ilgili bilgilerin toplandığı bir veri tablosundan ibarettir [32]. Karar üretme mantığı, önceden bilinen sistemin denetime verdiği cevap kararını oluşturan referans bilgidir. Durulaştırma birimi ise çıkışın değişken değerlerini evrensel küme düzeyine getirmek için ölçeklendirme yapıldığı yerdir. Sistemin çalışması esnasında meydana gelen hata $e(k)$ ve hatadaki değişme $de(k)$ sistemin kesin girişlerini oluşturur.

$$e(k) = r(k) - y(k) \tag{2.33}$$

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \tag{2.34}$$

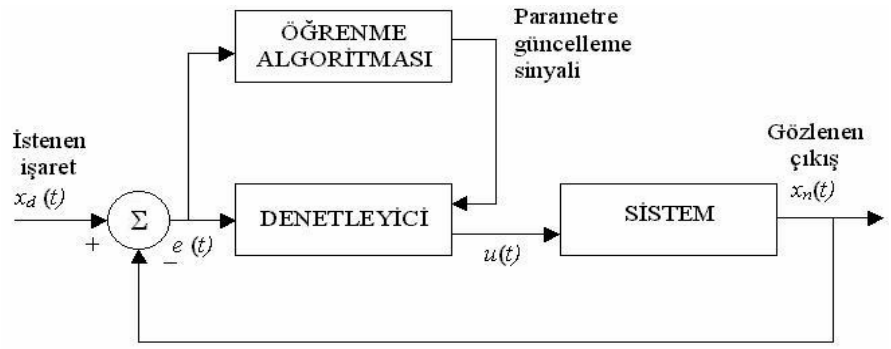
Referans girişi $r(k)$, gerçek sistem çıkışı $y(k)$ ve k örnekleme adımı olarak ifade edilebilir. BMD'ye uygulanan kesin giriş ve alınan kesin çıkış arasında gerçekleştirilen işlem basamakları Şekil 2.21.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Bulanık Mantık Denetleyici Blok Diyagramı

2.4.2.2. Yapay sinir ağları ile kontrol

Sistem denetiminde Şekil 2.22.'de gösterilen yapı kullanılmaktadır. Sistem çıkışları ile istenen işaret arasındaki fark denetleyiciye uygulanır, denetleyicinin ürettiği çıkış ise sistemi izlenen işarete doğru zorlayacak şekilde hesaplanır. Bu döngü içerisinde, sistem çıkışının istenen işarete doğru zorlanması ise denetleyici parametrelerinin hata bilgisinin kullanımı ile güncellenmesi yoluyla gerçekleşir. Tanılama ve denetim problemlerinin ilk aşaması, öğrenme şeklinin eş zamanlı ya da zamandan bağımsız olması durumlarında birine karar verilmesidir. Sistemin hangi girişlere cevaben hangi çıkışları ürettiğine dair herhangi bir bilgi yoksa ve uygulamam gerçek zamanda tanılamayı gerektiriyorsa her bir gözlem anında tanılayıcı ağ yapısı, gözlemlenen bir adet giriş/çıkış çifti için anlık hatanın minimizasyonuna dayalı çalışacaktır. Bu ise eş zamanlı öğrenme yaklaşımına denk düşmektedir [33,34].



Şekil 2.22. Yapay Sinir Ağları ile Oluşturulan Bir Denetleyici ve Denetim Sistemi

YSA'lar, uygulanan ağ modeline göre değişik karakteristik özellikler göstermelerine karşın temel birkaç ortak özelliğe sahiptirler. Birinci özellik; YSA'larda sistemin paralelliği ve toplamsal işlevin yapısal olarak dağılmışlığıdır [35]. YSA'lar birçok nörondan meydana gelir ve bu nöronlar eş zamanlı olarak çalışarak karmaşık işlevleri yerine getirir. Diğer bir değişle karmaşık işlevler birçok nöronun eş zamanlı çalışması ile meydana getirilir. Süreç içerisinde bu nöronlardan her hangi biri işlevini yitirse dahi sistem güven sınırları içerisinde çalışmasına devam edebilir. İkinci özellik ise genelleme yeteneği, diğer bir ifadeyle ağ yapısının, eğitim esnasında kullanılan nümerik bilgilerden

eşleştirmeyi betimleyen kaba özellikleri çıkarması ve böylelikle eğitim sırasında kullanılmayan girdiler için de, anlamlı yanıtlar üretebilmesidir [36].

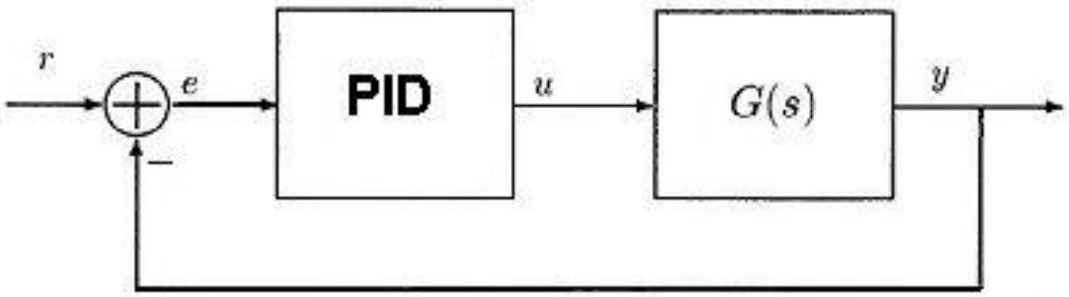
2.4.2.3. PID ile kontrol

PID kontrol ediciler geri beslemeli kontrol edicilerde en çok kullanılan algoritmalardır. Günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemdir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bir PID Kontrol edicinin tasarımında amaç K_p, K_d, K_i (Oransal-Integral-Türevsel Kontrol) kazanç katsayılarının hesaplanması ve sistemde istenilen genel tepki elde edilinceye kadar ayarlama yapılmasıdır. PID denetleyici bölüm 3'te detaylı olarak incelenmiştir

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. PID (Proportional-Integral-Derivative; Oransal-Integral-Türevsel) Kontrolörler

PID kontrol ediciler geri beslemeli kontrol edicilerde en çok kullanılan algoritmalardır. Günümüzde çok kullanılan bir kontrol yöntemdir ve geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bir PID Kontrol edicinin transfer fonksiyonu Şekil 3.1.'deki formdadır.



Şekil 3.1. PID Kontrol Transfer Fonksiyonu

Burada PID kontrolörün transfer fonksiyonu;

$$G_c(\mathrm{s}) = \frac{\mathrm{U(s)}}{\mathrm{E(s)}} = K_p + \frac{K_i}{\mathrm{s}} + \mathrm{K}_d s \qquad (3.1)$$

K_p = Oransal kazanç

K_i = İntegral kazancı

K_d = Türev kazancı

$\mathrm{U(s)}$ = Kontrol edicinin çıkışı,

$\mathrm{E(s)}$ = Hata sinyalidir.

bu eşitlik aynı zamanda;

$$\frac{\mathrm{U(s)}}{\mathrm{E(s)}} = K_c.[1 + \mathrm{sT}_d + \frac{T_i}{\mathrm{s}}] \qquad (3.2)$$

şeklinde de ifade edilebilir.

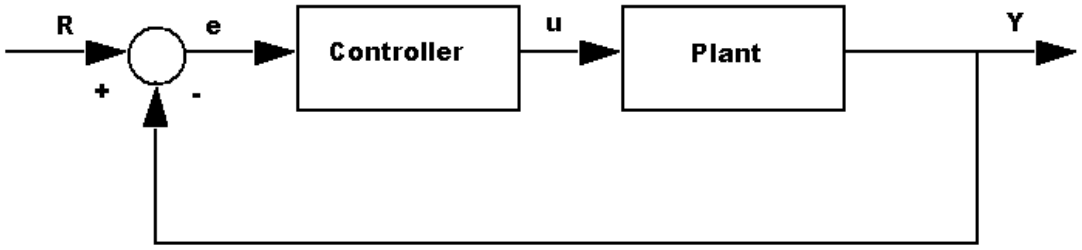
Burada

$\mathrm{T}_i = \mathrm{K}_i/\mathrm{K}_c$ (İntegral zaman sabiti)

$\mathrm{T}_d = \mathrm{K}_d/\mathrm{K}_c$ (Türev zaman sabiti)

olarak isimlendirilirler.

PID kontrol edici tasarımının temel hedefi K_p, K_d, K_i veya K_c, T_i, T_d katsayılarının bulunması ve verilen kapalı döngü sistemin performans koşullarını sağlayacak şekilde ayarlanmasıdır. Denklemlerle oluşturulan K_p, K_d, K_i parametreleri sistem cevabına yakın olsa da sistemin yinede hesaplamalardan sonra manüel olarak ayarlanması gerekir [37].



Şekil 3.2. PID Kontrol Edici Genel Gösterimi

- Plant: Kontrol edilecek sistem,
- Controller: Plant için uyarı sağlayarak, sistemin davranışını etkileyen denetleyicidir.

Şemada PID denetleyicinin nasıl çalıştığını incelediğimizde;

Değişken (e), izleme hatası olup, istenilen giriş değeri (R) ile gerçek çıkış değeri (Y) arasındaki farkı gösterir. (e) hata sinyali PID denetleyiciye gönderilir ve denetleyici bu hata sinyalinin hem türevini hem de integralini hesaplar.

Denetleyiciden geçen (u) sinyali; oransal kazanç (K_p) ile hata değeri, integral kazancı (K_i) ile hatanın integrali, türevsel kazanç (K_d) ile hatanın türevi çarpımlarının toplamına eşittir.

(u) sinyali denetlenen sisteme gönderilir ve yeni çıkış (y) elde edilmiş olur. (y) çıkış sinyali algılayıcıya geri gönderilerek yeni hata sinyali (e) bulunur.

Denetleyici yeni hata sinyaline aynı işlemleri uygular ve bu işlem böyle devam eder [38,39,40].

3.1.1. PID denetleyicilerin karakteristikleri

3.1.1.1. Oransal denetleyici (K_p)

Oransal kontrolör adından da anlaşıldığı gibi girişindeki işareti, referans ile sistem çıkışı arasındaki $(e = y_r - y_c)$ hatayı belli bir oranda kuvvetlendirerek sisteme girişini sağlayan bir kontrol tekniğidir.

Kontrolör çıkışı; $(u(t) = K_p.e(t)$'dir. Yükselme zamanını azaltmada etkisi vardır ve azaltır, ama asla tamamen yok etmez. (Kararlı hal hatası).

3.1.1.2. Integral denetleyici (K_i)

İntegral kontrolün amacı, sürekli durumda sistemin çıkış işaretiyle referans işareti arasındaki hatayı minimuma indirmek veya ortadan kaldırmaktır. Karalı hal hatasının azaltılmasında etkisi vardır.

3.1.1.3. Türevsel denetleyici (K_d)

Türevsel kontrolörün amacı sistemdeki yüksek kazancı düşürmektir. Sistemin kararlılığının artmasında etkisi vardır, aşmayı azaltır ve geçici tepkiyi düzeltir.

3.1.2. PID denetleyici katsayılarının sisteme etkisi

Kapalı döngülü bir sistemde, her bir denetleyicinin etkisi K_p, K_d ve K_i Tablo 3.1'de özet olarak gösterilmiştir.

Bu düzeltmeler tam olarak geçerli değildir. ÇünküK_p, K_d ve K_i birbirlerine bağımlıdırlar. Yani değişkenlerden birinin değişimi diğer ikisinin etkisini değiştirebilir. Bu yüzden Tablo 3.1'deki K_p, K_d ve K_i değerlerinin belirlenmesinde sadece bir referanstır.

Tablo 3.1 Denetleyici katsayılarının sisteme etkisi

Denetleyici	Yükselme zamanı	Sistem ani tepkisi	Oturma zamanı	Kararlı durum hatası
K_p	Azalır	Artar	Ufak Değişim Gösterir	Azalır
K_i	Azalır	Artar	Artar	Yok eder
K_d	Ufak Değişim Gösterir	Azalır	Azalır	Ufak Değişim Gösterir

3.1.3. PID kontrol edici tasarımında izlenecek temel basamaklar

- Sistemin açık döngü transfer fonksiyonu elde edilir.
- Sisteme yükselme zamanını iyileştirmek için oransal denetleyici eklenir.
- Sistemde ani tepkinin iyileştirilmesi için türevsel denetleyici eklenir.
- Sistemde kararlı durum hatasını azaltmak için integral denetleyici eklenir.
- K_p, K_d, K_i katsayıları sistem istenilen genel tepkiyi verene kadar ayarlanır.

Sistemin istenilen tepkiyi sağlaması için her üç denetleyiciyi de aynı anda kullanma zorunluluğu yoktur.

Eğer PI denetleyici sistem için istenilen tepkiyi veriyorsa türevsel denetleyiciyi kullanma zorunluluğumuz yoktur.

3.1.4. Ziegler-Nichols (Z-N) tasarım metodu

PID kontrol edicilerin parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan en yaygın metotlardan birisidir.

PID kontrol edicinin parametreleri Z-N metoduna göre Tablo 3.2'deki gibi seçilir.

Tablo 3.2 Z-N medoduna göre PID parametlerinin seçimi

Kontrol edici	Parametreler		
	K_c	T_i	T_d
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$(1/1.2)\ T_u$	-
PID	$0.6K_u$	$0.5\ T_u$	$(1/8)\ T_u$

Bu metot da kontrol edici kazancı (K_c), bastırılmış salınım (K_u) kazancında sağlanana kadar arttırılır. Salınımın periyodu ise (T_u)'dur [41].

Ziegler Nicholes metoduna göre Şekil 3.1.'deki PID denklemin transfer fonksiyonu;

$$G(s) = K_p.\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p.T_d s = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.3)$$

şeklindedir.

$$\frac{K_i}{s} = \frac{K_p}{T_i s} \quad (3.4)$$

$$K_d s = K_p.T_d s \quad (3.5)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (3.6)$$

$$K_d = K_p.T_d \quad (3.7)$$

$$K_p = 0.6K_c \quad (3.8)$$

$$T_i = 0.5T_c \quad (3.9)$$

$$T_d = 0.12T_c \quad (3.10)$$

$$T_c = \frac{2.\pi}{\omega_c} \quad (3.11)$$

olup, K_c kritik değeri karakteristik denklemden hesaplanmaktadır.

3.2. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Dönüştürücüler bir tarafında bulunan doğru gerilimden uygun anahtarlama dizisi ile faz açısı, genliği ve frekansı kontrol edilebilir alternatif bir gerilim üretirler. Aynı devre hem evirici hem de doğrultucu olarak çalışabildiği için bu devreye dönüştürücü adı verilir. Alternatif gerilim ve frekans uygulamaya bağlı olarak değişken veya sabit olabilir. FACTS uygulamalarında yüksek gerilim ve güç harmonikleri birçok sorun yaratabileceği için çıkış gerilim dalgasının frekansı, dönüştürücün bağlı bulunduğu güç sisteminin frekansına eşit olacak şekilde kontrol edilir. Dönüştürücü için doğru gerilim sabit veya değişken olabilir. Bu doğru gerilim şebekeden, doğrultucu yardımı ile dönel bir alternatif akım makinasından, batarya, yakıt hücresi veya güneş kollektörlerinden sağlanabilir. Dönüştürücülerde genellikle transistor, tristör, MOSFET, IGBT ve GTO gibi yarı iletken anahtarlar kullanılır. Bu elemanlardan transistor ve MOSFET düşük ve orta güç uygulamalarında, tristör ve GTO ise yüksek güç uygulamalarında kullanılır.

Uygulamaya göre dönüştürücün çıkışı tek veya çok fazlı olabilir. Kendinden komutasyonlu dönüştürücüler,

a) Doğru akım tarafında doğru bir gerilim kaynağı bulunan gerilim beslemeli dönüştürücüler (GBD),

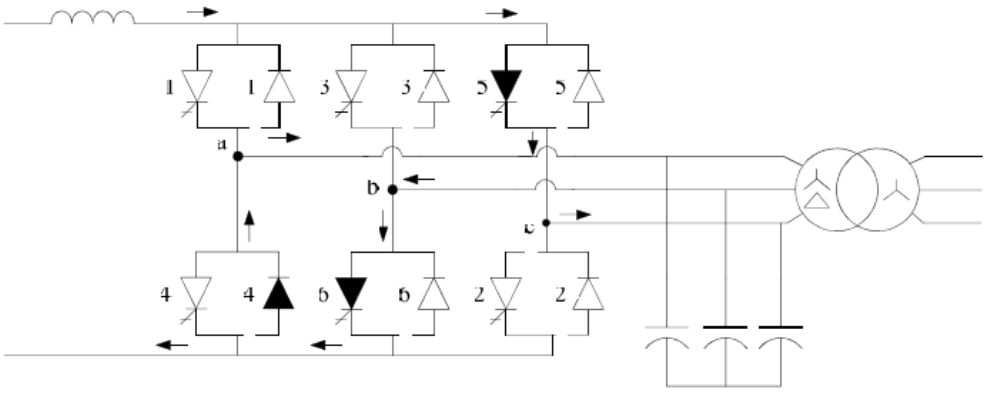
b) Doğru akım tarafında doğru bir akım kaynağı bulunan akım beslemeli dönüştürücüler (ABD),

olarak ikiye ayrılabilir [42].

3.2.1. Akım Beslemeli Dönüştürücüler

Değişken bir gerilim kaynağı büyük değerli bir endüktansı seri bağlayarak ve bir geri besleme akım kontrol döngüsünün içerisinde gerilimi kontrol ederek değişken bir doğru akım kaynağı elde edilebilir. Değişken doğru gerilim bir diyot doğrultucu yardımı ile bir generatörden, DA-DA bir dönüştürücü yardımı ile bir güç kaynağından elde edilebilir. ABD'lerde kaynak olarak akım kaynağı kullanılır ve ABD çıkışında akım üretir. Bu tip dönüştürücülerde akım daima bir yönde aktığı için gücün ters dönüşü doğru geriliminin polaritesinin yönünün değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Bunu başarmak için çift yönlü gerilim tutma

kapasitesine sahip yarı iletken anahtarlara ihtiyaç duyulur. ABD'lerde kullanılan yarı iletken anahtarları gerilimin ters dönmesine dayanmalıdır ve bu yüzden güç MOSFET'leri, BJT, IGBT, MCT, IGCT ve GTO gibi asimetrik gerilim tutan yarı iletken anahtarlar kullanılamayabilir. Bu yarı iletken anahtarların yerine simetrik gerilim tutan GTO'lar ve tristörler kullanılmalıdır. Ayrıca ileri yönde gerilim tutabilen yarı iletken anahtarları seri diyotlar ile kullanılabilir. Üç fazlı bir ABD devresi Şekil 3.3.'de gösterilmiştir [42].



Şekil 3.3. Üç fazlı bir ABD

ABD'lerin genel uygulama alanları,

- Büyük güçlü asenkron ve senkron motorların hız kontrolü,
- Yüksek frekanslı indüksiyon ısıtması,
- Doğru akım motor sürücüleri,
- Aktif harmonik filtreleri (AHF),
- Süper iletkenli mıknatıs enerji depolaması,
- Rotoru sargılı senkron motorun değişken frekansta başlatılması gibi uygulamaları kapsar [43].

3.2.2. Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

ABD'lerde kaynak olarak akım kaynağı kullanılır ve çıkışında akım üretir. Gerilim beslemeli dönüştürücülerde (GBD) ise kaynak olarak gerilim kaynağı kullanılır ve çıkışında gerilim üretilir. GBD'lerde doğru gerilim daima bir polariteye sahiptir ve gücün ters dönüşü doğru akımının ters dönüşü ile sağlanır

ve bu nedenle GBD'de tek yönlü gerilim tutma kapasiteli yarı iletken anahtarlar kullanılır. Bu yüzden GBD'ler, performansları ve ekonomik nedenlerden dolayı FACTS uygulamalarında ABD'lerde göre daha çok tercih edilirler ve uygulama alanının % 90'ında GBD'ler kullanılır [44].
GBD'lerin çok geniş bir uygulama alanı vardır [43]. GBD'ler;

- Alternatif akım motor sürücüleri,
- Kesintisiz alternatif akım güç kaynakları,
- İndüksiyonla ısıtma,
- Statik VAr generatörler (SVG) ve statik VAr kompanzatörler (SVC),
- Aktif harmonik filtreler (AHF) şeklinde sıralanabilir.

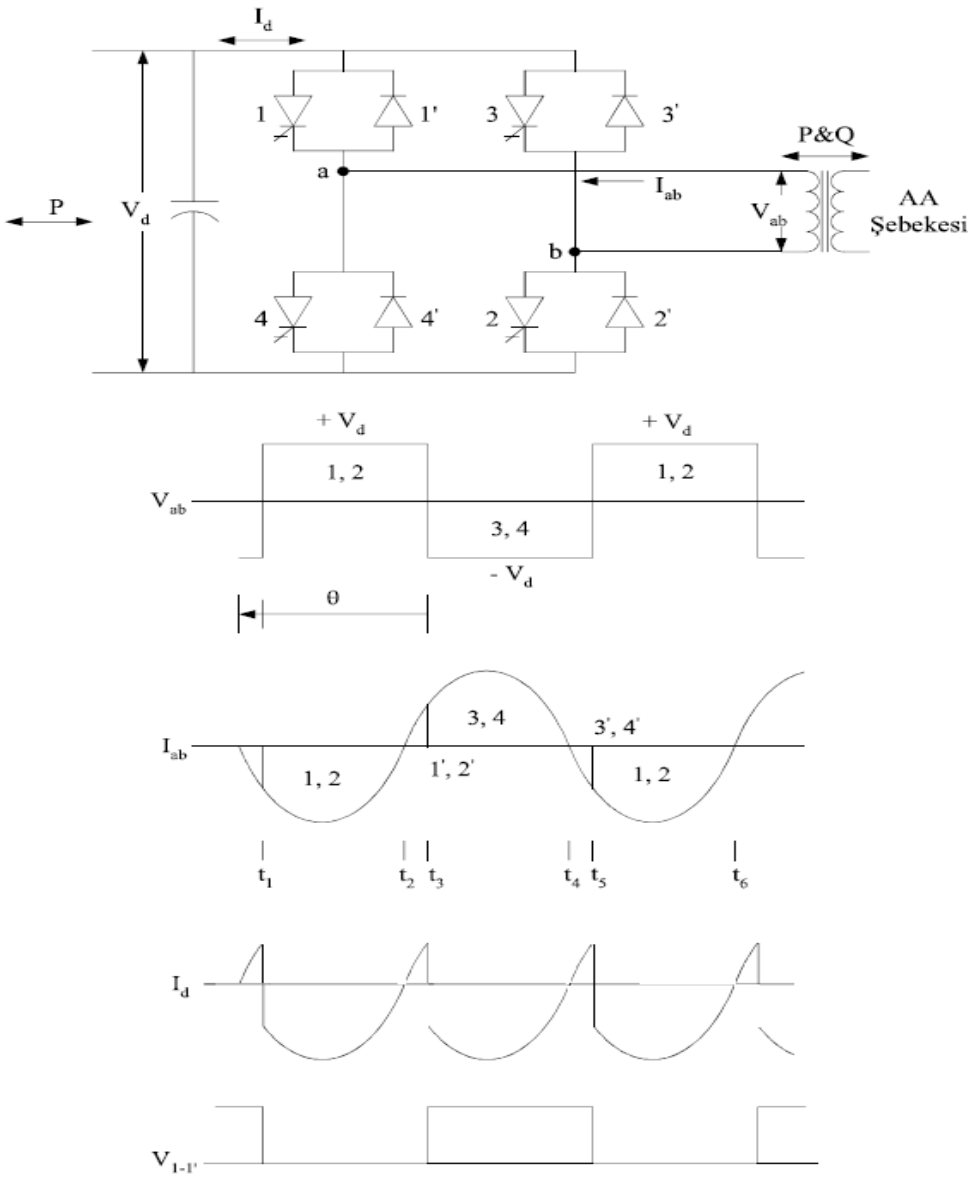
GBD'nin doğru gerilim tarafında bulunan kaynağının, genliğinin değerini değiştirerek ve dönüştürücün kazancını sabit tutarak değişken genlikli bir çıkış gerilimi elde etmek mümkündür. Bu tip dönüştürücülerde çıkıştaki alternatif gerilimin genliğini değiştirmek için girişteki doğru gerilimin genliği değiştirilir. Çıkıştaki alternatif geriliminin dalga şekli kare dalgaya benzemektedir. Üç fazlı temel dönüştürücü devresi ters paralel bağlı olan 6 adet asimetrik yarı iletken anahtarlama elemanlarından oluşan 6 darbeli evirici yapısı olarak bilinir. GBD'lerde doğru akım her iki yönde de aktığı için dönüştürücü çift yönlü akım geçirecek şekilde olmalıdır ve bu yüzden bir geri besleme diyotu yük akımı yön değiştirdiği zaman denetimli anahtarları korumak için bu anahtarlama elemanlarına daima paralel bağlanır. Ayrıca dönüştürücüdeki doğru gerilim ters dönmediği için denetimli anahtarların ters gerilim tutma kapasitesine sahip olmasına ihtiyaç duyulmaz. GBD'lerde yarı iletken anahtarlama elemanları daima doğru gerilimli besleme yüzünden ileri yönlü biaslanmış olarak kalır. Bu yüzden GTO, BJT, IGBT, güç MOSFET'leri ve IGCT'ler gibi tam denetimli ileri veya asimetrik tutmalı yarı iletken anahtarlama elemanları kullanmak daha uygundur. Tam denetimli anahtarlama elemanları kullanılmadan önce tristörler kullanılarak dönüştürücü devreleri gerçekleştirildi. Tam denetimli anahtarların gelişmesine paralel olarak tristörlü dönüştürücü devreleri günümüzde pek fazla tercih edilmemektedir. GTO, IGBT, MTO ve IGCT gibi tam denetimli anahtarlama elemanları veya buna benzer tam denetimli elemanlar kapıdan

iletime ve kesime gitme yeteneğine sahiptirler. Bu elemanlar kapıdan kesime götürülemeyen kapasitesi olmayan tristörlerden daha fazla kayıplara sahip ve daha pahalıdır. Fakat tam denetimli anahtarlama elemanları ile yapılan dönüştürücüler tüm sistem maliyeti düşünüldüğünde ve performans açısından değerlendirildiğinde önemli avantajlara sahiptir.

Dönüştürücü, alternatif akım tarafında güç sistemine transformatör yardımı ile bağlanırken, doğru akım tarafına ise bir doğru gerilim kondansatörü bağlanır. Bu kondansatörün, doğru geriliminde değişme olmadığı, doğru akımdaki değişmelere ise dayanabilecek kadar büyük olduğu varsayılır ve kalıcı durumda bir gerilim kaynağı olarak düşünülebilir [42].

3.2.3. Tek Fazlı Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

FACTS kontrolörlerde genellikle üç fazlı dönüştürücüler kullanılmasına rağmen GBD' lerin çalışma ilkelerinin anlaşılması açısından tek fazlı dönüştürücüler önemlidir. En basit dönüştürücü yapılarından biri Şekil 3.4.'de gösterilen tek fazlı tam dalga dönüştürücüdür. Eğer akım, alternatif akım tarafından doğru akım tarafına akıyorsa pozitif (doğrultucu modunda), doğru akımdan alternatif akım tarafına akıyorsa negatif (evirici modunda) olduğu varsayılır. Ayrıca Şekil 3.4.'de gösterilen I_d akımının kondansatörünün dolması için doğru akım tarafına akması gerekir. Bu I_d akımı harmonikler içerir ve bu harmonikler tek fazlı tam dalga bir dönüştürücüde iki ve ikinin katlarıdır. Bu dönüştürücü 4 anahtarlama elemanından düzgün bir doğru gerilim sağlamak için bir kondansatörden meydana gelmektedir. Şekil 3.4.'den de görüleceği gibi 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları iletime sokulursa ilk yarım periyot için V_{ab} gerilimi $+V_d$ olur. Diğer yarım periyotta ise 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları iletime sokulup 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları kesime götürülürse bu defa V_{ab} gerilimi $-V_d$ olur. Bu alternatif gerilim, alternatif akımın genliği, dalga şekli ve faz açısından bağımsız meydana gelir. Alternatif akım sistemin gerilimi ve empedansı ile dönüştürücün ürettiği alternatif gerilimin bir sonucu olarak meydana gelir [42].

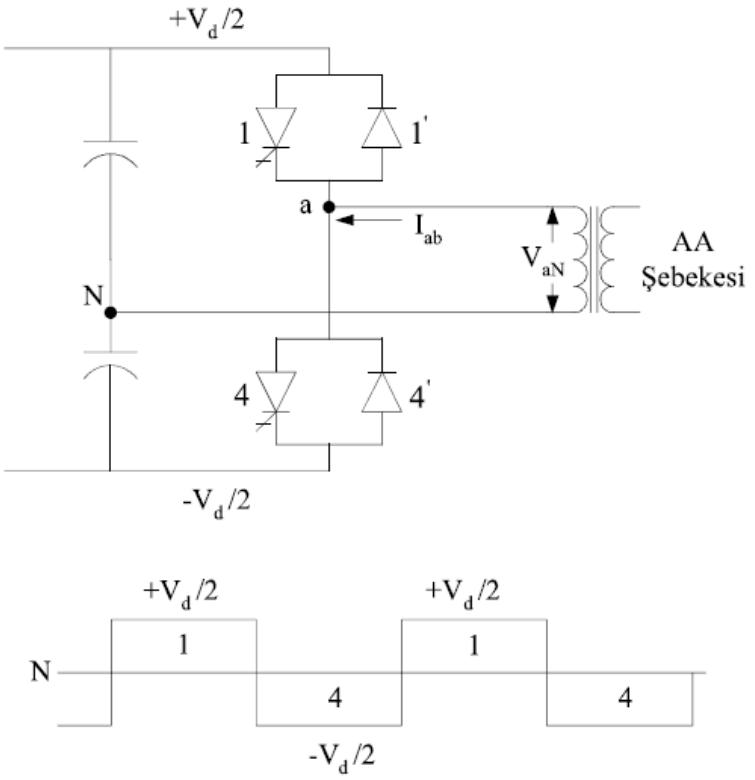


Şekil 3.4. Tek fazlı Tam Dalga GBD ve Akım-Gerilimlerinin Dalga Şekli

Şekil 3.4.'teki gibi sinüzoidal, *θ* açısı kadar ileride ve şebekeden eviriciye doğru bir akım aktığı varsayılırsa,

- t_1 ile t_2 zaman aralığında 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları iletimde, 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları kesimde V_{ab} pozitif, I_{ab} negatiftir. Güç akışı, 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları yardımı ile dönüştürücünün doğru gerilim tarafından şebekeye doğrudur (evirici olarak).

- t_2 ile t_3 zaman aralığında akım yön değiştirir ve pozitif olur. Akım 1' ve 2' diyotlarından akar. Güç akışı şebekeden dönüştürücünün doğru gerilim tarafına doğrudur (doğrultucu olarak).
- t_3 ile t_4 zaman aralığında 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları kesimde, 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları iletimdedir. Ayrıca I_{ab} aynı yönde akmaya devam ederken V_{ab} negatiftir. Akım 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanlarından akar. Güç akışı, doğrultucunun doğru gerilim tarafından şebekeye doğrudur (evirici olarak).
- t_4 ile t_5 zaman aralığında 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları iletimde kalmaya devam ederler, 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları ise kesimdedirler. V_{ab} negatiftir, I_{ab} ise yön değiştirir. Güç akışı ise doğrultucunun doğru gerilim tarafından şebekeye doğru 3' ve 4' diyotları üzerinden akmaktadır (doğrultucu olarak).



Şekil 3.5. GBD'nin Bir Faz Bacağı ve Bir Faz Bacağının Çıkış Geriliminin Dalga Şekli

Dönüştürücülerin çalışmasının daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.5.'teki bir faz bacağının çalışmasının incelenmesinde fayda vardır. Eğer Şekil 3.5.'teki

devrede anahtarlama elemanları sıralı olarak açılıp kapatılırsa alternatif gerilimin şekli bir kare dalga olur. Bu devreye göre,

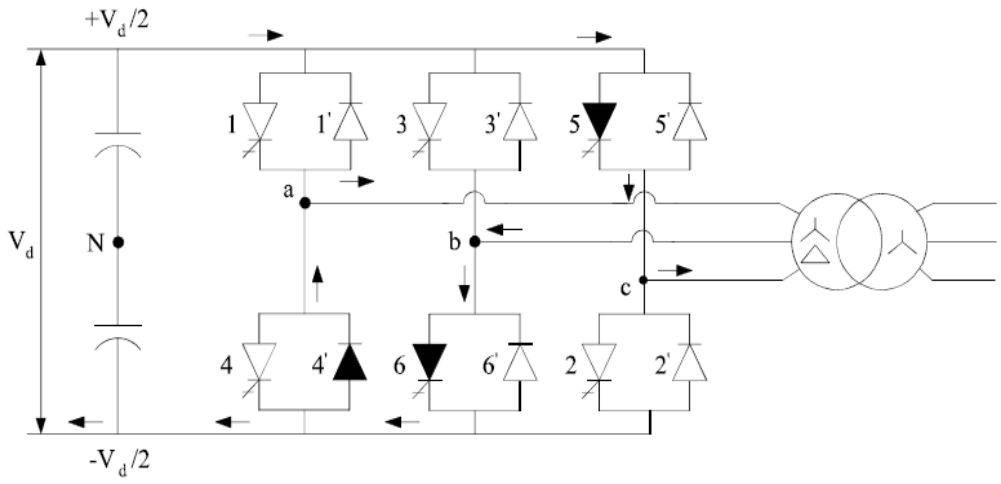
- Alternatif akım ve gerilim arasında herhangi bir faz ilişkisi olabilir. Yani ileri veya geri reaktif güçlü bir evirici veya bir doğrultucu olarak dört bölgenin tamamında çalışabilir. Eğer dönüştürücü ile şebeke arasında aktif güç alışverişi de olması isteniyorsa o zaman dönüştürücü ayrıca bir doğru gerilim sistemine ihtiyaç duyar. Eğer dönüştürücü sadece reaktif güç alışverişi için tasarlanmışsa doğru gerilim sistemine ihtiyaç duyulmaz ve dönüştürücü kondansatör ile sonlandırılır.
- Aktif ve reaktif güç alışverişi, şebeke gerilimine göre dönüştürücün ürettiği alternatif gerilimin faz açısı ve genliğinin yardımı ile bağımsız bir şekilde kontrol edilebilir.
- Dönüştürücüdeki diyotlar doğrultucu görevini, denetimli anahtarlama elemanları ise evirici görevini yerine getirirler. Bir periyot boyunca dönüştürücü faz açısı ve net güç akışına göre ya evirici ya da doğrultucu olarak çalışır. Dönüştürücü birim güç faktöründe doğrultucu olarak çalıştığı zaman sadece diyotlar, evirici olarak çalıştığı zaman ise denetimli anahtarlar iletimdedir.
- Denetimli anahtarlardan herhangi biri kesime sokulduğu zaman alternatif akım gerçekte tamamen kesilmez. Dönüştürücü birim güç faktöründe çalışmıyorsa, bir denetimli anahtardan değil de diyotlar üzerinden akar. Birim güç faktöründe çalışıyorsa ise diğer bir denetimli anahtardan akmaya devam eder. Aynı faz bacağındaki denetimli anahtarlar aynı anda iletime sokulursa dönüştürücünün doğru gerilim tarafı kısa devre olur. Kondansatörde kısa devre olan bu bacak üzerinden çok hızlı bir şekilde boşalacağı için faz bacağı üzerinde bulunan denetimli anahtarlar zarar görebilir. Kısaca bir faz bacağı üzerindeki denetimli anahtarlardan biri iletime sokulursa diğeri kesime götürülmelidir.
- Faz bacaklarının birkaç tanesi paralel olarak bağlanabilir. Bu faz bacaklarının her biri uygun anahtarlama elemanları ve manyetik bir yalıtım ile şebekeye bağlanarak bağımsız bir şekilde çalıştırılabilir.
- Denetimli anahtarların anahtarlaması ile dönüştürücünün doğru gerilimine bağlı olarak alternatif akımın dalga şekli meydana gelir.

Şekil 3.5.'te gösterilen dönüştürücünün çıkış gerilimi V_{ab} ana harmonik bileşenine ek olarak birçok harmonik içerir. Bu harmonikler $2n \pm 1$'in katlandır. Burada *n*, *1, 3, 5,* gibi tamsayılardır. Her gerilim harmoniğinin genliği ana harmoniğin $1/n$'i kadardır. (3. harmoniğin genliği ana harmoniğin *1/3*'ü, 5. harmoniğin genliği ana harmoniğin *1/5*'i….vb.) Ana frekansta $0.1\,pu$'luk bir reaktans için 5. harmonik akımının genliği $0.2\,pu$'luk gerilim harmoniği için $0.4\,pu$ olabileceği için şebekeye akan akım harmoniklerinin genlikleri önemlidir.

Dönüştürücü tarafından üretilen akım harmoniklerini yok etmenin veya azaltmanın en basit yolu pasif LC filtreleri kullanmaktır [45]. Akım harmoniklerini filtrelemek için dönüştürücü genellikle transformatörün kaçak endüktansının kullanılması ile gerçekleştirilen endüktif bir ara yüz ile güç sistemine bağlanır. Bu bağlantı transformatörü kondansatörün iletim hattı gibi kapasitif bir yüke hızlı bir şekilde boşalmasını da önler. Ayrıca şebekeye doğru akan akım ve bu akımın dalga şekli de bu endüktansı değerine bağlıdır. Düşük frekans bileşenlerini yok etmek için tasarlanan veya düşük frekansa ayarlanmış geleneksel alçak geçiren seri ya da paralel LC filtrelerinin değerleri büyüktür. Bu nedenle paralel bağlı ayarlı seri LC filtreleri veya çentik filtreleri 5. 7., 11., ve 13. gibi bileşenler için kullanılır. Zorlanmış komutasyonlu ABD'ler için bir LC filtresi kullanılır. GBD'ler için bağlantı reaktansı ve transformatör, birinci dereceden harmonik akım filtresi gibi davranırlar. Toplam endüktans değeri izin verilen akım harmonik bozulmalarını karşılayacak şekilde seçilmelidir. Ek bir LC filtresi de harmonik içeriğini azaltmak için kullanılabilir [42].

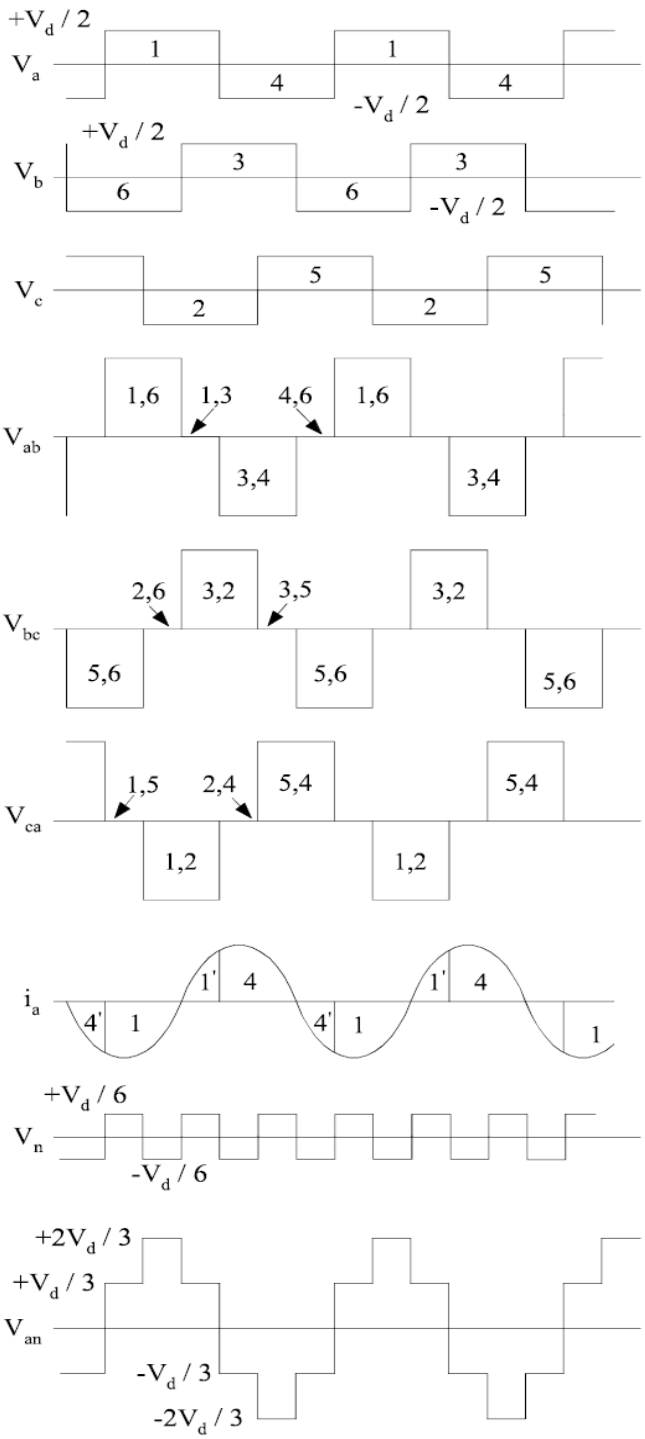
3.2.4. Üç Fazlı Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

Üç fazlı dönüştürücüler alternatif akım motor sürücülerinde ve genel amaçlı alternatif akım kaynakları için yaygın şekilde kullanılırlar. Şekil 3.6.'da üç fazlı iki seviyeli bir GBD devresi gösterilmiştir. Dönüştürücüde 6 adet GTO, IGBT gibi denetimli anahtarlama elemanı ve aynı faz bacağı üzerinde bulunan denetimli anahtarlama elemanları kesime sokulduğu zaman indüktif akımın üzerinden geçmesi için 6 adet denetimsiz anahtar (diyot) kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Üç fazlı iki seviyeli GBD

Üç fazlı dönüştürücüler, aralarında *120°* faz farkı ve birbiri ile uyum içinde çalışan üç faz bacağından meydana gelir. Bu üç faz bacağının çıkışında kare dalgalar üretilir. Her faz bacağındaki denetimli ve denetimsiz anahtarlama elemanları *Tablo 3.3*'ten de görüleceği gibi toplam *180°* iletimde kalır ve anahtarlama özelliği her *30°* de değişir. Şekil 3.7.'de dönüştürücünün faz-nötr, faz-faz gerilimleri ve tek faz akımı gösterilmiştir [42].



Şekil 3.7. Şekil 3.6.'daki Üç fazlı GBD'nin Akım ve Gerilimlerinin Dalga Şekilleri

Şekil 3.7.'de gösterilen faz-faz gerilimleri tepe değeri V_d olan *120°* 'lik darbe genişliğine sahiptirler. V_a, V_b *ve* V_c kare dalga gerilimleri, kondansatörün orta noktası N'ye göre faz çıkış gerilim değerleridir. Alternatif gerilimin nötr noktası kondansatörün orta noktasına fiziksel olarak bağlandığında, bu gerilimler dönüştürücünün alternatif gerilim tarafının faz-nötr gerilimleri olur. Bu

durumda dönüştürücü 6 darbeli tam dalga dönüştürücü olarak değil de iki adet 3 darbeli dönüştürücü olarak çalışır. Bu üç faz bacağı arasında *120°* 'lik faz farkı vardır, b faz bacağında bulunan 3 ve 6 nolu anahtarlama elemanları, a faz bacağında bulunan 1 ve 4 nolu anahtarlama elemanlarından *120°* sonra anahtarlanır. Aynı şeklide c faz bacağında bulunan 2 ve 5 nolu anahtarlama elemanları, b faz bacağında bulunan 3 ve 6 nolu anahtarlama elemanlarından *120°* sonra anahtarlanır.

Ayrıca Şekil 3.7.'de gösterilen hat gerilimlerinin dalga şekilleri karakteristik olarak hem 6 adımlı dalga şekline hem de üç fazlı kontrollü köprü doğrultucunun hat akımının dalga şekline benzer. Dalga şeklindeki karakteristik harmonikler $6n \pm 1$'in katlarıdır. Burada n, 1; 2; 3;... gibi tamsayılardır. Üç fazlı ana ve harmonik bileşenleri *120°* 'lik bir faz kaydırması ile dengelenir. Bu tip dönüştürücüler kare dalga veya 6 adımlı dönüştürücü olarak bilinir.

Tablo 3.3 Üç Fazlı İki Seviyeli GBD için Anahtarlama Özelliği

İletim periyotları (Derece)	**a fazında iletimdeki anahtarlama elemanı**	**b fazında iletimdeki anahtarlama elemanı**	**c fazında iletimdeki anahtarlama elemanı**
0-30	$1'$	$6'$	5
30-60	$1'$	6	5
60-90	$1'$	6	$2'$
90-120	1	6	$2'$
120-150	1	$3'$	$2'$
150-180	1	$3'$	2
180-210	$4'$	$3'$	2
210-240	$4'$	3	2
240-270	$4'$	3	$5'$
270-300	4	3	$5'$
300-330	4	$6'$	$5'$
330-360	4	$6'$	$5'$

Tablo 3.4 Üç Fazlı İki Seviyeli GBD'nin Faz-Nötr Gerilimi için Anahtarlama Özellikleri

İletim periyotları (Derece)	$\mathbf{V_{aN}}$	$\mathbf{V_{bN}}$	$\mathbf{V_{cN}}$
0-30	$+V_d/3$	$-2V_{dc}/3$	$+V_d/3$
30-60	$+V_d/3$	$-2V_{dc}/3$	$+V_d/3$
60-90	$+2V_d/3$	$-V_d/3$	$-V_d/3$
90-120	$+2V_d/3$	$-V_d/3$	$-V_d/3$
120-150	$+V_d/3$	$+V_d/3$	$-2V_d/3$
150-180	$+V_d/3$	$+V_d/3$	$-2V_d/3$
180-210	$-V_d/3$	$+2V_d/3$	$-V_d/3$
210-240	$-V_d/3$	$+2V_d/3$	$-V_d/3$
240-270	$-2V_d/3$	$+V_d/3$	$+V_d/3$
270-300	$-2V_d/3$	$+V_d/3$	$+V_d/3$
300-330	$-V_d/3$	$-V_d/3$	$+2V_d/3$
330-360	$-V_d/3$	$-V_d/3$	$+2V_d/3$

Tablo 3.4'ten V_{ab} gerilimi hesaplanacak olursa,

$$V_{ab} = V_a - V_b = \frac{V_d}{3} - \left(-\frac{2V_d}{3}\right) = V_d \qquad (3.12)$$

şeklinde bulunur. Faz-faz geriliminin etkin değeri ise,

$$V_{LL} = \sqrt{\frac{2}{2\pi}\int_0^{\frac{2\pi}{3}} {V_d}^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_d = 0{,}8165.V_d \qquad (3.13)$$

şeklinde ifade edilir.

Daha önceden de bahsedildiği gibi her faz bacağı bağımsız bir şekilde çalışır ve anahtarlama elemanlarının açılıp kapatılması ile doğru gerilim

alternatif bir gerilime dönüştürülür. Güç, şebekeden kondansatöre doğru diyotlar, kondansatörden şebekeye doğru ise denetimli anahtarlama elemanlar yardımı ile akar [42].

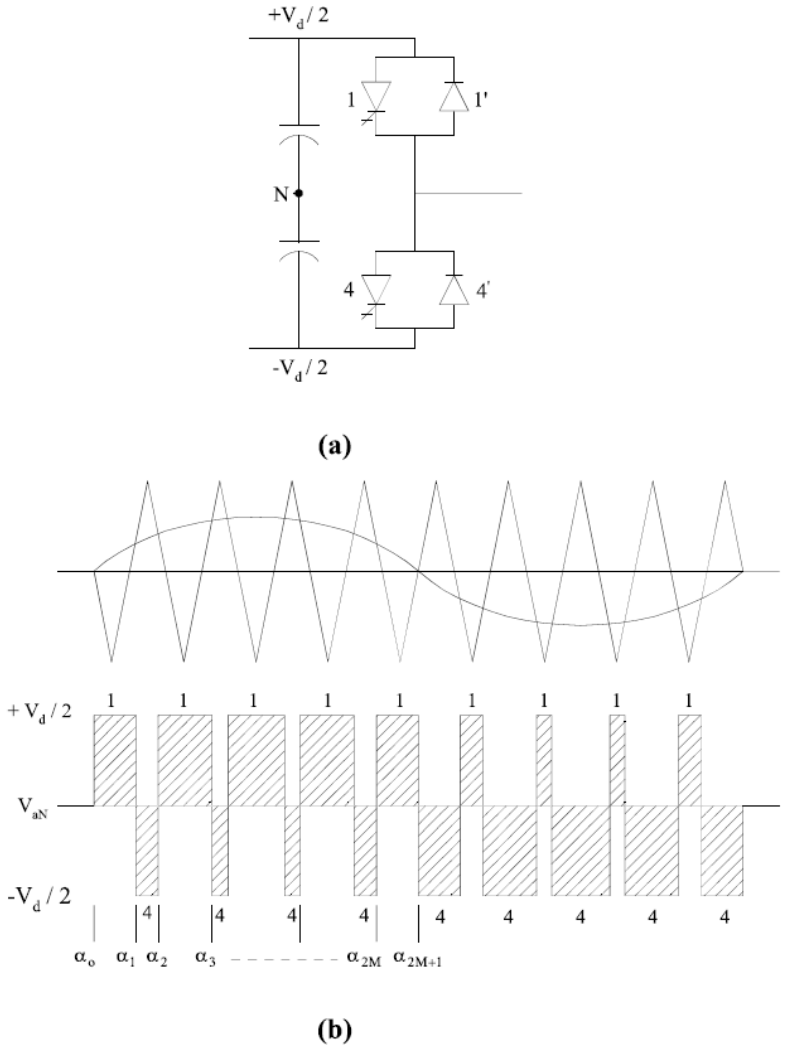
3.2.5. Darbe Genişlik Modülasyonlu Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

DGM dönüştürücülerin esas avantajı, dönüştürücü kazancının ve buna bağlı olarak da dönüştürücün çıkış geriliminin kontrol edilebilmesidir. Farklı dönüştürücü yapıları ile kullanılan birçok DGM tekniği vardır. En popüler olan DGM tekniği, sinüzoidal DGM (SDGM)'dir. Şekil 3.8.(b)'de sistem frekansı ile aynı frekansta bir sinüs dalgası (modülasyon dalgası) ve ana frekansın dokuz katı bir testere dişli (taşıyıcı dalga) dalga olmak üzere iki kontrol sinyalinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Anahtarların iletime girmesi veya kesime gitmesi için gerekli darbeler, sinüs dalgası ile testere dişli dalganın geçiş noktalarına göre üretilir. Testere dişli dalganın negatif eğimli olduğu yerde sinüs dalgası ile kesiştiğinde 4 nolu anahtarlama elemanına kesime gitmesi için, 1 nolu anahtarlama elemanına ise iletime geçmesi için darbeler gönderilir. Testere dişli dalganın pozitif eğimli olduğu durumda ise yukarıda bahsedilen durumun tam tersi geçerlidir.

SDGM'ye ek olarak birçok DGM tekniği de geliştirilmektedir. Bu tekniklerin bazıları birkaç değişiklik ile yüksek güç dönüştürücülerine uygulanabilir. Seçici harmonik eliminasyonu (SHE), ilk harmoniğin genliğini belirlemek için çentikler eklenirse gerilim kontrolü için güç dönüştürücülerinde uygulanabilir. Bu yöntem, belirli harmonik bileşenlerini yok etmek için tasarlanabildiği için bu yöntem kullanılarak harmoniklerin tam bir kontrolü gerçekleştirilebilir. Bu nedenle verilen bir harmonik içeriği için anahtarlama frekansını da azaltır.

DGM GBD'ler iki veya ÇS-GBD (Çok Seviyeli Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler)'lerde her anahtarlama elemanı her periyotta açılıp kapatılır. Bu GBD'ler ile alternatif çıkış gerilimi, gerilim darbelerinin genişliği ve-veya dönüştürücünün doğru geriliminin genliği değiştirilerek kontrol edilebilir. Diğer yaklaşım ise her yarım periyotta çok darbeye sahip olmak ve daha sonra alternatif gerilimin genliğini değiştirerek darbelerin genişliğini değiştirmektir. Böyle yapmanın prensipteki nedeni, dönüştürücünün çıkışında üretilen alternatif gerilimin genliğinin değiştirilebilmesi ve bu alternatif gerilimin harmonik

mertebesinin azaltılabilmesidir. Ayrıca anahtarlama kayıplarını azaltmak için sıfır akım veya sıfır gerilim anahtarlaması olarak bilinen yumuşak anahtarlamayı birleştiren rezonans DGM dönüştürücü yapıları da vardır. Bu tip dönüştürücüler bazı düşük güç uygulamalarında oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır. Ancak daha yüksek ekipman maliyetlerinden dolayı henüz yüksek güç uygulamalarında kullanılmamaktadır.



Şekil 3.8. Ana Frekansın Dokuz Katı Bir Anahtarlama Frekansı ile DGM Dönüştürücünün Çalışması a) Bir Faz Bacağı, b) DGM Dalgaları

Taşıyıcı dalganın frekansı, çıkış geriliminin ana frekansını belirler. Taşıyıcı dalganın frekansının modülasyon dalgasının frekansına oranı,

$$m_f = \left(\frac{f_T}{f_m}\right) \tag{3.14}$$

olarak yazılır ve bu oran frekans modülasyon oranı olarak isimlendirilir. Burada f_T, taşıyıcı dalganın frekansı ve f_m ise modülasyon dalgasının frekansıdır. m_f tek tamsayı seçildiği için faz- nötr gerilimi ve faz-faz gerilimleri tek simetrilerden oluşur. Bu yüzden dönüştürücünün çıkış geriliminin Foruirer analizi yapıldığında sadece sinüs serisinin katsayıları sonludur, cosinüs serisinin katsayıları ise sıfırdır. Bu yüzden faz-nötr ve faz-faz gerilimlerinde tek sayılı harmonikler görülür, çift harmonikler görülmez, frekans modülasyon oranı, m_f, $2m_f$, $3m_f$ gibi anahtarlama frekansı veya katlarında merkezlenmiş yan bantlar olarak görülen harmonik derecelerine etki eder. Eğer frekans modülasyon oranı üçün katları seçilirse m_f'nin katlarında meydana gelen harmonikler dönüştürücünün çıkış geriliminde yok edilir. Harmoniklerin meydana geldiği frekanslar aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} &m_f, m_f \pm 2 \\ &2m_f, 2m_f \pm 1 \\ &3m_f, 3m_f \pm 2 \\ &4m_f, 4m_f \pm 1 \ldots\ldots \end{aligned} \tag{3.15}$$

Modülasyon indeksi *m* ise,

$$m = \left(\frac{V_T}{V_m}\right) \tag{3.16}$$

şeklinde ifade edilir. Modülasyon dalgasının genliği değiştirilerek (*0* ile V_T arasında) darbe genişlikleri *0* ile *180°* arasında değiştirilebilir. Şekil 3.8.(a)'da gösterilen dönüştürücün orta nokta N'ye göre faz-nötr çıkış gerilimi,

$$V_{aNmax} = m\left(\frac{V_{dc}}{2}\right) \tag{3.17}$$

olarak yazılabilir. V_{bN} ise a fazından *120°* geride olan b fazının kondansatörün orta noktasına göre çıkış gerilimidir. Transformatörün yıldız bağlı ikincil tarafının nötr noktasının gerilimi V_n,

$$V_n = \left(\frac{V_{aN}+V_{bN}+V_{cN}}{3}\right) \tag{3.18}$$

şeklinde ifade edilir.[42].

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE UYGULAMALAR

4.1. Uygulama–1:

Çıkış gerilim denklemi verilen 10 voltluk DC gerilim ile çalışacak bir güvenlik kamerası sisteminin, çıkış gerilimini, bu sistemin PID denetleyici ile tasarımını ve PID denetleyicinin sisteme etkisini inceleyelim.

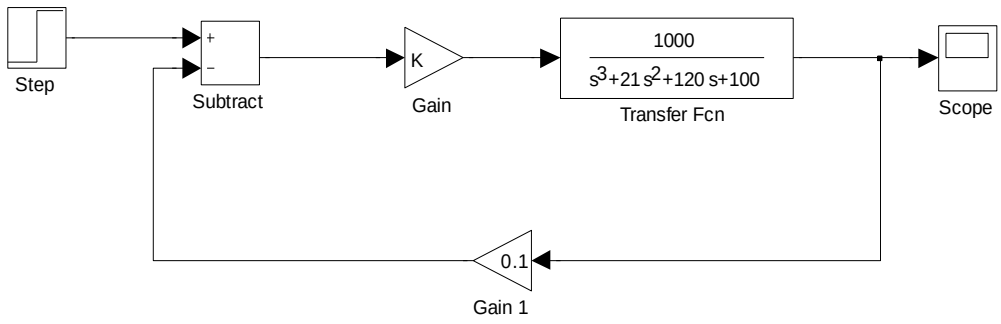
Sistemin $G(s)$ transfer fonksiyonu;

$$G(s) = \frac{1000}{(s+1).(s+10)^2} \qquad (4.1)$$

şeklindedir. Problemin amacı K_p, K_d ve K_i katsayılarının

- Daha hızlı yükselme zamanı
- En az aşma
- Sıfır kalıcı durum hatası, elde etmedeki katkılarını göstermektir.

Sistemin Matlab/Simulinkte tasarımı Şekil 4.1.'deki gibidir.



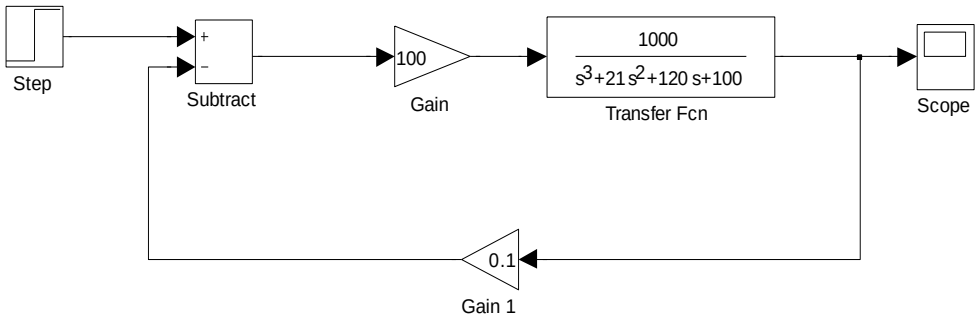
Şekil 4.1. $G(s)$ Fonksiyonunun Tasarımı

Şekil 4.1.'deki sistemde verilen transfer fonksiyonu için K kazancını değiştirerek osiloskop çıkışlarını incelersek;

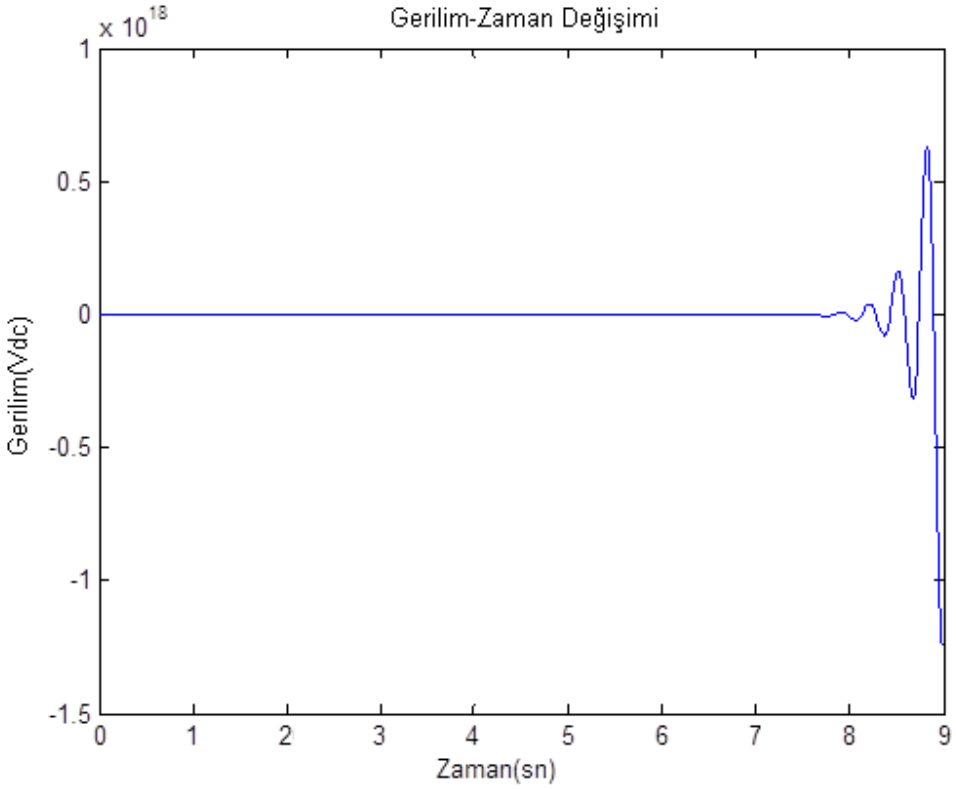
Sistemin transfer fonksiyonu 4.2'deki gibidir.

$$G(s) = \frac{1000}{(s+1).(s+10)^2} = \frac{1000}{s^3+21s^2+120s+100} \qquad (4.2)$$

Şekil 4.1.'deki sistemde DC kazanç 10'dur. $K = 100$ alındığında elde edilen sistem Şekil 4.2.'de, sistemin osiloskop çıkışı ise Şekil 4.3.'teki gibidir.

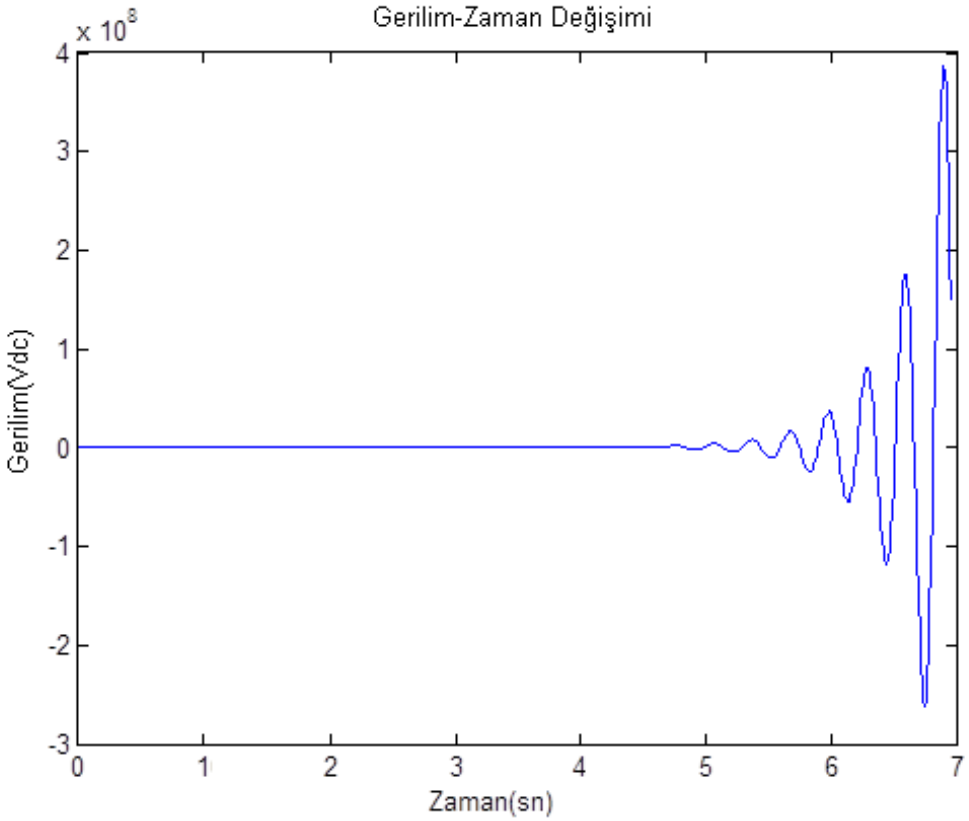


Şekil 4.2. $K = 100$ için $G(s)$ Fonksiyonu Tasarımı

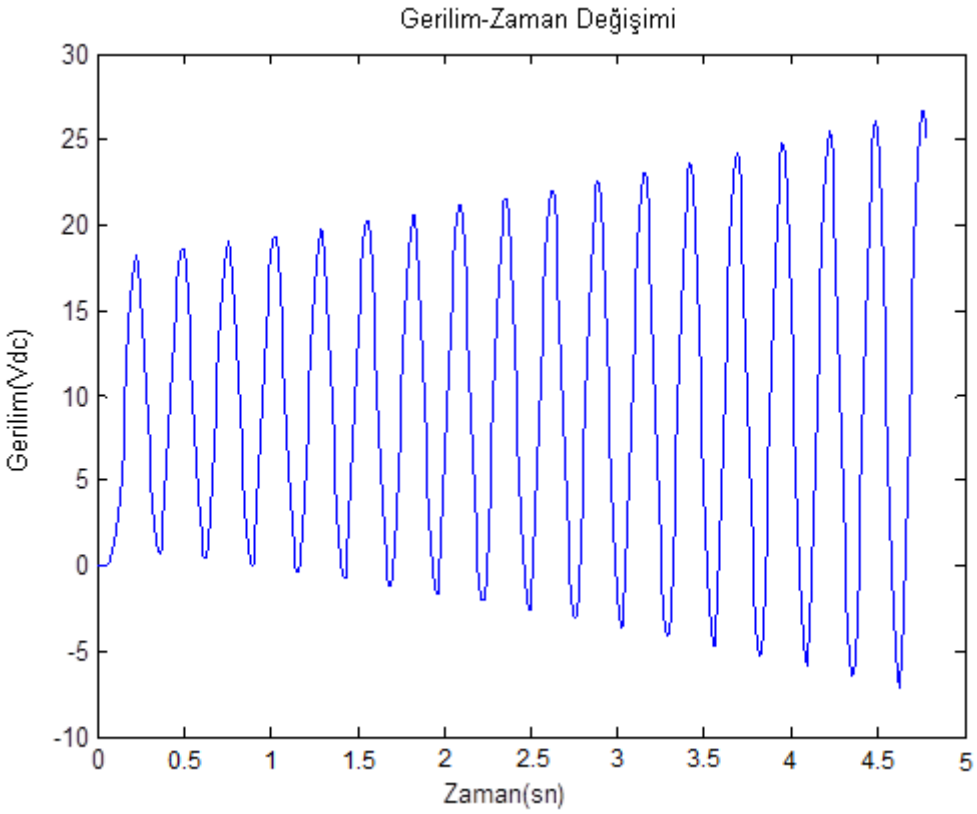


Şekil 4.3. $K = 100$ için Sistem Cevabı

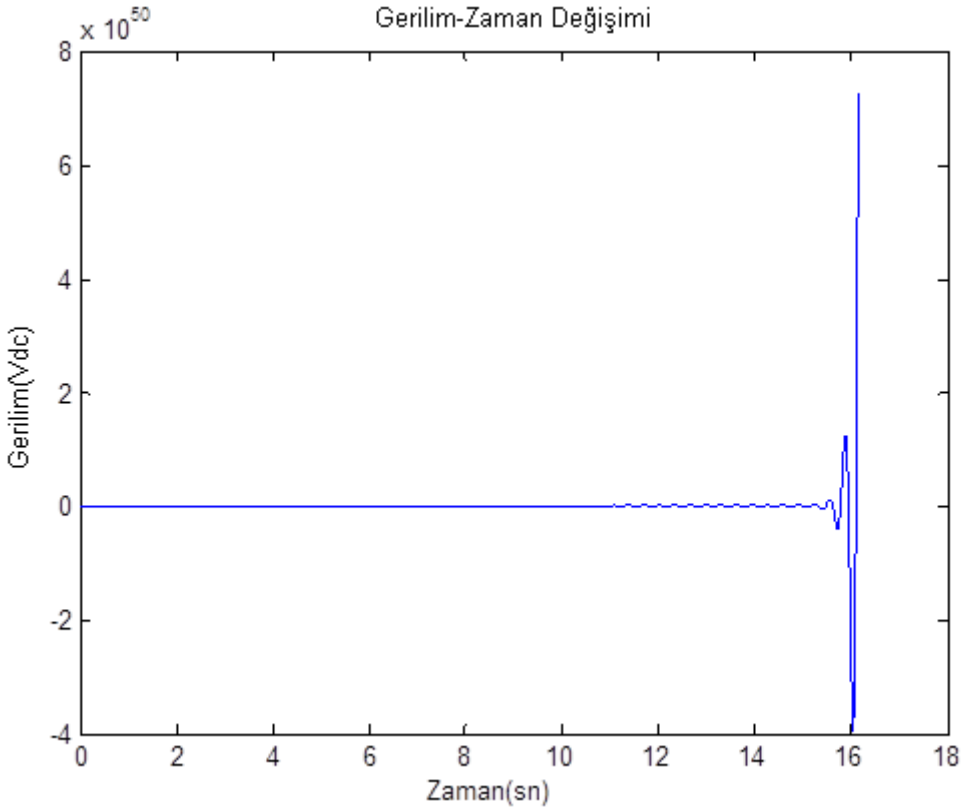
$K = 100$ alındığında elde edilen sistem cevabı Şekil 4.3.'teki gibidir. Şekil 4.2.'de verilen sistemde K değerlerini değiştirerek, ($K = 50$ için Şekil 4.4, $K = 25$ için Şekil 4.5, $K = 500$ için Şekil 4.6) sistemin osiloskop çıkışlarını incelersek;



Şekil 4.4. $K = 50$ için Sistem Cevabı



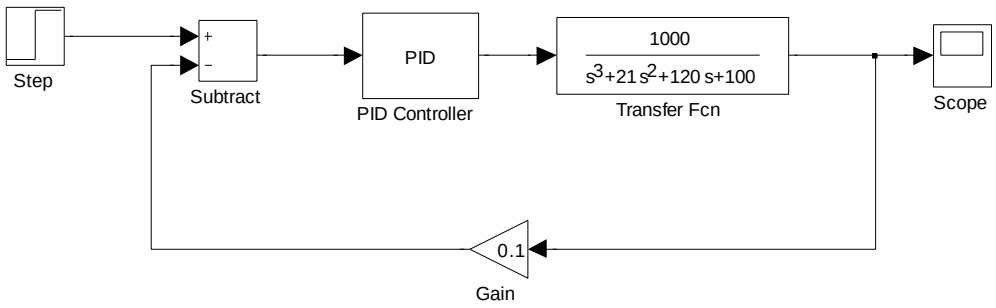
Şekil 4.5. $K = 25$ için Sistem Cevabı



Şekil 4.6. $K = 500$ için Sistem Cevabı

$G(s)$ transfer fonksiyonu için, çıkışın değeri $K = 100$ için 7,5 s, $K = 50$ için 4,5 s, $K = 25$ için 1 s, $K = 500$ için 14,5 s'den itibaren % 100 den çok fazla artış göstermektedir. Bu da sistemde kalıcı durum hatası oluşturmaktadır. Sistem cevabı büyük bir değerdir. Dahası, yükselme zamanı sürekli olarak artmaktadır. K değişken değerleri için sistem cevabı yeterli olmayıp salınımları yok edememektedir. Şekil 4.3-4-5-6.'da oluşan kararlı hal hatası (DC kazanç değerinin sistem cevabında elde edilememesi)'nın giderilmesi için Şekil 4.7.'de verilen sisteme PID denetleyici ekleyerek sistem çıkışını inceleyelim.

Sistemin PID Denetleyici ile tasarımı;



Şekil 4.7. PID Denetleyici ile Tasarım

Şekil 4.7.'de verilen sistemde karakteristik denklem hesaplanırsa;

$$\Delta(s) = 1 + K.\frac{1000}{(s+1).(s+10)^2}.0.1 = s^3 + 21s^2 + 120s + 100(1+K) = 0 \quad (4.3)$$

Tablo 4.1 Karakteristik denklemin kökleri

s^3	1	120
s^2	21	$100(1+K)$
s^1	$\frac{21x120 - 1x100(1+K)}{21}$	…..
s^0	$100 + 100K$	…..

Denklemin kökleri Tablo 4.1'deki gibidir. Denklemden K_c kritik değeri hesaplanırsa;

$$\frac{21\text{x}120-1\text{x}100(1+\text{K})}{21} > 0 => \frac{2520-100-100\text{K}}{21} > 0 => 2420 > 100K$$

$$=> K < 24{,}20 \qquad (4.4)$$

$$100 + 100\text{K} > 0 \;\; => 100K > 100 \;\; => K > -1 \qquad (4.5)$$

$$-1 < K < 24{,}20$$

K_c kritik kazancının alacağı değer aralığı elde edilmiş olur.

4.3'teki karakteristik denklemden;

$$\Delta(\text{s}) = s^3 + 21s^2 + 120\text{s} + 100(1 + \text{K}) = 0 \qquad (4.6)$$

$$s^3 + 120\text{s} = 0 \;\; => \;\; s(s^2 + 120) = 0 \qquad (4.7)$$

$$=> \; s_1 = 0; \text{ ve } \; s^2 = -120 \;\; s_{2,3} \approx \pm\text{j}11 \qquad (4.8)$$

olarak bulunur. Sistemin açısal frekansını hesaplarsak;

$$21s^2 + 100(1 + \text{K}) = 0 \; => \; 21s^2 + 100 + 100\text{K} = 0 \qquad (4.9)$$

burada K_c kritik değerini 24,20 alındığında;

$$21s^2 + 2520 = 0 \; => 21s^2 = -2520 => s^2 = -120 => s_{1,2} \approx \pm\text{j}11$$

$$\text{s} \approx \pm\text{j}11 => \omega_c = 11 \qquad (4.10)$$

$\omega_c = 11$ bulunur.

ω_c için;

$$T_i = 0.5T_c$$
$$T_d = 0.12T_c \quad (4.11)$$
$$T_c = \frac{2.\pi}{\omega_c}$$

salınım periyotlarını hesaplarsak;

$$T_c = \frac{2.\pi}{\omega_c} = \frac{2.3.14}{11} = 0{,}5711$$
$$T_i = 0.5T_c = 0{,}5.0{,}5711 = 0{,}2855 \quad (4.12)$$
$$T_d = 0.12T_c = 0{,}12.0{,}5711 = 0{,}06854$$

olarak bulunur.

$K_c = 24{,}20$ için;

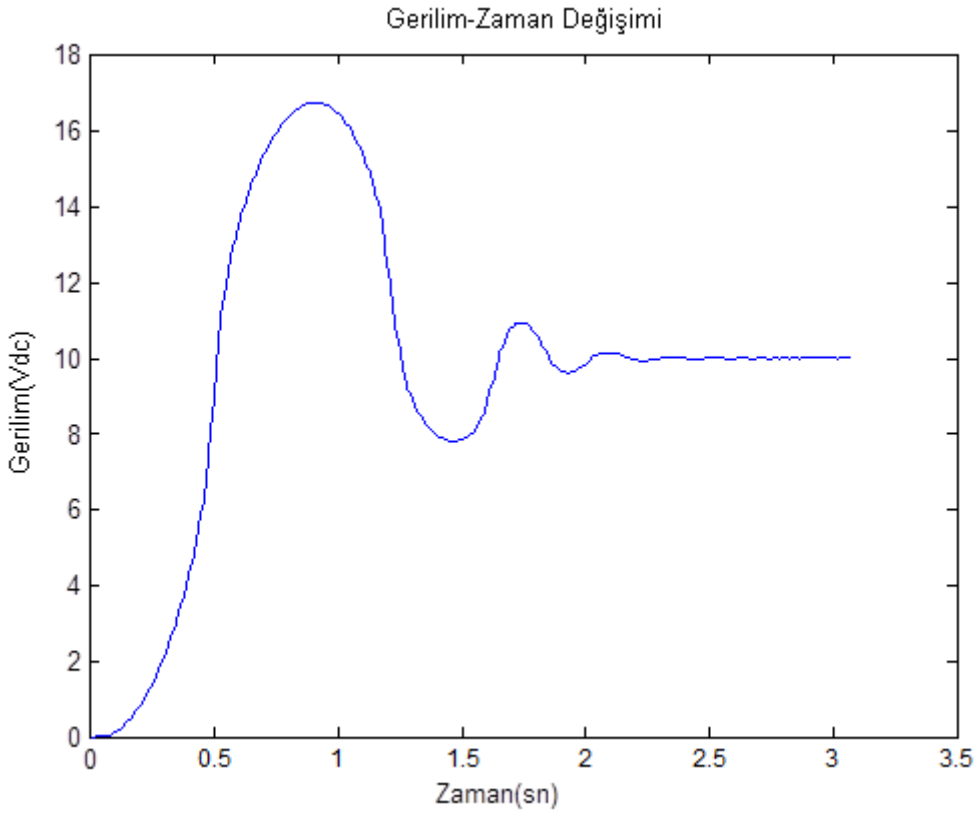
$$K_p = 0.6K_c$$
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (4.13)$$
$$K_d = K_p.T_d$$

kazanç katsayıları hesaplandığında;

$$K_p = 0.6K_c = 0{,}6.24{,}20 = 14{,}52$$
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{14{,}52}{0.2855} = 50{,}8581 \quad (4.14)$$
$$K_d = K_p.T_d = 14{,}52.0{,}06854 = 0{,}9952$$

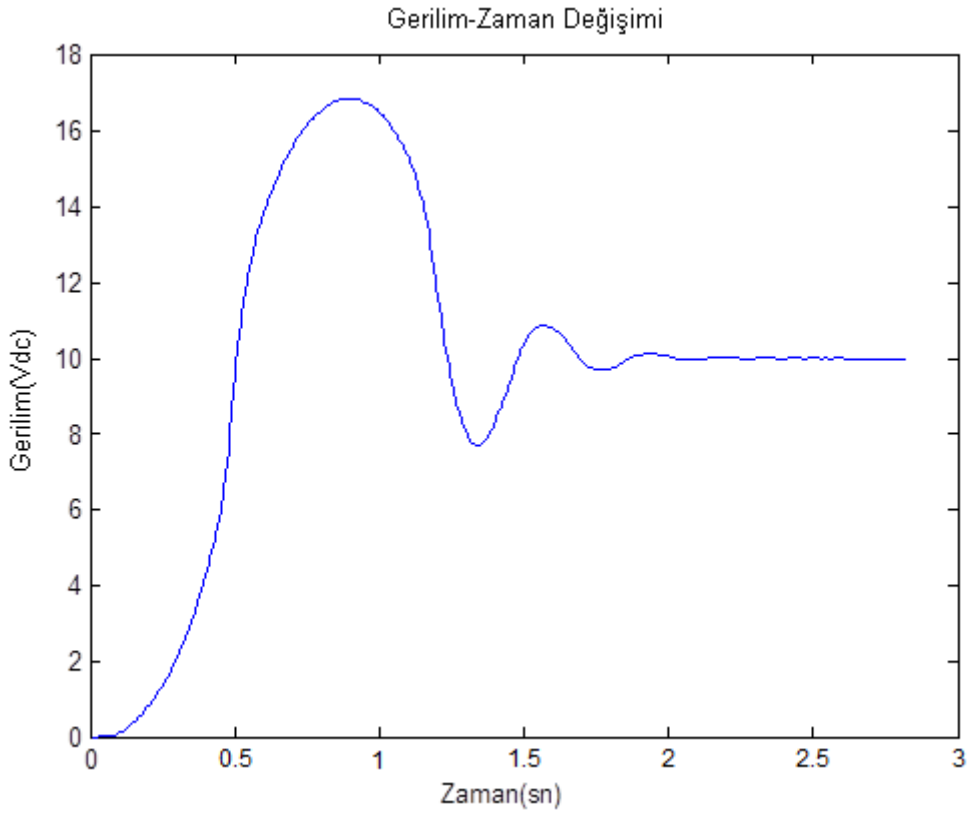
olarak bulunur.

Bulunan kazanç değerlerini Şekil 4.7.'deki sistemde bulunan PID parametrelerinde yerine koyarak elde edilen sistem çıkışını inceleyelim.



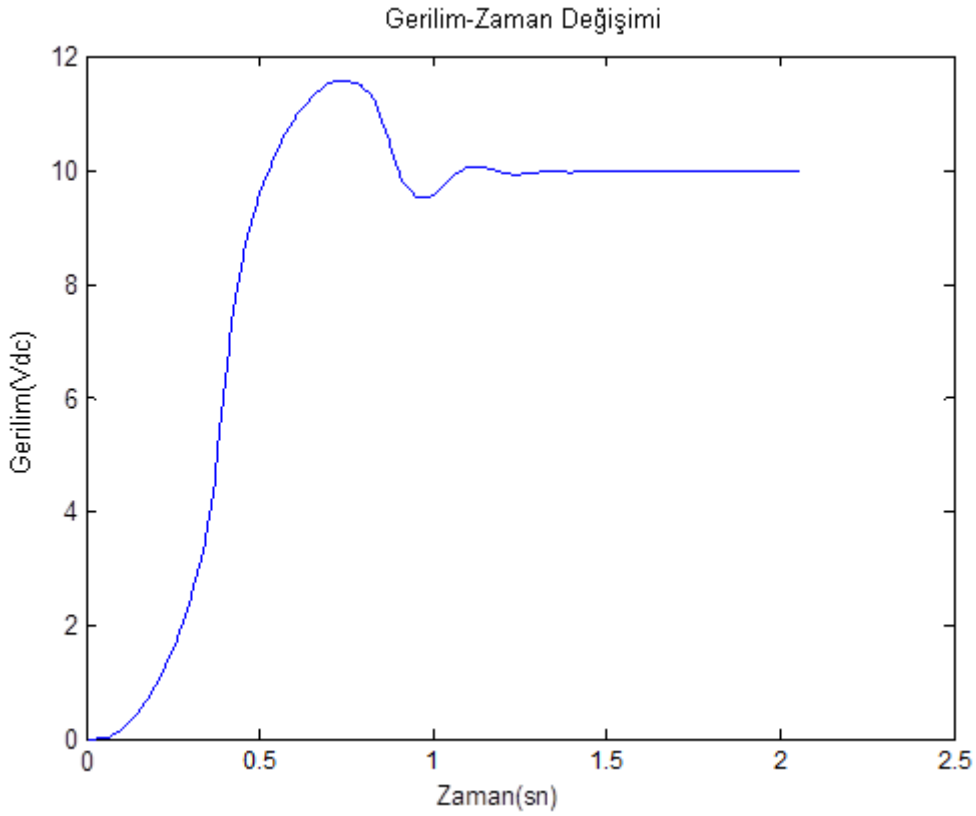
Şekil 4.8. $K_p = 14{,}52 - K_i = 50{,}8581 - K_d = 0{,}9952$ *için Sistem Cevabı*

Şekil 4.7.'de verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığında çıkışın en son değeri 16,5 volt olmaktadır. Bu da % 65'lik bir kalıcı durum hatası oluşturmaktadır. Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi yükselme zamanı yaklaşık 1sn, oturma zamanı da yaklaşık 2,5 sn'dir. Kalıcı durum hatasını (K_i) ortadan kaldıracak, yükselme zamanını (K_p) kısaltacak, yatışma zamanını (K_d) azaltacak şekilde denetleyiciyi yeniden tasarlayalım.



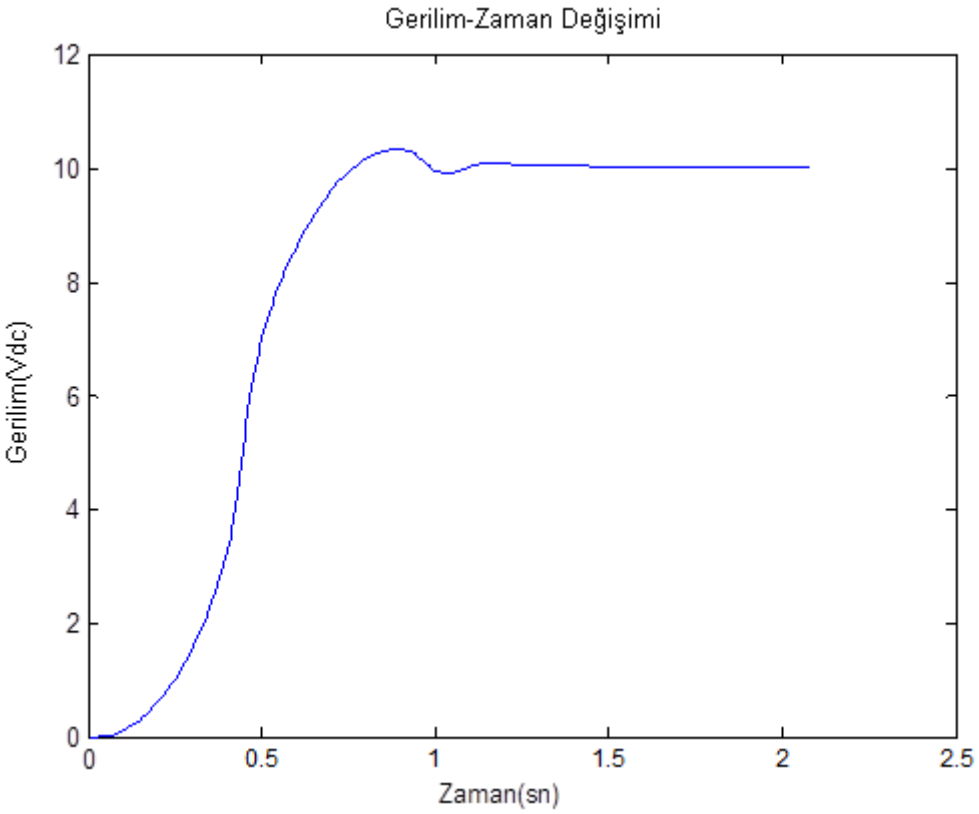
Şekil 4.9. $K_p = 13{,}20 - K_i = 50{,}8581 - K_d = 0{,}9952$ *için Sistem Cevabı*

Şekil 4.7.'de verilen sistemde K_i ve K_d değerlerini değiştirmeden K_p'nin değerini değiştirdiğimizde ($K_p = 13{,}20$), Şekil 4.9.'da görüldüğü gibi oturma zamanı 2,5 sn'den yaklaşık 2,0 sn'ye % 20 oranında azalmaktadır.



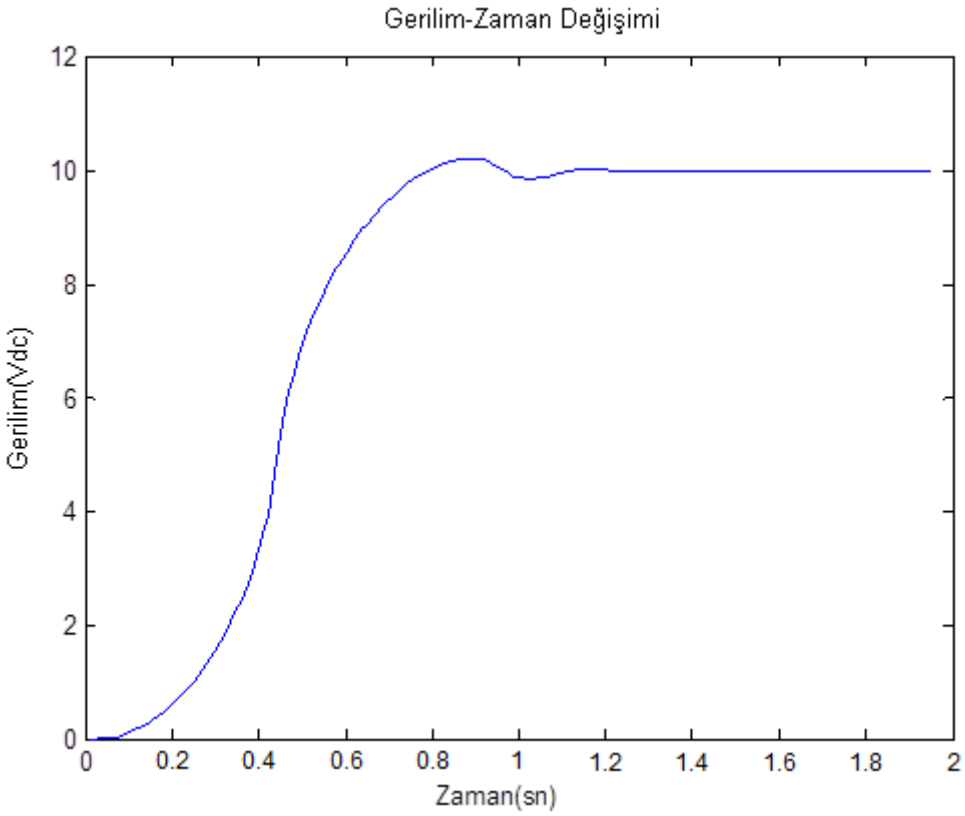
Şekil 4.10. $K_p = 13{,}20 - K_i = 5{,}70 - K_d = 0{,}9952$ *için Sistem Cevabı*

Şekil 4.7.'de verilen sistemde K_p ve K_d değerlerini değiştirmeden K_i'nin değerini değiştirdiğimizde ($K_i = 5{,}70$), çıkışın en son değeri 11,8 volt olmaktadır. Bu da % 18'lik bir kalıcı durum hatası oluşturmaktadır. Yükselme zamanı yaklaşık 0,7 sn, oturma zamanı da yaklaşık 1,3 sn'dir. Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi oturma zamanı 2,5 sn'den 1,3 sn'ye yaklaşık % 50 oranında azalmaktadır.



Şekil 4.11. $K_p = 13{,}20 - K_i = 5{,}7 - K_d = 1{,}47$ *için Sistem Cevabı*

Şekil 4.7.'de verilen sistemde K_p ve K_i değerlerini değiştirmeden K_d'nin değerini değiştirdiğimizde ($K_d = 1{,}47$), çıkışın en son değeri 10,3 volt olmaktadır. Bu da % 3'lük bir kalıcı durum hatası oluşturmaktadır. Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi yükselme zamanı yaklaşık 0,9 sn, oturma zamanı da yaklaşık 1,3 sn'dir.



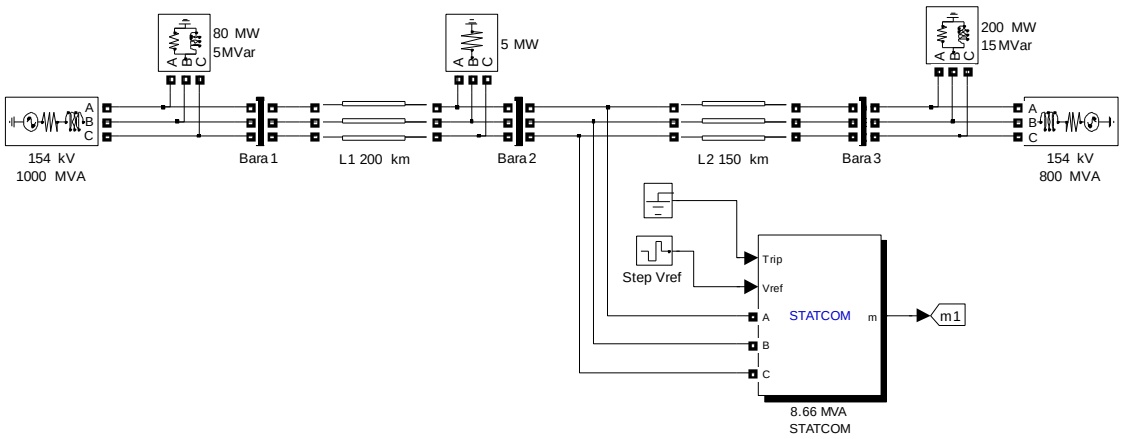
Şekil 4.12. $K_p = 13{,}00 - K_i = 5{,}00 - K_d = 1{,}47$ *için Sistem Cevabı*

Şekil 4.7.'de verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığında çıkışın en son değeri 10,1 volt olmaktadır. Bu da % 1'lik bir kalıcı durum hatası oluşturmaktadır. Yükselme zamanı yaklaşık 0,8 sn, oturma zamanı da yaklaşık 1,2 sn'dir. Şekil 4.12.'de görüldüğü gibi K_p, K_i ve K_d kazanç katsayılarında yapılan değişiklikler, basamak cevabı için tüm tasarım kriterlerini karşılamaktadır. Sistem yaklaşık 1,2sn içinde istenen basamak cevabına, kalıcı durum hatasını (K_i) ortadan kaldıracak, yükselme zamanını (K_p) kısaltacak, yatışma zamanını (K_d) azaltacak şekilde tasarlanmıştır.

4.2. Uygulama–2:

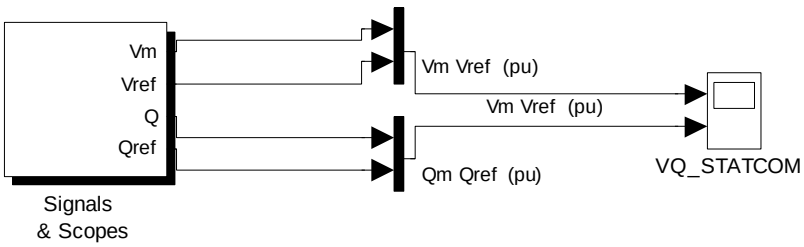
Statcomun PID kontrolör ile kontrolünün iletim hattında uygulanması modelinin Matlab-Simulinkte tasarımı.

Simülasyonu yapılan sistem Şekil 4.13.'te görülmektedir. Önerilen sistemde 1000 MVA'lık ve 800 MVA'lık 154 kV, 60 Hz'lik iki adet generatörün ürettiği güç iletim hattından yüklere aktarılmaktadır. Yük olarak 80MW 5 MVAr'lık bir A şehri, 5MW'lık bir tesis ve 200MW 15MVAr'lık bir B şehri bulunmaktadır. Generatör-1'den üretilen 154 kV'luk gerilim, A şehri, 200 Km'lik iletim hattı ve tesisten sonra STATCOM' a paralel bağlanmaktadır. Generatör-2'den üretilen 154 kV'luk gerilim ise B şehri ve 150 Km'lik iletim hattından sonra STATCOM'a bağlanmaktadır.

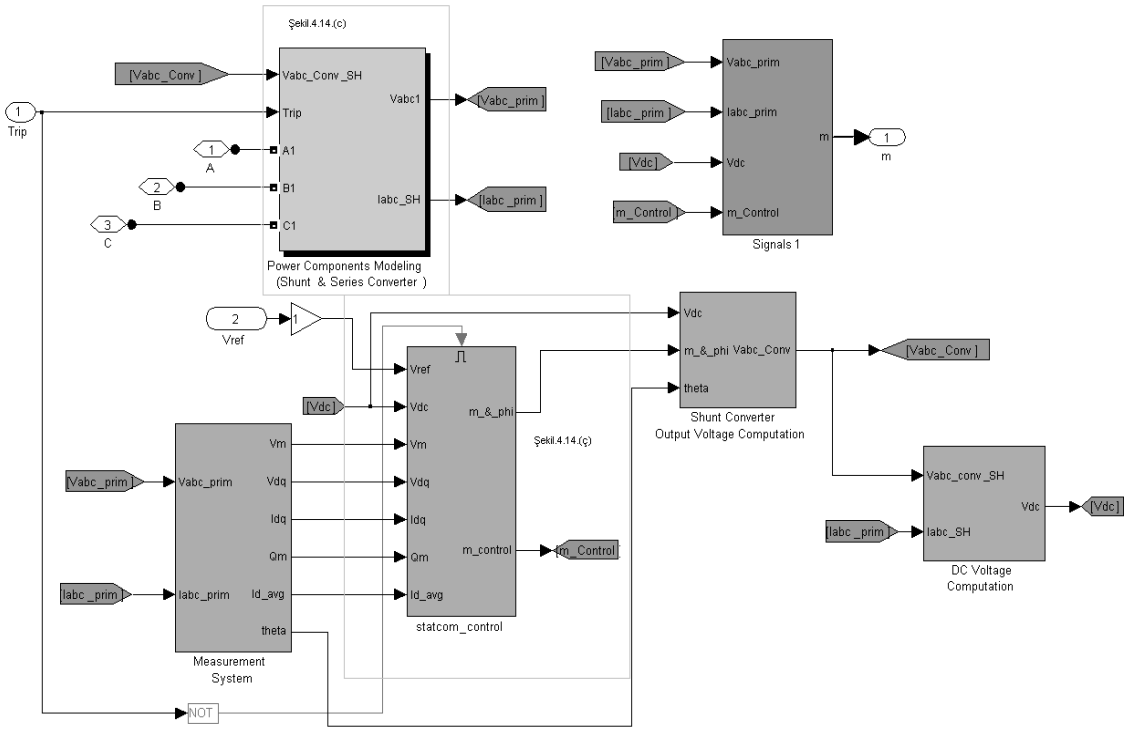


Şekil 4.13. Simülasyonu Yapılan Sistem

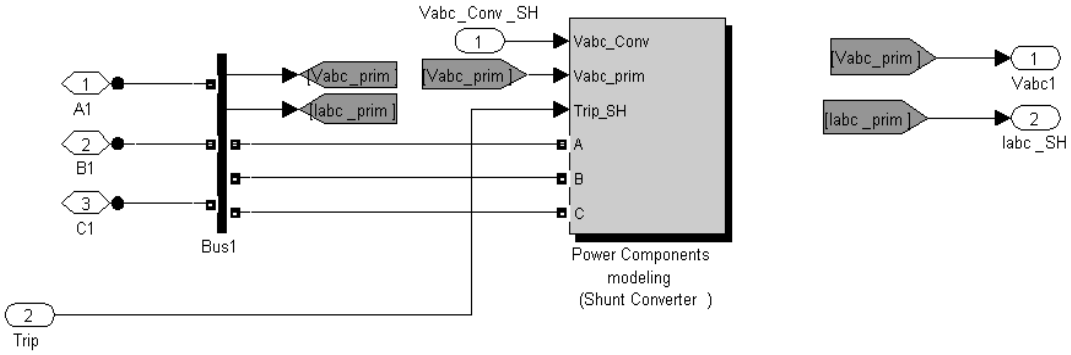
Simülasyonu yapılan sisteme ait ölçüm bloğu ise Şekil 4.14.'te verilmiştir.



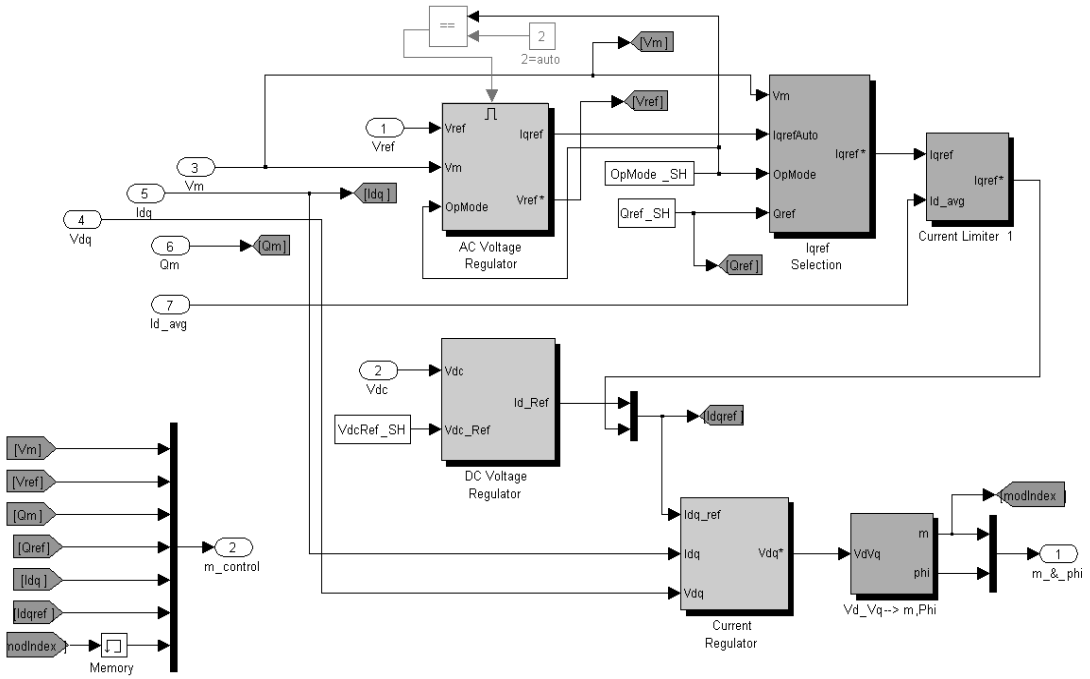
Şekil 4.14.(a) Simülasyonu Yapılan Sistemin Ölçüm Bloğu



Şekil 4.14.(b) Simülasyonu Yapılan Sistemin STATCOM Bloğu



Şekil 4.14.(c) STATCOM'un Güç Bileşenleri Bloğu



Şekil 4.14.(ç) Simülasyonu Yapılan Sistemin STATCOM Kontrol Bloğu

Şekil 4.14.(b)'de verilen STATCOM devresinin çalışmasının incelersek; STATCOM bağlı olduğu baradan aldığı sisteme ait gerilim ve akım değerlerini (V_{abc_prim} ve I_{abc_prim}) sistem için gerekli voltaj regülasyonunu sağlamak için referans voltaj (V_{ref}) değeriyle karşılaştırmakta, sistemde meydana gelebilecek gerilim düşmesi yada artması durumlarında, sistem için olması gereken STATCOM çıkış gerilimini sağlayabilmek için gerekli olan V_{dc} gerilimini hesaplamaktadır. Hesaplanan V_{dc} gerilimi *DC-AC* dönüştürücü ile $V_{abcconv}$ STATCOM çıkış gerilimini oluşturmaktadır. STATCOM $V_{abcconv}$ gerilimi ile şebekeden ölçtüğü V_{abc_prim} ve I_{abc_prim} (Şekil 4.14.(c)) değerlerini karşılaştırarak bağlı olduğu barada gerekli voltaj regülasyonunu sağlamaktadır. STATCOM'un sistemin kontrol edilmesinde kullandığı hesaplanan çıkış değerleri Şekil 4.14.(ç)'den elde edilerek osiloskopa aktarılmaktadır.

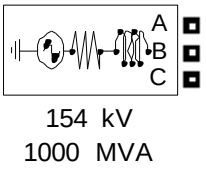
Sistemdeki STATCOM PID denetleyici ile kontrol edilerek tasarlanmıştır. Kullanılan STATCOM bloğu Matlab/Simulink ortamındaki hazır blok olup, denetleyici olarak bu bloğun içerisindeki mevcut PID kontrolör kullanılmıştır. Sistemde kullanılan Matlab/Simulink ortamındaki bloklar STATCOM için geliştirilmiştir. Sistemin simülasyonu sırasında değişimleri daha iyi görebilmek için bir adet step fonksiyon bloğu kullanılmıştır. Taban değer olarak 1 pu değerine oturması istenen sistemin 0 0.2 0.4 0.6. ve 0.8. saniyelerinde referans değerler sırasıyla 1, 0.97, 1.03, 1, 1 değerlerine değiştirilmiştir. Bu değişime göre sistemin tepkisi incelenmiştir.

4.2.1. Sistemde kullanılan bloklar

4.2.1.1. Generatör-1 bloğu

Parametreler

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $Görünür\ Güç$: $1000\ MVA$

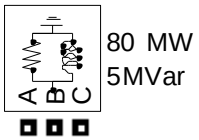


Şekil 4.15. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Generatör-1bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.2. Yük-1 bloğu

Parametreler

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $Aktif\ Güç$: $80\ MWatt$
- $Reaktif\ İndüktif\ Güç$: $5\ MVar$
- $Reaktif\ Kapasitif\ Güç$: $0\ MVar$

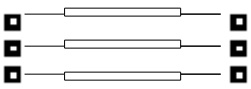


Şekil 4.16. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Yük-1Bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.3. L1 iletim hattı bloğu

Parametreler

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Faz\ sayısı$: 3
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $İletim\ hattı\ uzunluğu$: $200\ Km$

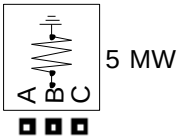


Şekil 4.17. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait L1 İletim Hattı Bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.4. Yük-2 bloğu

Parametreler

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $Aktif\ Güç$: $5\ MWatt$
- $Reaktif\ İndüktif\ Güç$: $0\ MVar$
- $Reaktif\ Kapasitif\ Güç$: $0\ MVar$

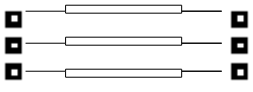


Şekil 4.18. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Yük-2 Bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.5. L2 iletim hattı bloğu

Parametreler

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Faz\ sayısı$: 3
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $İletim\ hattı\ uzunluğu$: $150\ Km$

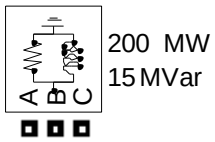


Şekil 4.19. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait L2 İletim Hattı Bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.6. Yük-3 bloğu

Parametreler

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $Aktif\ Güç$: $200\ MWatt$
- $Reaktif\ İndüktif\ Güç$: $15\ MVar$
- $Reaktif\ Kapasitif\ Güç$: $0\ MVar$

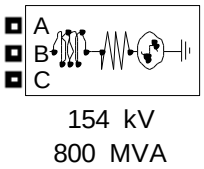


Şekil 4.20. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Yük-3 Bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.7. Generatör-2 bloğu

Parametreler

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $Görünür\ Güç$: $800\ MVA$



Şekil 4.21. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Generatör-2 Bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.8. Ground bloğu



Şekil 4.22. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Ground Bloğu

4.2.1.9. Step Vref bloğu

Parametreler

- $Zaman\ (s)$: [0 0.2 0.4 0.6 0.8]
- $Genlik$: [1 0.97 1.03 1 1]



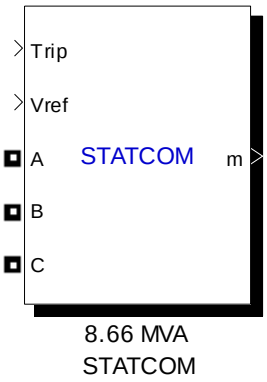
Şekil 4.23. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait Step Bloğu ve Parametre Değerleri

4.2.1.10. Statcom bloğu

Parametreler

Statcom Güç Verileri

- $Voltaj(3faz)$: $154\ kV$
- $Frekans$: $60\ Hz$
- $Stacom\ Gücü$: $8{,}66\ MVA$
- $DC\ voltaj$: $340000\ V$
- $Kapasitans\ Değeri$: $400\mu F$



Voltaj Regülâsyonu Kontrol Verileri (PID)

- AC Voltaj regülasyon Kazancı : $(K_p = 5, K_i = 1000)$
- DC Voltaj regülasyon Kazancı : $(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
- Akım regülasyon Kazancı : $(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$

Reaktif Güç Kontrol Verileri (PID)

- DC Voltaj regülasyon Kazancı : $(K_p = 0{,}0001,\ K_i\ 0{,}02)$
- Akım regülasyon Kazancı : $(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ , K_d = 0{,}22)$

Şekil 4.24. Simülasyonu Yapılan Sisteme ait STATCOM Bloğu ve Güç Parametre Değerleri

4.2.2. Sistem için hesaplanan STATCOM parametreleri

STATCOM'da güç hesaplamaları için V_{dc} gerilim sabit kabul edilerek m_a modülasyon indeksinin değiştirilmesiyle inverterin AC çıkış geriliminin genliği hesaplanmaktadır. Sistemin m_a modülasyon indeksi değişimi, STATCOM için çalışma durumlarına göre 3 şekilde belirlenir. m_a hesaplamalarda $0 < m_a < 1$ aralığında, aritmetik artış oranında ve $m_{aind} < m_{astndby} < m_{acap}$ orantısında seçilmektedir. m_a stand by durumunda genellikle 0,75 civarında alınmaktadır.

$m_{astndby} = 0{,}74$ olarak alınırsa,

$m_{aind} < m_{astndby} < m_{acap} = 0{,}63 < 0{,}74 < 0{,}85$ olarak seçilebilir.

STATCOM V_{dc} gerilimi 7.1, 7.2 ve 7.3 te verilen bağıntılara göre hesaplanmaktadır.

Burada;

V_s = Şebeke gerilimi

V_{dc} = DC Şebeke gerilimi

V_{ef} = Efektif hat gerilimi

m_a = Modülasyon indeksi

V_h = Hat gerilimi

$$V_h = \frac{V_s}{\sqrt{3}} = \frac{154000}{\sqrt{3}} = 88914\ V \quad (4.15)$$

$$V_{ef} = V_h . \sqrt{2} = 88914 . \sqrt{2} = 125742\ V \quad (4.16)$$

$$V_{dc} = \frac{V_{ef}}{m_a} . 2 = \frac{125742}{0.74} . 2 = 339845\ V \quad (4.17)$$

olarak bulunur.

STATCOM da V_{inv} gerilimi sistemde yapılan güç alışverişine göre 3 şekilde ve 4.18, 4.19'da verilen bağıntılarla hesaplanmaktadır.

V_{inv} gerilimi hesabı için $V_{dc} = 340000\ V$ seçilebilir.

$$V_{inv} = \frac{V_{ef}}{\sqrt{2}} . \sqrt{3} \quad (4.18)$$

$$V_{ef} = \frac{V_{dc} . m_a}{2} \quad (4.19)$$

STATCOM'un şebekedeki çalışma durumuna göre inverter gerilimi hesaplanırsa;

- Standby Durumunda : $Vs = Vinv$ ise

$$V_{ef} = \frac{V_{dc}.m_{astndby}}{2} = \frac{340000.0,74}{2} = 125800\ V \quad (4.20)$$

$$V_{inv} = \frac{V_{ef}}{\sqrt{2}}.\sqrt{3} = \frac{125800}{\sqrt{2}}.\sqrt{3} = 154069\ V \quad (4.21)$$

olarak bulunur.

- STATCOM Endüktif Durumda : $Vs > Vinv$ ise

$$V_{ef} = \frac{V_{dc}.m_{aend}}{2} = \frac{340000.0,66}{2} = 112200\ V \quad (4.22)$$

$$V_{inv} = \frac{V_{ef}}{\sqrt{2}}.\sqrt{3} = \frac{112200}{\sqrt{2}}.\sqrt{3} = 137413\ V \quad (4.23)$$

olarak bulunur.

- STATCOM Kapasitif Durumda : $Vs < Vinv$ ise

$$V_{ef} = \frac{V_{dc}.m_{acap}}{2} = \frac{340000.0,82}{2} = 139400\ V \quad (4.24)$$

$$V_{inv} = \frac{V_{ef}}{\sqrt{2}}.\sqrt{3} = \frac{139400}{\sqrt{2}}.\sqrt{3} = 170726\ V \quad (4.25)$$

olarak bulunur.

STATCOM'da güç hesabı 4.26'da verilen bağıntıya göre hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{V_S.V_{inv}.cos\alpha - {V_S}^2}{X} \quad (4.26)$$

olup burada;

Q = STATCOM Reaktif Gücü

V_s = Şebeke gerilimi

V_{inv} = İnverter çıkış gerilimi

X = Hattın Reaktansı (STATCOM eş değer devresinde hat reaktansı yaklaşık olarak 0,8-1,0 arasında değer alır.)

α = Gerilimler arası faz farkı (Kapasitör uç geriliminin sürekliliğinin sağlanması için trafo, evirici ve kapasitör etkin güç kayıplarının karşılanması zorunludur. Bu yüzden α açısı gerçek uygulamalarda 0.1°-2° arasında tutularak gerilimin devamlılığı sağlanır.)

STATCOM reaktif gücü (Standby Durumu için)

V_s = Şebeke gerilimi $= 154$ kV

V_{inv} = İnverter çıkış gerilimi $= 154069$ V

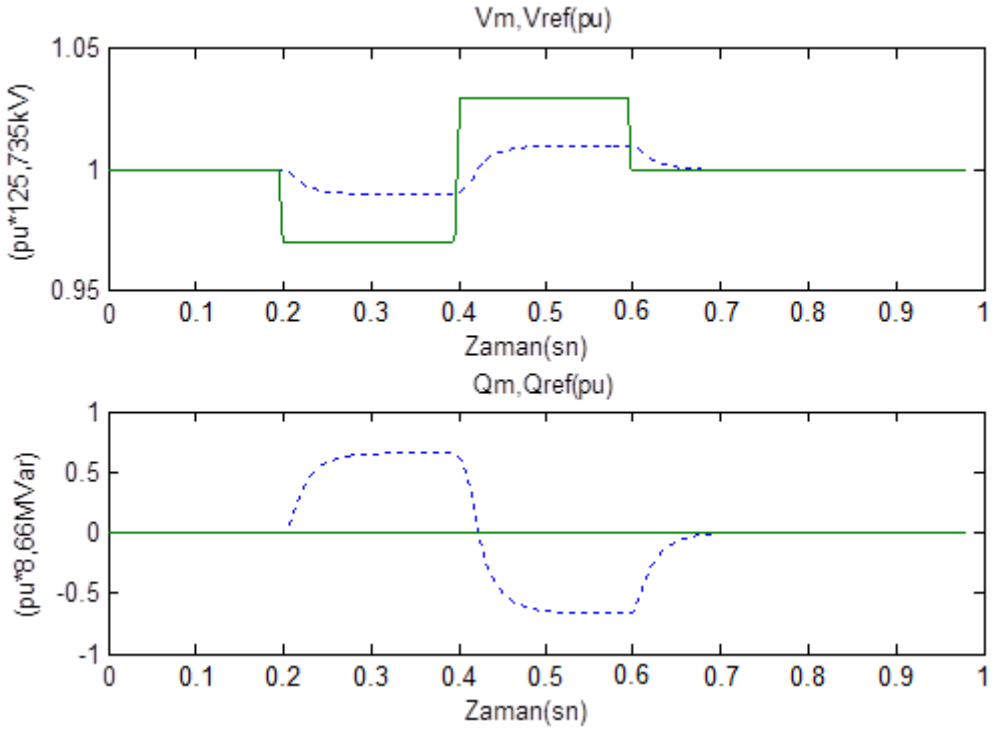
X = Hattın Reaktansı $= 0.80$

α = Gerilimler arası faz farkı $= 1^{o}$

$$Q = \frac{V_s.V_{inv}.cos\alpha - {V_s}^2}{X} = \frac{154000.154069 - 154000^2}{0{,}80} = 8{,}66\ MVAr \qquad (4.27)$$

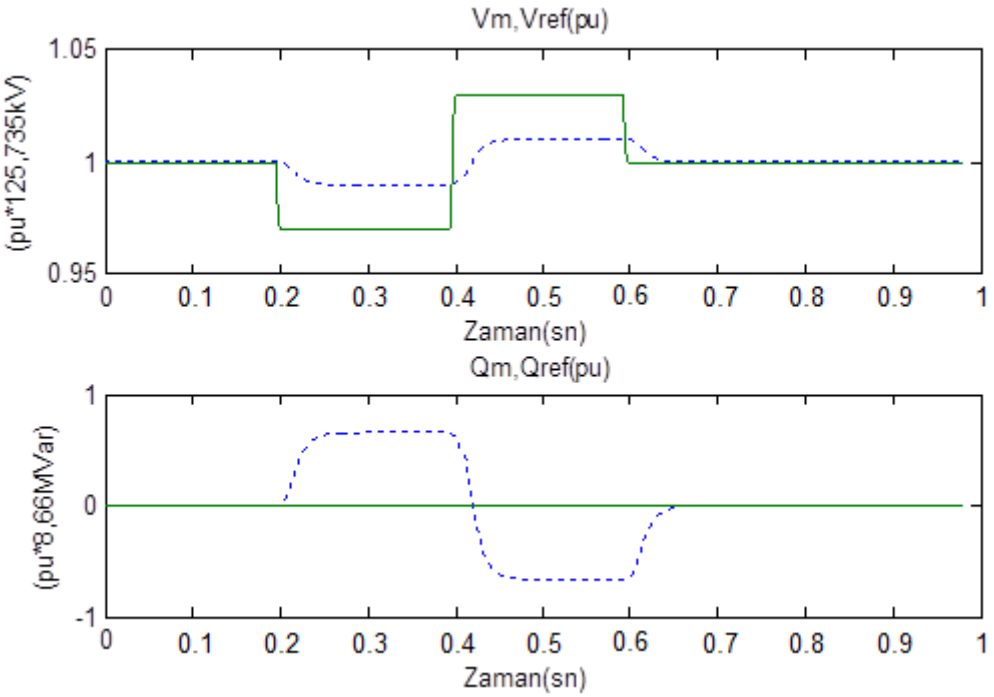
olarak hesaplanır.

Uygulama-2 de verilen sistem için yukarıda hesaplanan değerler STATCOM parametrelerinde yerine konduğunda elde edilen osiloskop çıkışları Şekil 4.25.'te verilmiştir.

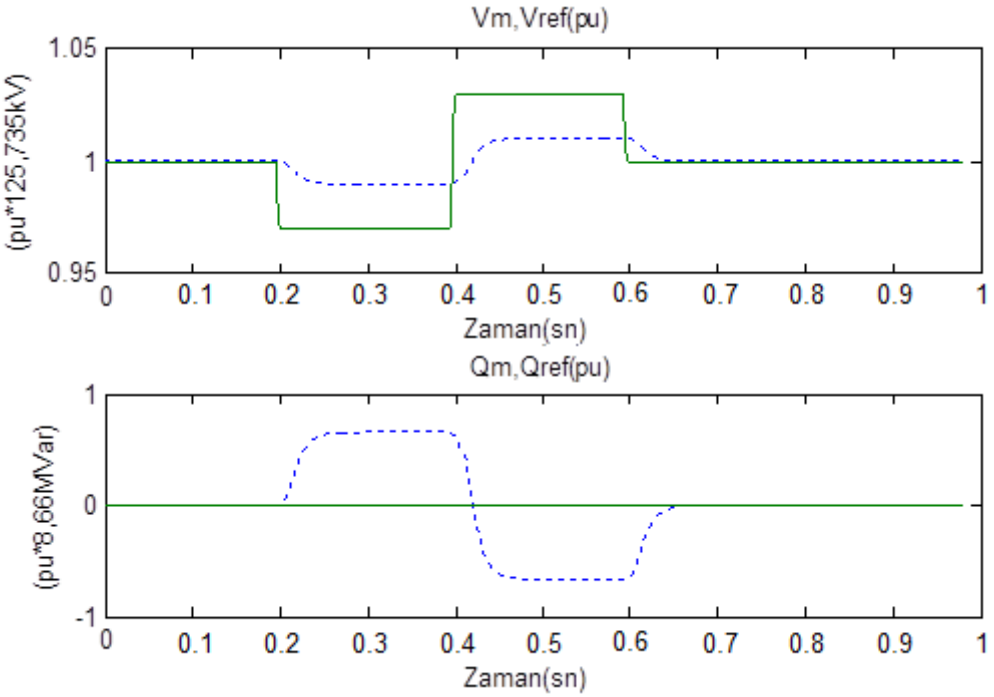


Şekil 4.25. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1000)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*

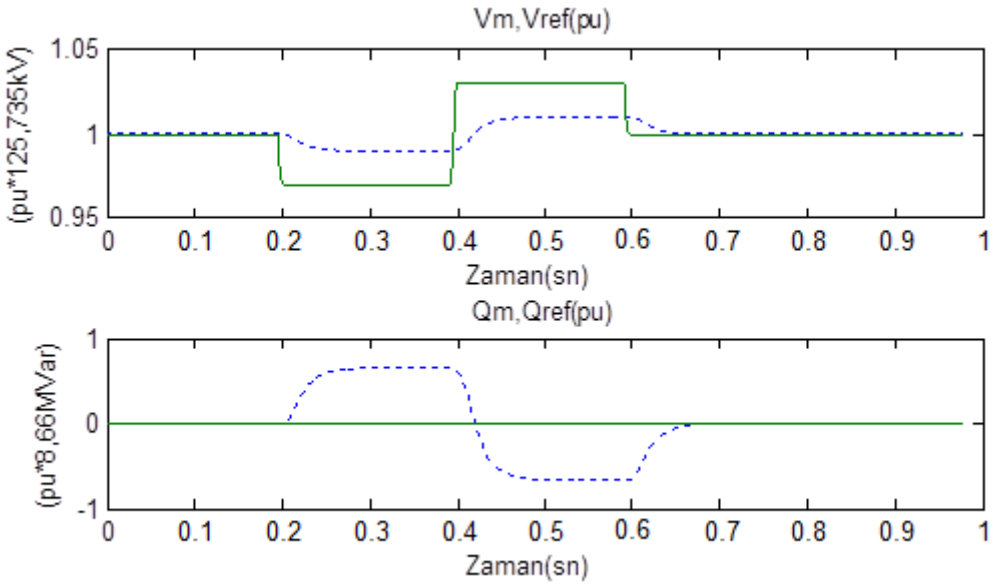
Şekil 4.13.'te verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığı anda Şekil 4.25.'te görüldüğü gibi 0,2-0,4 sn arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden küçüktür. Bu durumda reaktif akım şebekeden STATCOM'a aktarılmaktadır. STATCOM şebekeden reaktif endüktif güç çekmektedir yani STATCOM endüktiftir. 0,4-0,6 s arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden büyüktür. Bu durumda reaktif akım STATCOM'dan şebekeye aktarılmaktadır. STATCOM'dan şebekeye reaktif kapasitif güç aktarılmaktadır, yani STATCOM kapasitiftir. Şekil 4.25.'teki osiloskop çıkışında görüldüğü gibi STATCOM kontrolü için kullanılan PID parametrelerinde yapılan ayarlamalarla, 0,2-0,4 s arasında STATCOM gerilimi 0,97 pu değerinden 0,99 pu değerine çıkmıştır. 0,4-0,6 s arasında ise STATCOM gerilimi 1,03 pu değerinden 1,01 pu değerine azalmıştır. STATCOM için voltaj regülasyonununun daha da iyi sağlanabilmesi için PID parametrelerinde değişiklikler yaparak STATCOM'un tepkisini yeniden incelediğimizde Şekil 4.26-27-28-29.'daki sistem cevabı elde edilmiştir.



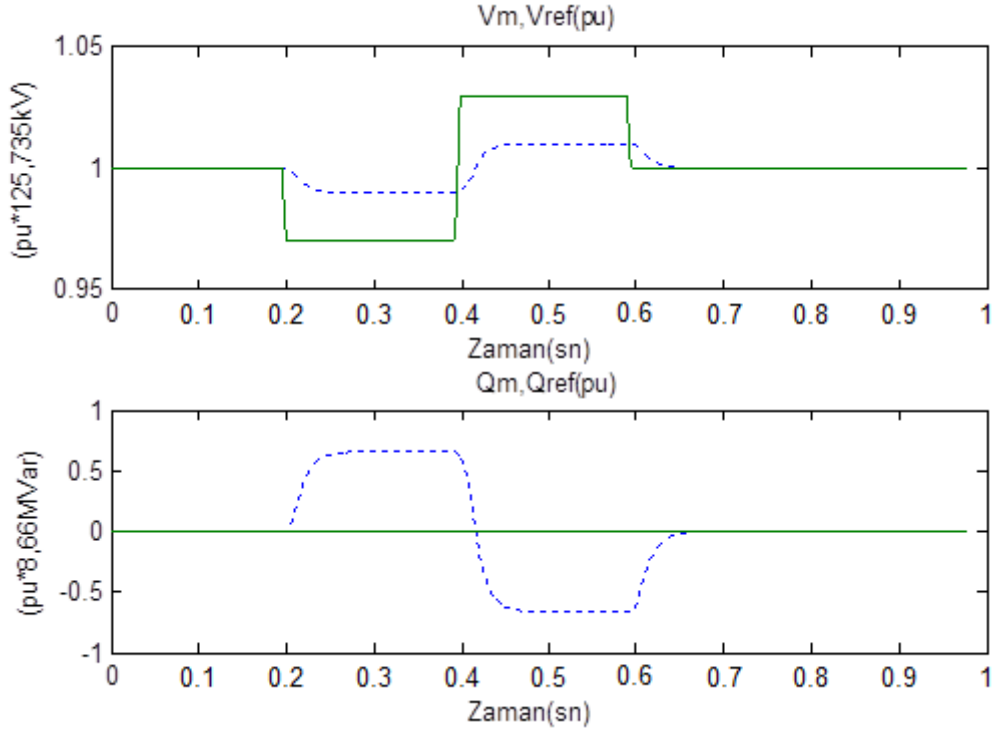
Şekil 4.26. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 2,\ K_i = 1300)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}17)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevab*



Şekil 4.27. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 3,\ K_i = 1500)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*



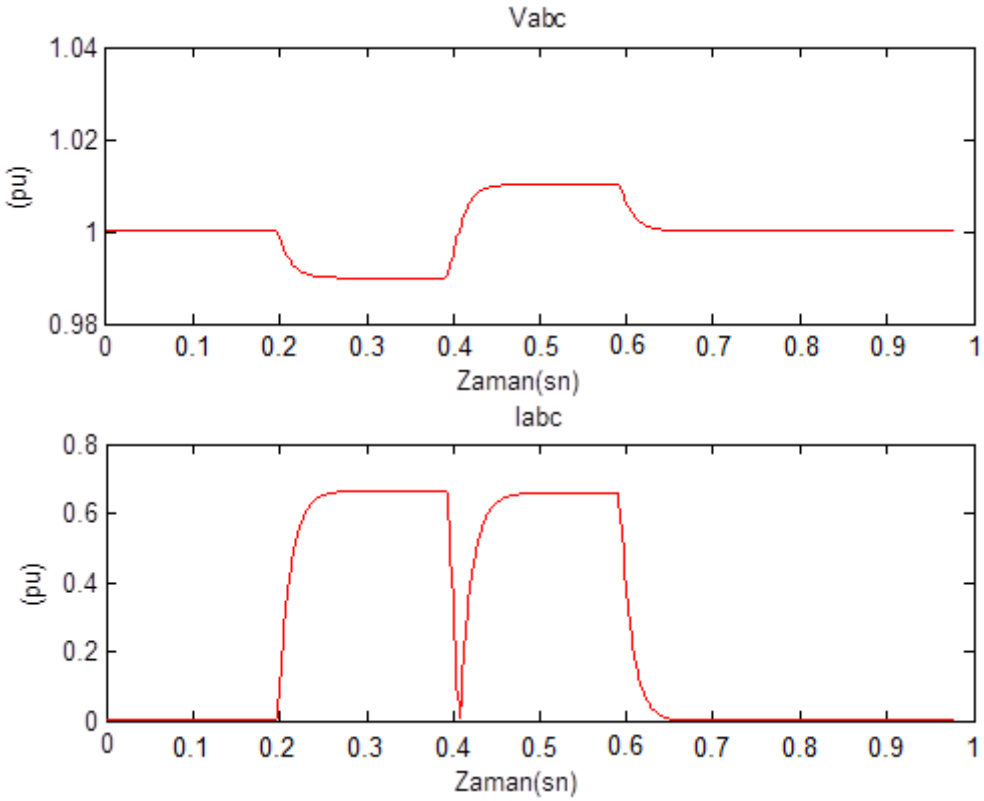
Şekil 4.28. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 2,\ K_i = 1000)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*



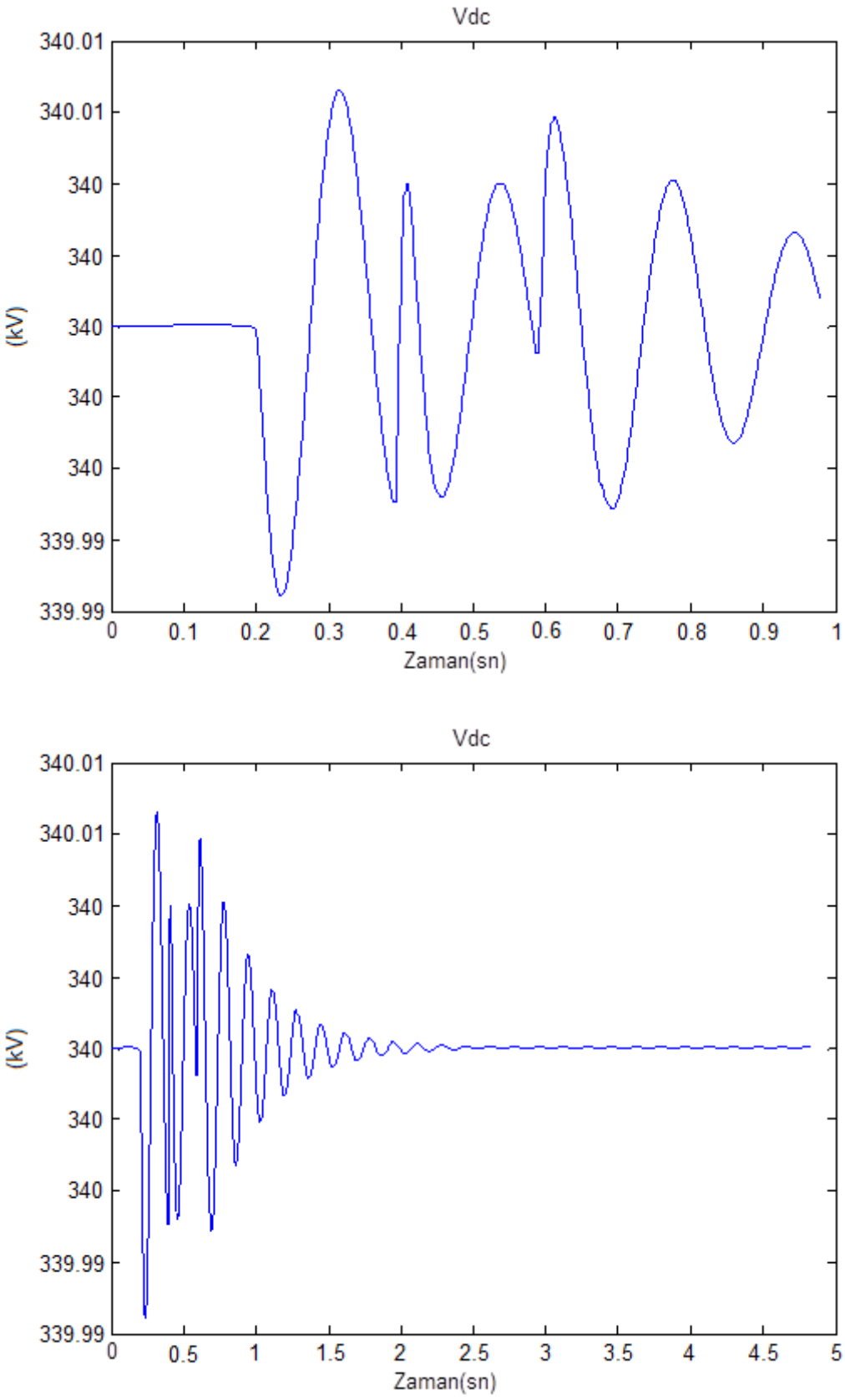
Şekil 4.29. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1400)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*

Şekil 4.13.'te verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığı anda Şekil 4.25-26-27-28-29.'da görüldüğü gibi 0,2-0,4 sn arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden küçüktür. Bu durumda reaktif akım şebekeden STATCOM'a aktarılmaktadır. STATCOM şebekeden reaktif endüktif güç çekmektedir yani STATCOM endüktiftir. 0,4-0,6 sn arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden büyüktür. Bu durumda reaktif akım STATCOM'dan şebekeye aktarılmaktadır. STATCOM'dan şebekeye reaktif kapasitif güç aktarılmaktadır, yani STATCOM kapasitiftir. Şekil 4.29.'daki osiloskop çıkışında görüldüğü gibi STATCOM kontrolü için kullanılan PID parametrelerinde yapılan ayarlamalarla, 0,2-0,4 s arasında STATCOM gerilimi 0,97 pu değerinden 0,99 pu değerine çıkmıştır. 0,4-0,6 s arasında ise STATCOM gerilimi 1,03 pu değerinden 1,01 pu değerine azalmıştır. Sistem için istenilen voltaj regülasyonu birim basamak girişi için ±0,01 pu oranında sağlanmıştır. Yani 0,03 pu luk bir voltaj dalgalanması STATCOM tarafından yaklaşık % 66,66 oranında düzeltilmiştir.

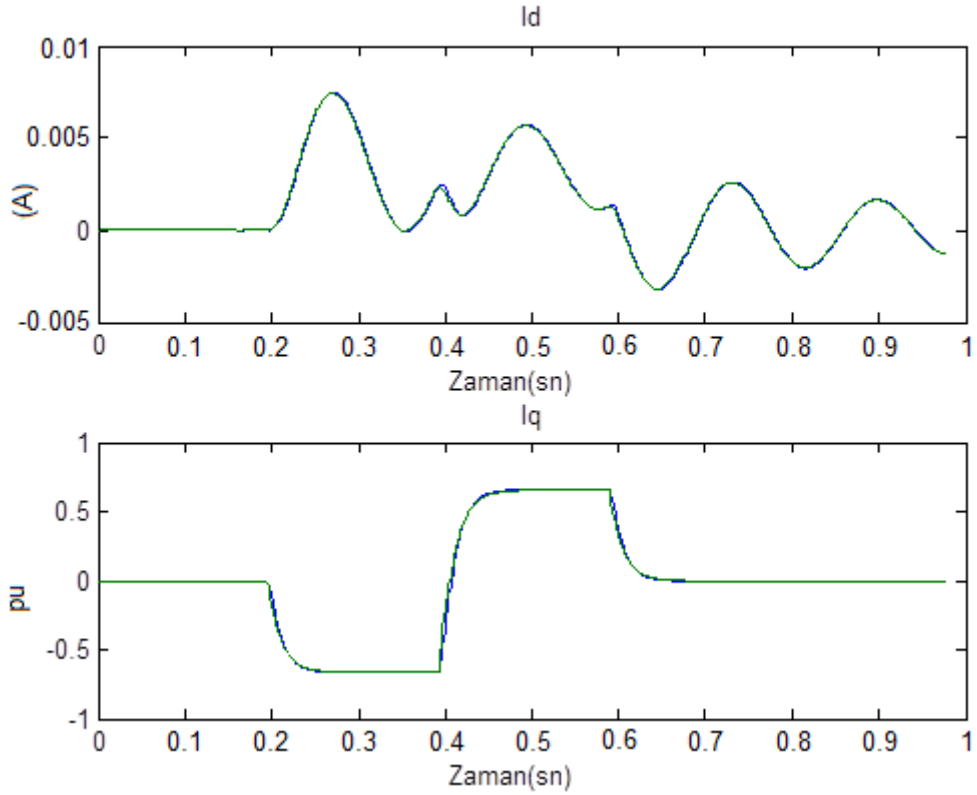
Sistemin ayarlanan PID parametreleri için elde edilen akım-gerilim-modülasyon indeksi değişimleri ise Şekil 4.30-31-32-33.'deki gibidir.



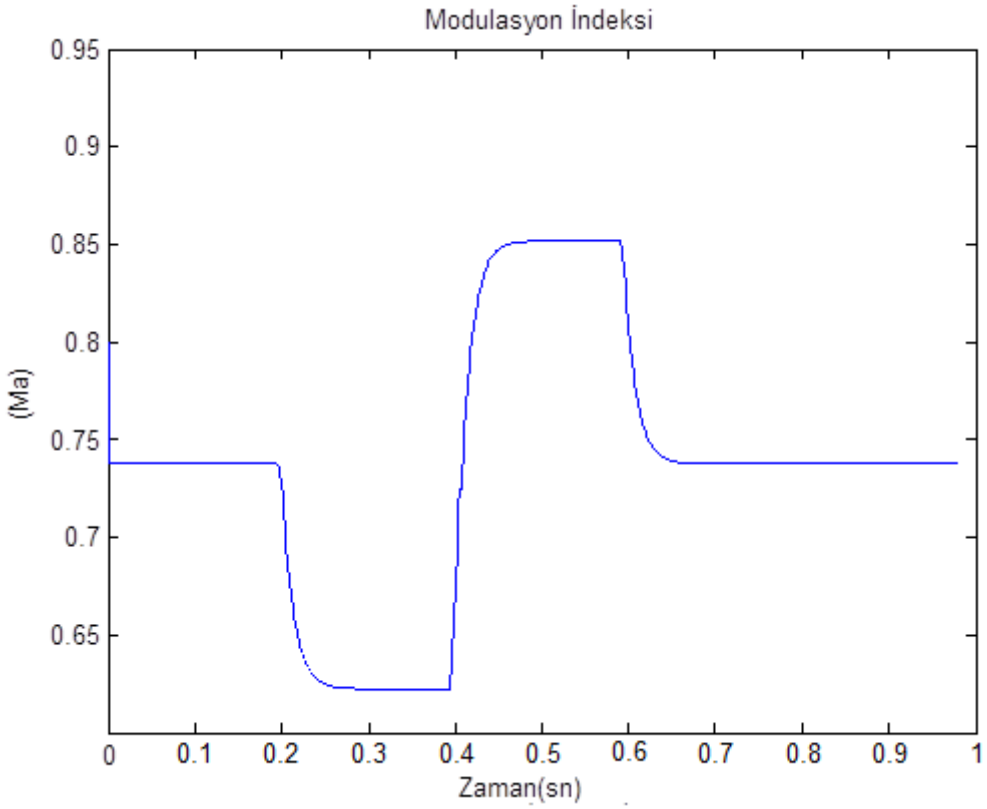
Şekil 4.30. V_{abc} ve I_{abc} Değişimleri



Şekil 4.31. V_{dc} Değişimi



Şekil 4.32. I_d ve I_q Değişimi



Şekil 4.33. m_a Değişimi

- Uygulama-2 ve Şekil 4.13.'te verilen sistem için hesaplanan devre parametreleri yerine konduğunda sistemin verilen referans değerlerine karşı gösterdiği tepki Şekil 4.25-26-27-28-29.'da verilmiştir. Şekil 4.25.'te elde edilen $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ değerleri için STATCOM devresindeki PID parametrelerinde yapılan değişimlerle sistem voltaj regülâsyonunu % ±3 gerilim dalgalanması için % 66,66 oranında sağlamaktadır.
- Benzetimden elde edilen sonuçlara bakıldığında; Şekil 4.25-26-27-28-29.'da, V_{ref} değerine ve zamana bağlı olarak verilen pu değerlerine karşın, STATCOM devresindeki inverterin, yükün durumuna göre sistemde voltaj regülâsyonu için verilen tepkiyi karşıladığı görülmektedir.
- STATCOM'da DC gerilim sabit olduğu için inverter çıkış geriliminin temel bileşeninin genliği, PID parametreleri değiştirilerek ayarlanır. Şekil 4.25-26-27-28-29.'da görüldüğü gibi benzetim devresindeki STATCOM'un kontrolünü sağlayan PID kontrolörde gerekli ayarlamalar yapılarak, V_{ref} değerine ve zamana bağlı olarak, verilen pu değerlerine göre, STATCOM'un indüktif çalışması için, 0.2-0.4 s aralığında m_a'yı azaltmıştır. Benzer şekilde STATCOM'un kapasitif çalışması için 0.4-0.6 s aralığında m_a'yı arttırmıştır. m_a'daki değişmelere bağlı olarak STATCOM için gerekli voltaj regülâsyonu sağlanabilmektedir.
- Simülasyonu yapılan sistemden elde edilen değer parametrelerini incelediğimizde; Tablo 4.2'de generatör-1 bloğu, generatör-2 bloğu ve yük bloklarının nominal akım değerleri verilmiştir. Tablo 4.3'te bara1, bara2, bara3 ve STATCOM bloğunda ölçülen gerilim değişmelerini incelediğimizde bara1 ve bara3'te oluşan voltaj değişimlerine karşın STATCOM'un bara2'ye bağlı yük için gerekli voltaj regülasyonunu sağladığı görülmektedir. Tablo 4.4'te bara1, bara2, bara3 ve STATCOM bloğundan çekilen akımları, Tablo 4.5'te iletim hattında oluşan gerilim değerlerini, Tablo 4.6'da iletim hattında oluşan akım değerlerini, Tablo 4.7'de yük ve kaynak akımının sistemin çalışması sırasındaki değerleri verilmiştir.

Simülasyonu yapılan sistemden elde edilen değerler Tablo 4.2-3-4-5-6-7'deki gibidir.

Tablo 4.2 Yük ve kaynak akımı nominal değerleri

1	phase_A	200 MW	15MVAr	78.06 A	-102.37°
2	phase_B	200 MW	15MVAr	78.06 A	137.63°
3	phase_C	200 MW	15MVAr	78.06 A	17.63°
4	phase_A	80 MW	5MVAr	25.75 A	-96.18°
5	phase_B	80 MW	5MVAr	25.75 A	143.82°
6	phase_C	80 MW	5MVAr	25.75 A	23.82°
7	phase_A	154 kV	800 MVA	939.40 A	-11.82°
8	phase_B	154 kV	800 MVA	939.40 A	-131.82°
9	phase_C	154 kV	800 MVA	939.40 A	108.18°
10	phase_A	154 kV	1000 MVA	550.70 A	3.62°
11	phase_B	154 kV	1000 MVA	550.70 A	-116.38°
12	phase_C	154 kV	1000 MVA	550.70 A	123.62°

Tablo 4.3 Bara ve STATCOM gerilim değerleri

1	Bara3/Va	123411.66 V	-12.37°
2	Bara3/Vb	123411.66 V	-132.37°
3	Bara3/Vc	123411.66 V	107.63°
4	Bara2/Va	125760.16 V	-10.15°
5	Bara2/Vb	125760.16 V	-130.15°
6	Bara2/Vc	125760.16 V	109.85°
7	Bara1/Va	122143.17 V	-6.18°
8	Bara1/Vb	122143.17 V	-126.18°
9	Bara1/Vc	122143.17 V	113.82°
10	8.66MVA STATCOM Va	125760.16 V	-10.15°
11	8.66MVA STATCOM Vb	125760.16 V	-130.15°
12	8.66MVA STATCOM Vc	125760.16 V	109.85°

Tablo 4.4 Bara ve STATCOM akım değerleri

1	Bara3/Ia	133.73 A	-53.07°
2	Bara3/Ib	133.73 A	-173.07°
3	Bara3/Ic	133.73 A	66.93°
4	Bara2/Ia	99.81 A	-8.37°
5	Bara2/Ib	99.81 A	-128.37°
6	Bara2/Ic	99.81 A	111.63°
7	Bara1/Ia	177.03 A	36.26°
8	Bara1/Ib	177.03 A	-83.74°
9	Bara1/Ic	177.03 A	156.26°

Tablo 4.5 İletim hattı gerilim değerleri

1	U_in_phase_1	L2 150 km	125760.16 V	-10.15°
2	U_in_phase_2	L2 150 km	125760.16 V	-130.15°
3	U_in_phase_3	L2 150 km	125760.16 V	109.85°
4	U_out_phase_1	L2 150 km	123411.66 V	-12.37°
5	U_out_phase_2	L2 150 km	123411.66 V	-132.37°
6	U_out_phase_3	L2 150 km	123411.66 V	107.63°
7	U_in_phase_1	L1 200 km	122143.17 V	-6.18°
8	U_in_phase_2	L1 200 km	122143.17 V	-126.18°
9	U_in_phase_3	L1 200 km	122143.17 V	113.82°
10	U_out_phase_1	L1 200 km	125760.16 V	-10.15°
11	U_out_phase_2	L1 200 km	125760.16 V	-130.15°
12	U_out_phase_3	L1 200 km	125760.16 V	109.85°

Tablo 4.6 İletim hattı akım değerleri

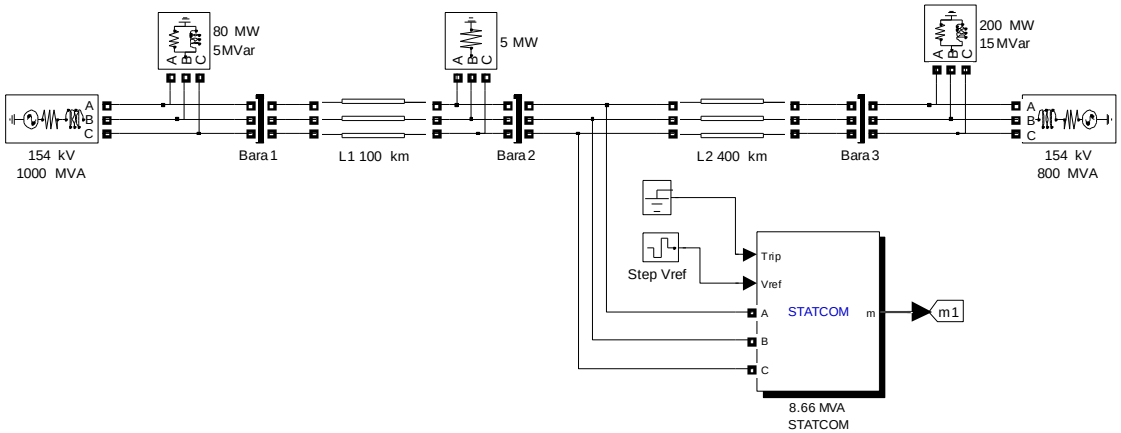
1	I_in_phase_1	L2 150 km	390.21 A	-10.61°
2	I _in_phase_2	L2 150 km	390.21 A	-130.61°
3	I _in_phase_3	L2 150 km	390.21 A	109.39°
4	I _out_phase_1	L2 150 km	588.70 A	-20.89°
5	I _out_phase_2	L2 150 km	588.70 A	-140.89°
6	I _out_phase_3	L2 150 km	588.70 A	99.11°
7	I _in_phase_1	L1 200 km	364.93 A	-25.29°
8	I _in_phase_2	L1 200 km	364.93 A	-145.29°
9	I _in_phase_3	L1 200 km	364.93 A	94.71°
10	I _out_phase_1	L1 200 km	615.83 A	-9.86°
11	I _out_phase_2	L1 200 km	615.83 A	-129.86°
12	I _out_phase_3	L1 200 km	615.83 A	110.14°

Tablo 4.7 Sistem çalıştıktan sonra oluşan yük ve kaynak akımı değerleri

1	phase_A	200 MW	15MVAr	-76.24 A
2	phase_B	200 MW	15MVAr	52.61 A
3	phase_C	200 MW	15MVAr	23.64 A
4	phase_A	80 MW	5MVAr	-25.60 A
5	phase_B	80 MW	5MVAr	15.20 A
6	phase_C	80 MW	5MVAr	10.40 A
7	phase_A	154 kV	800 MVA	-192.35 A
8	phase_B	154 kV	800 MVA	-700.14 A
9	phase_C	154 kV	800 MVA	892.48 A
10	phase_A	154 kV	1000 MVA	34.74 A
11	phase_B	154 kV	1000 MVA	-493.34 A
12	phase_C	154 kV	1000 MVA	458.60 A

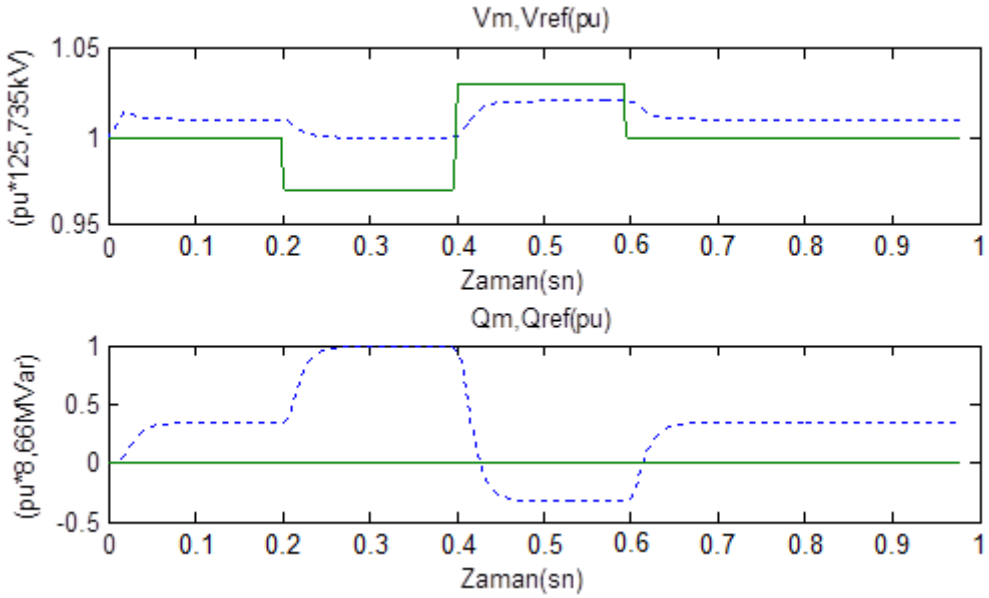
4.3. Uygulama-3:

Şekil 4.13'de verilen sistemde iletim hattı uzunluklarını değiştirerek sistemin tepkisini incelersek; Önerilen sistemde 1000 MVA'lık ve 800 MVA'lık 154 kV, 60 Hz'lik iki adet generatörün ürettiği güç iletim hattından yüklere aktarılmaktadır. Yük olarak 80MW 5 MVAr'lık bir A şehri, 5MW'lık bir tesis ve 200 MW 15 MVAr'lık bir B şehri bulunmaktadır. Generatör-1'den üretilen 154 kV'luk gerilim, A şehri, 100 Km'lik iletim hattı ve tesisten sonra STATCOM'a paralel bağlanmaktadır. Generatör-2'den üretilen 154 kV'luk gerilim ise B şehri ve 400 Km'lik iletim hattından sonra STATCOM'a bağlanmaktadır. Simülasyonu yapılan sistem Şekil 4.34.'te verilmiştir.



Şekil 4.34. Simülasyonu Yapılan Sistemde İletim Hattı Değişikliği

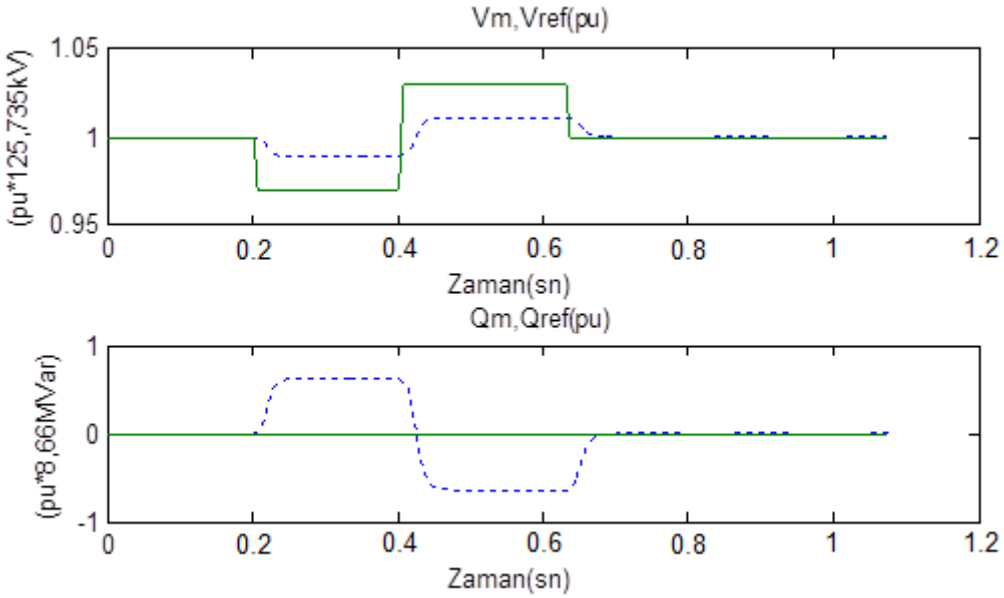
Uygulama-3 ve Şekil 4.34.'te verilen sistemde Uygulama-2'de verilen sistemden sadece iletim hattı uzunluğu değiştirilerek (sistem kayıpları ihmal edilmiştir) STATCOM'un cevabı incelenmiştir. STATCOM blok parametresinde yer alan PID katsayıları değiştirilmeden elde edilen sistem cevabı Şekil 4.35.'te verilmiştir.



Şekil 4.35. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1400)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*

Şekil 4.34.'te verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığı anda Şekil 4.35.'te görüldüğü gibi STATCOM'daki PID parametreleri değiştirilmeden elde edilen sistem cevabı istenilen tepkiyi sağlayamamaktadır. Şekil 4.35.'te görüldüğü gibi sistem cevabı referans gerilim değeri için voltaj regülasyonunu sağlayamamaktadır. 0,0-0,2 s arasında STATCOM geriliminin şebeke gerilimiyle (1 pu) aynı olması gerekirken STATCOM gerilimi şebeke geriliminden büyüktür (1,01 pu). 0,2-0,4 s arasında STATCOM gerilimi şebeke gerilimine eşit durumda olmasına rağmen, 0,4-0,6 s arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminin üzerindedir. Yani STATCOM gerilimi sistem çalışma sınırları içerisinde istenilen tepkiyi sağlamamaktadır. Şekil 4.34.'te verilen sistemde iletim hattı parametrelerinde yapılan değişimler için, sistemin istenilen tepkiyi vermesi ve STATCOM voltaj regülasyonununun daha da iyi

sağlanabilmesi için PID parametrelerinde ve STATCOM parametrelerinde değişiklikler yaparak sistemin tepkisini incelediğimizde,



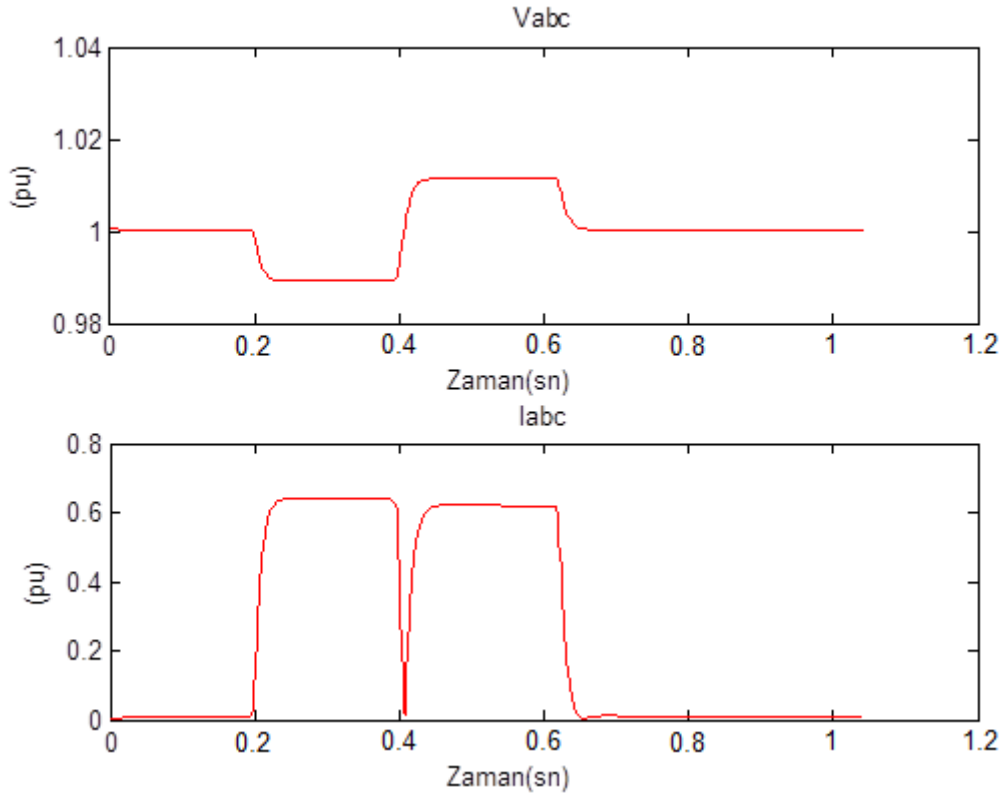
Şekil 4.36. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 8,\ K_i = 2000)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*

Şekil 4.34.'te verilen sistemde iletim hattı parametrelerinde yapılan değişimler için, Şekil 4.36.'da görüldüğü gibi STATCOM'un PID parametrelerinde $K_p = 8,\ K_i = 2000,$ STATCOM gücü $10\ \mathrm{MVA}$ seçilerek ve STATCOM voltaj gerilimi de $154\mathrm{x}1{,}0155\ \mathrm{kV}$ değerine regüle edilerek sistem çıkışının referans şebeke gerilim değerini sürdürmesi sağlanmıştır. Şekil 4.34.'de verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığı anda Şekil 4.36.'da görüldüğü gibi 0,2-0,4 s arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden küçüktür. Bu durumda reaktif akım şebekeden STATCOM'a aktarılmaktadır. STATCOM şebekeden reaktif endüktif güç çekmektedir yani STATCOM endüktiftir. 0,4-0,6 s arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden büyüktür. Bu durumda reaktif akım STATCOM'dan şebekeye aktarılmaktadır. STATCOM'dan şebekeye reaktif kapasitif güç aktarılmaktadır, yani STATCOM kapasitiftir. Şekil 4.36.'daki osiloskop çıkışında görüldüğü gibi STATCOM kontrolü için kullanılan PID parametrelerinde yapılan ayarlamalarla, 0,2-0,4 s arasında STATCOM gerilimi 0,97 pu değerinden 0,989 pu değerine çıkmıştır.

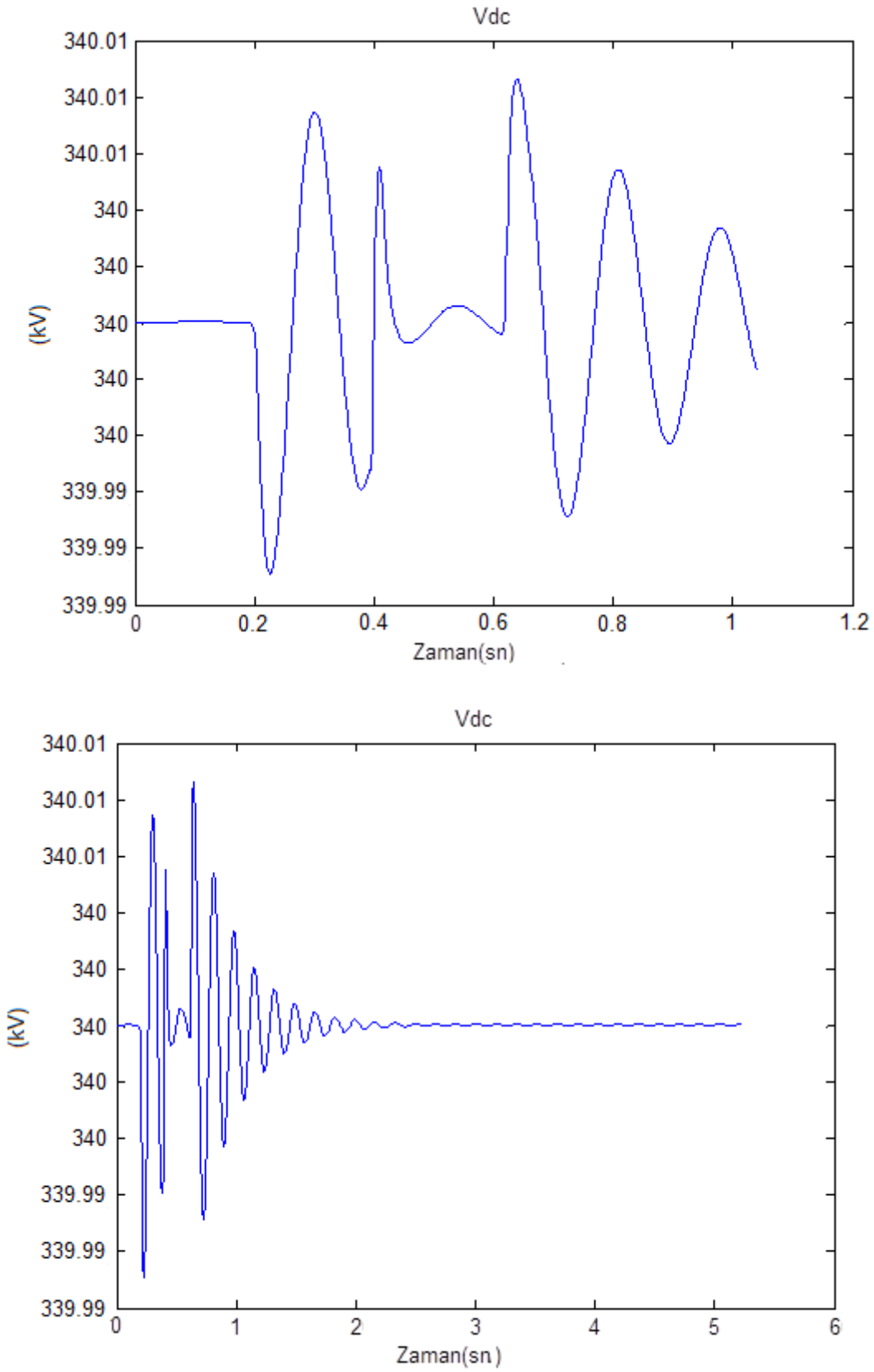
0,4-0,6 s arasında ise STATCOM gerilimi 1,03 pu değerinden 1,011pu değerine azalmıştır.

Sistem için istenilen voltaj regülasyonu birim basamak girişi için ±0,011 pu oranında sağlanmıştır. Yani 0,03 pu'luk bir voltaj dalgalanması STATCOM tarafından yaklaşık % 63,33 oranında düzeltilmiştir.

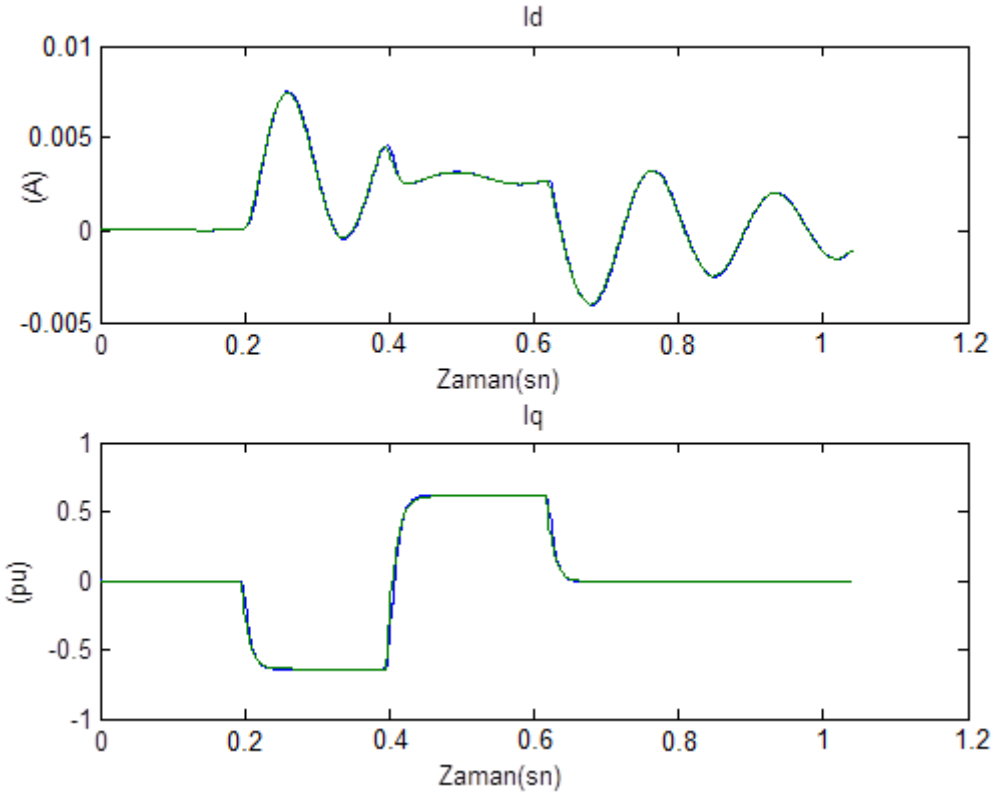
Sistemin ayarlanan PID parametreleri için elde edilen akım-gerilim-modülasyon indeksi değişimleri ise Şekil 4.37-38-39-40.'da verilmiştir.



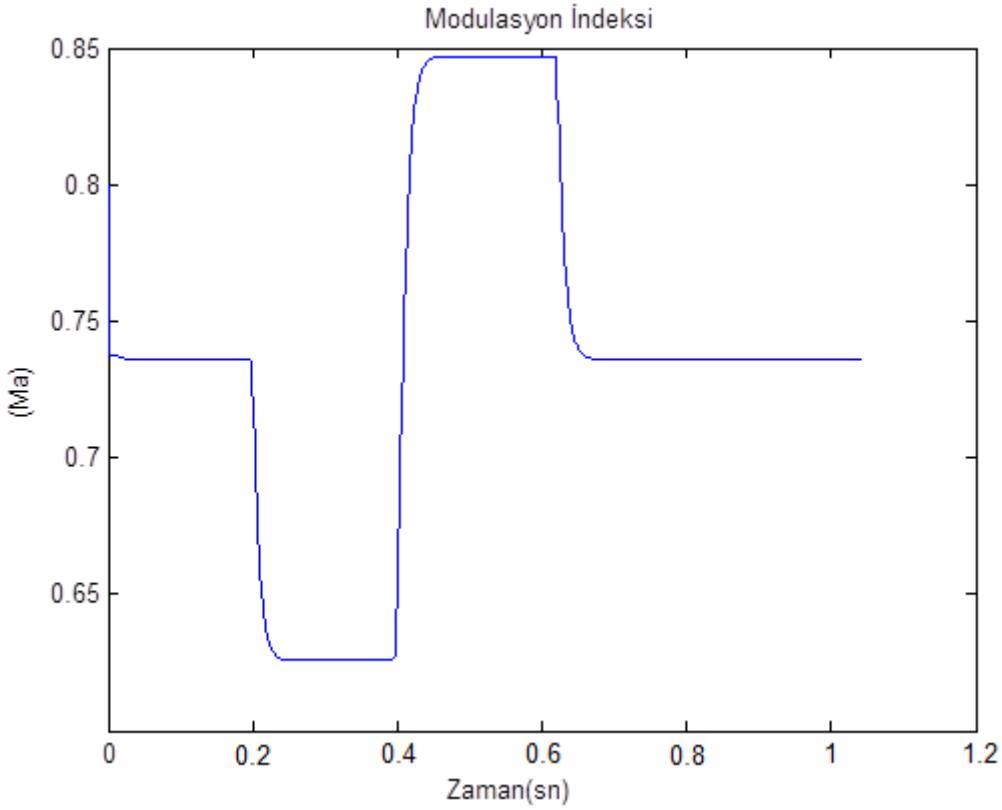
Şekil 4.37. V_{abc} ve I_{abc} Değişimleri



Şekil 4.38. V_{dc} Değişimi



Şekil 4.39. I_d ve I_q Değişimi



Şekil 4.40. m_a Değişimi

- Uygulama-3 için Şekil 4.34.'te verilen sistemde, Şekil 4.13.'te verilen sistemin L1 ve L2 hat parametreleri değiştirilerek sistemin tepkisi incelenmiştir. Sistemin verilen referans değerlerine karşı gösterdiği tepki Şekil 4.35-36.'da verilmiştir. Şekil 4.35.'de elde edilen $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ değerleri için STATCOM devresindeki PID parametrelerinde yapılan değişimlerle sistemin voltaj regülâsyonunu % ±3 gerilim dalgalanması için % 63,33 oranında sağladığı görülmektedir. Sistemin $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ değerleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.36.'da verilmiştir.
- Benzetimden elde edilen sonuçlara bakıldığında; Şekil 4.35-36.'da, V_{ref} değerine ve zamana bağlı olarak verilen pu değerlerine karşın, STATCOM sistemde voltaj regülâsyonu için verilen tepkiyi karşılamaktadır.
- STATCOM'da DC gerilim sabit olduğu için inverter çıkış geriliminin temel bileşeninin genliği, PID parametreleri değiştirilerek ayarlanır. Şekil 4.35-36.'da görüldüğü gibi benzetim devresindeki STATCOM'un kontrolünü sağlayan PID kontrolörde gerekli ayarlamalar yapılarak, V_{ref} değerine ve zamana bağlı olarak, verilen pu değerlerine göre, STATCOM'un indüktif çalışması için, 0.2-0.4 s aralığında m_a'yı azaltmıştır. Benzer şekilde STATCOM'un kapasitif çalışması için 0.4-0.6 s aralığında m_a'yı arttırmıştır. m_a'daki değişmelere bağlı olarak STATCOM için gerekli voltaj regülâsyonu sağlanabilmektedir.
- Simülasyonu yapılan sistemden elde edilen değer parametrelerini incelediğimizde; Tablo 4.8'de generatör-1 bloğu, generatör-2 bloğu ve yük bloklarının nominal akım değerleri verilmiştir. Tablo 4.9'da bara1, bara2, bara3 ve STATCOM bloğunda ölçülen gerilim değişmelerini incelediğimizde bara1 ve bara3'te oluşan voltaj değişimlerine karşın STATCOM'un bara2'ye bağlı yük için gerekli voltaj regülasyonunu sağladığı görülmektedir. Tablo 4.10'da bara1, bara2, bara3 ve STATCOM bloğundan çekilen akımları, Tablo 4.11'de iletim hattında oluşan gerilim değerlerini, Tablo 4.12'de iletim hattında oluşan akım değerlerini, Tablo 4.13'te yük ve kaynak akımının sistemin çalışması sırasındaki değerleri görülmektedir.

Simülasyonu yapılan sistemden elde edilen değerler Tablo 4.8-9-10-11-12-13'te verilmiştir.

Tablo 4.8 Yük ve kaynak akımı nominal değerleri

1	phase_A	200 MW	15MVAr	78.89 A	-102.83°
2	phase_B	200 MW	15MVAr	78.89 A	137.17°
3	phase_C	200 MW	15MVAr	78.89 A	17.17°
4	phase_A	80 MW	5MVAr	26.00 A	-96.15°
5	phase_B	80 MW	5MVAr	26.00 A	143.85°
6	phase_C	80 MW	5MVAr	26.00 A	23.85°
7	phase_A	154 kV	800 MVA	967.65 A	-8.99°
8	phase_B	154 kV	800 MVA	967.65 A	-128.99°
9	phase_C	154 kV	800 MVA	967.65 A	111.01°
10	phase_A	154 kV	1000 MVA	551.16 A	8.78°
11	phase_B	154 kV	1000 MVA	551.16 A	-111.22°
12	phase_C	154 kV	1000 MVA	551.16 A	128.78°

Tablo 4.9 Bara ve STATCOM gerilim değerleri

1	Bara3/Va	124725.93 V	-12.83°
2	Bara3/Vb	124725.93 V	-132.83°
3	Bara3/Vc	124725.93 V	107.17°
4	Bara2/Va	127689.31 V	-7.97°
5	Bara2/Vb	127689.31 V	-127.97°
6	Bara2/Vc	127689.31 V	112.03°
7	Bara1/Va	123329.88 V	-6.15°
8	Bara1/Vb	123329.88 V	-126.15°
9	Bara1/Vc	123329.88 V	113.85°
10	8.66MVA STATCOM Va	127689.31 V	-7.97°
11	8.66MVA STATCOM Vb	127689.31 V	-127.97°
12	8.66MVA STATCOM Vc	127689.31 V	113.85°

Tablo 4.10 Bara ve STATCOM akım değerleri

1	Bara3/Ia	167.66 A	-71.83°
2	Bara3/Ib	167.66 A	168.17°
3	Bara3/Ic	167.66 A	48.17°
4	Bara2/Ia	137.91 A	43.88°
5	Bara2/Ib	137.91 A	-76.12°
6	Bara2/Ic	137.91 A	163.88°
7	Bara1/Ia	204.44 A	49.10°
8	Bara1/Ib	204.44 A	-70.90°
9	Bara1/Ic	204.44 A	169.10°

Tablo 4.11 İletim hattı gerilim değerleri

1	U_in_phase_1	L2 400 km	127689.31 V	-7.97°
2	U_in_phase_2	L2 400 km	127689.31 V	-127.97°
3	U_in_phase_3	L2 400 km	127689.31 V	112.03°
4	U_out_phase_1	L2 400 km	124725.93 V	-12.83°
5	U_out_phase_2	L2 400 km	124725.93 V	-132.83°
6	U_out_phase_3	L2 400 km	124725.93 V	107.17°
7	U_in_phase_1	L1 100 km	123329.88 V	-6.15°
8	U_in_phase_2	L1 100 km	123329.88 V	-126.15°
9	U_in_phase_3	L1 100 km	123329.88 V	113.85°
10	U_out_phase_1	L1 100 km	127689.31 V	-7.97°
11	U_out_phase_2	L1 100 km	127689.31 V	-127.97°
12	U_out_phase_3	L1 100 km	127689.31 V	112.03°

Tablo 4.12 İletim hattı akım değerleri

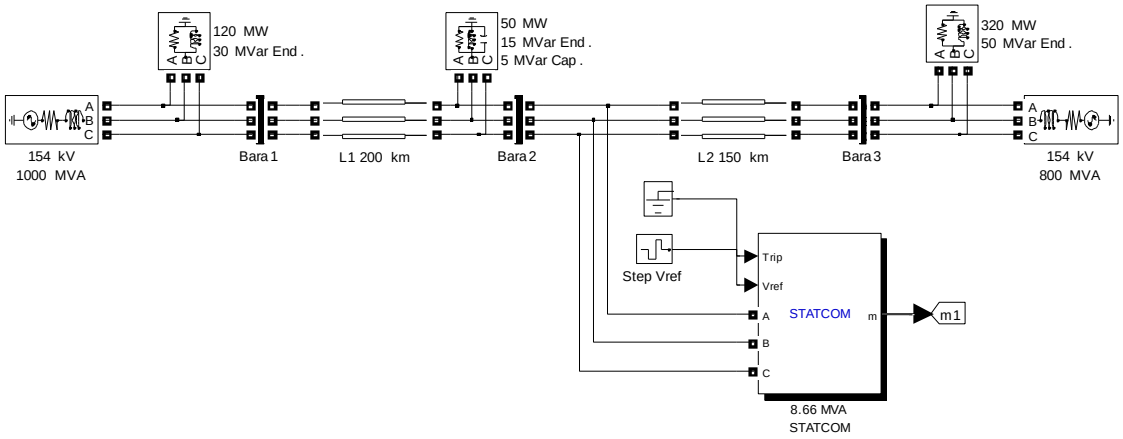
1	I_in_phase_1	L2 400 km	424.26 A	-22.78°
2	I _in_phase_2	L2 400 km	424.26 A	-142.78°
3	I _in_phase_3	L2 400 km	424.26 A	97.22°
4	I _out_phase_1	L2 400 km	588.05 A	-26.97°
5	I _out_phase_2	L2 400 km	588.05 A	-146.97°
6	I _out_phase_3	L2 400 km	588.05 A	93.03°
7	I _in_phase_1	L1 100 km	401.21 A	-30.89°
8	I _in_phase_2	L1 100 km	401.21 A	-150.89°
9	I _in_phase_3	L1 100 km	401.21 A	89.11°
10	I _out_phase_1	L1 100 km	619.58 A	2.11°
11	I _out_phase_2	L1 100 km	619.58 A	-117.89°
12	I _out_phase_3	L1 100 km	619.58 A	122.11°

Tablo 4.13 Sistem çalıştıktan sonra oluşan yük ve kaynak akımı değerleri

1	phase_A	200 MW	15MVAr	-76.92 A
2	phase_B	200 MW	15MVAr	53.63 A
3	phase_C	200 MW	15MVAr	23.29 A
4	phase_A	80 MW	5MVAr	-25.85 A
5	phase_B	80 MW	5MVAr	15.34 A
6	phase_C	80 MW	5MVAr	10.52 A
7	phase_A	154 kV	800 MVA	-151.16 A
8	phase_B	154 kV	800 MVA	-752.14 A
9	phase_C	154 kV	800 MVA	903.30 A
10	phase_A	154 kV	1000 MVA	84.13 A
11	phase_B	154 kV	1000 MVA	-513.79 A
12	phase_C	154 kV	1000 MVA	429.66 A

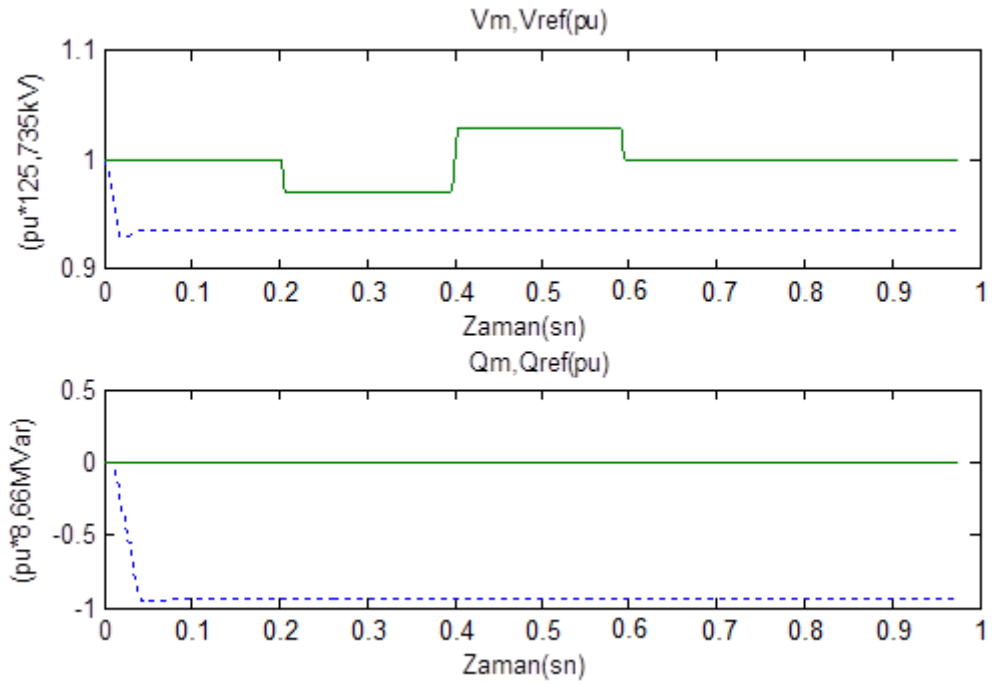
4.4. Uygulama-4:

Simülasyonu yapılan sistem Şekil 4.41.'de verilmiştir. Önerilen sistemde 1000 MVA'lık ve 800 MVA'lık 154 kV, 60 Hz'lik iki adet generatörün ürettiği güç iletim hattından yüklere aktarılmaktadır. Yük olarak 120 MW 30 MVAr'lık bir A şehri, 50 MW 15 MVAr Endüktif, 5 MVAr Kapasitif'lik bir tesis ve 320 MW 50 MVAr'lık bir B şehri bulunmaktadır. Generatör-1'den üretilen 154 kV'luk gerilim, A şehri, 200 Km'lik iletim hattı ve tesisten sonra STATCOM'a paralel bağlanmaktadır. Generatör-2'den üretilen 154 kV'luk gerilim ise B şehri ve 150 Km'lik iletim hattından sonra STATCOM'a bağlanmaktadır.



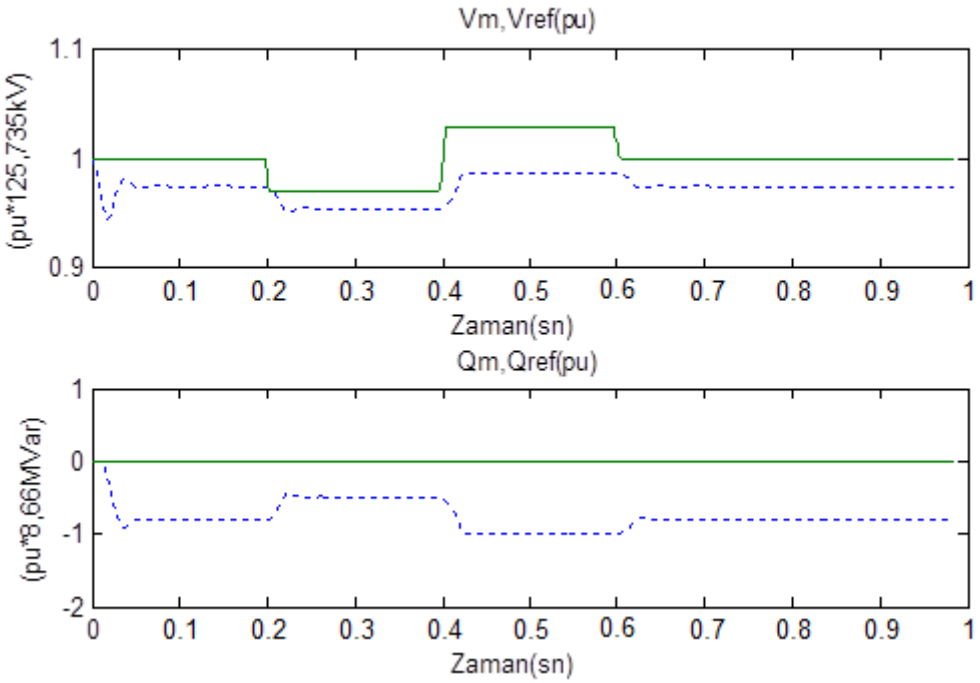
Şekil 4.41. Simülasyonu Yapılan Sistemde Yük Değişikliği

Uygulama-4'te ve Şekil 4.41.'de verilen sistemde, Uygulama-2'de verilen sistemden sadece yükler değiştirilerek (sistem kayıpları ihmal edilmiştir) STATCOM'un cevabı incelenmiştir. STATCOM blok parametresinde yer alan PID katsayıları değiştirilmeden elde edilen sistem cevabı Şekil 4.42.'de verilmiştir.



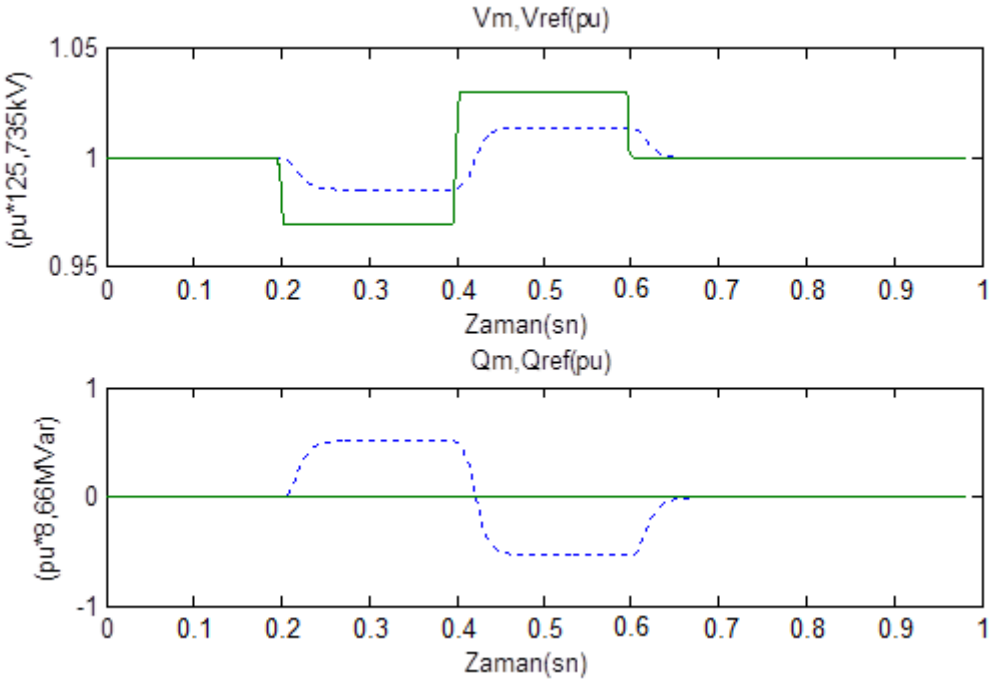
Şekil 4.42. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 5,\ K_i = 1400)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*

Şekil 4.41.'de verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığı anda Şekil 4.42.'de görüldüğü gibi STATCOM'daki PID parametreleri değiştirilmeden elde edilen sistem cevabı istenilen tepkiyi sağlayamamaktadır. Şekil 4.42.'de görüldüğü sistem cevabı referans gerilim değeri için voltaj regülasyonunu sağlayamamaktadır. 0,0-1,0 s arasında STATCOM geriliminin şebeke gerilimiyle (1 pu) aynı olması gerekirken STATCOM gerilimi şebeke geriliminden küçüktür (0,935 pu). Yani STATCOM gerilimi sistem çalışma sınırları içerisinde istenilen tepkiyi sağlayamamaktadır. Şekil 4.41.'de verilen sistemde yük parametrelerinde yapılan değişimler için, sistemin istenilen tepkiyi vermesi ve STATCOM voltaj regülasyonununun daha da iyi sağlanabilmesi için PID parametrelerinde ve STATCOM parametrelerinde değişiklikler yaparak sistemin tepkisini incelediğimizde;



Şekil 4.43. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 6,\ K_i = 1800)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*

Şekil 4.41.'de verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığı anda Şekil 4.42.'de görüldüğü gibi STATCOM'daki PID parametreleri değiştirilmeden elde edilen sistem cevabının istenilen tepkiyi sağlayamadığı görülmektedir. Şekil 4.43.'te ise STATCOM'un PID parametrelerinde $K_p = 6$, $K_i = 1800$, STATCOM gücü de $40\ \mathrm{MVA}$ seçilerek sistem çıkışının referans şebeke gerilim değerini 0,025 pu geriden sürdürmesi sağlanmıştır. Ancak STATCOM yine de sistem için istenilen tepkiyi sağlayamamaktadır. Sistemin istenilen tepkiyi vermesi ve STATCOM voltaj regülasyonununun daha da iyi sağlanabilmesi için PID parametrelerinde ve STATCOM parametrelerinde değişiklikler yaparak sistemin tepkisini yeniden incelediğimizde;

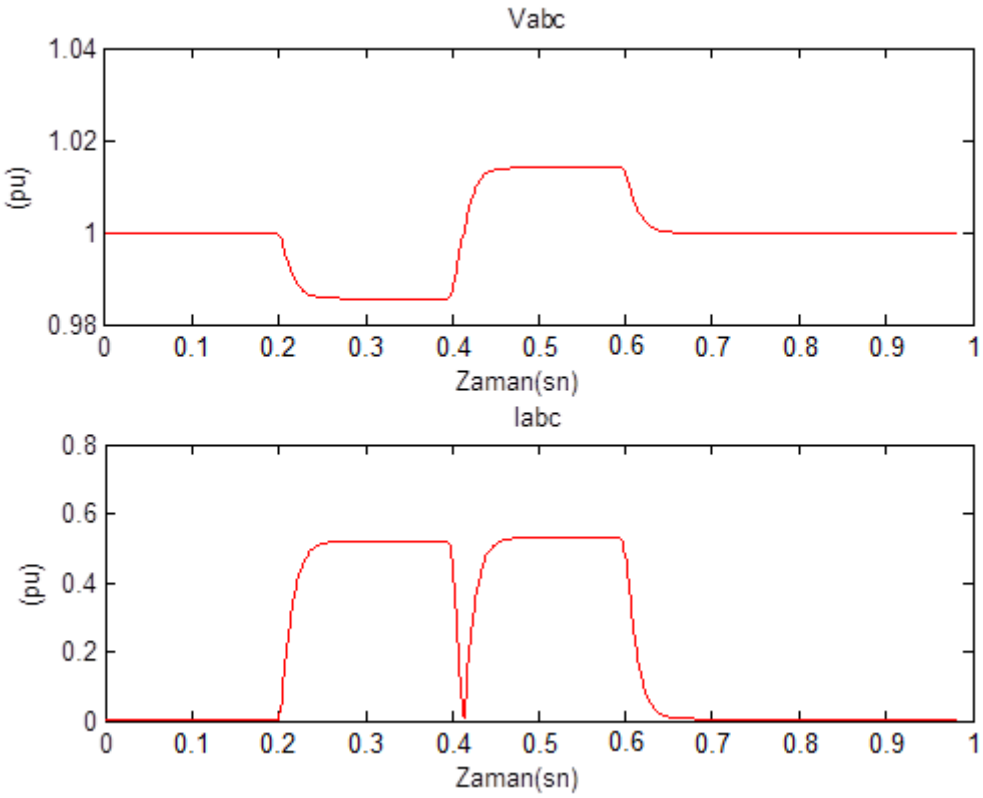


Şekil 4.44. AC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 2,\ K_i = 1000)$
DC Voltaj Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}0001,\ K_i = 0{,}02)$
Akım Regülasyon Kazancı:$(K_p = 0{,}3,\ K_i = 10\ ,\ K_d = 0{,}22)$
Değerleri için $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ *Sistem Cevabı*

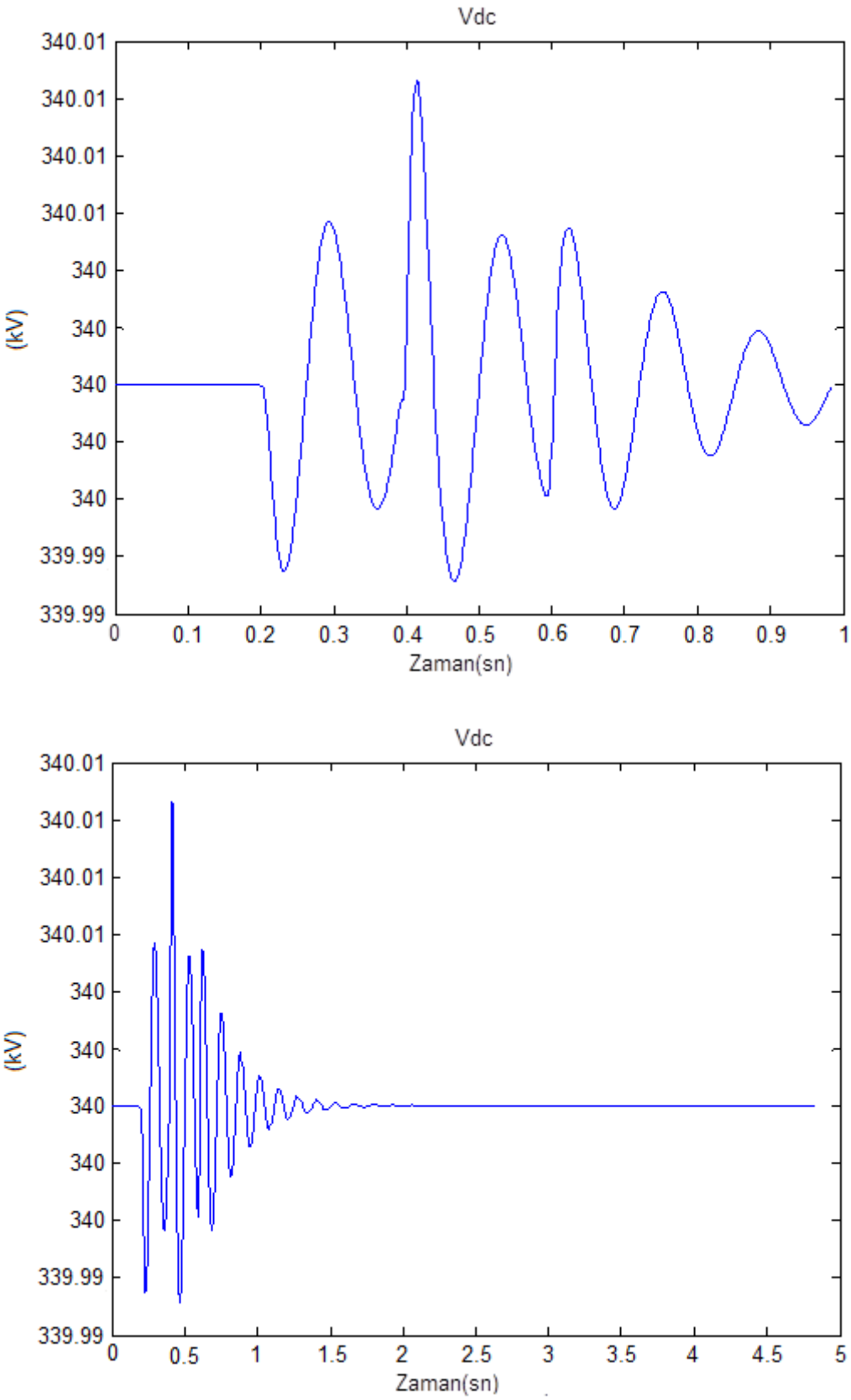
Şekil 4.41.'de verilen sistemde yük parametrelerinde yapılan değişimler için, Şekil 4.44.'te görüldüğü gibi STATCOM'un PID parametrelerinde $K_p = 2$, $K_i = 1000$, STATCOM gücü $14\ \mathrm{MVA}$ seçilerek ve STATCOM voltaj gerilimi de $154\mathrm{x}0{,}9215\mathrm{kV}$ değerine regüle edilerek sistem çıkışının referans şebeke gerilim değerini sürdürmesi sağlanmıştır. Şekil 4.41.'de verilen sistemde birim basamak girişe uygulandığı anda Şekil 4.44.'te görüldüğü gibi 0,2-0,4 s arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden küçüktür. Bu durumda reaktif akım şebekeden STATCOM'a aktarılmaktadır. STATCOM şebekeden reaktif endüktif güç çekmektedir yani STATCOM endüktiftir. 0,4-0,6 s arasında STATCOM gerilimi şebeke geriliminden büyüktür. Bu durumda reaktif akım STATCOM'dan şebekeye aktarılmaktadır. STATCOM'dan şebekeye reaktif kapasitif güç aktarılmaktadır, yani STATCOM kapasitiftir. Şekil 4.44.'teki osiloskop çıkışında görüldüğü gibi STATCOM kontrolü için kullanılan PID parametrelerinde yapılan ayarlamalarla, 0,2-0,4 s arasında STATCOM gerilimi 0,97 pu değerinden 0,986 pu değerine çıkmıştır. 0,4-0,6 s arasında ise STATCOM gerilimi 1,03 pu değerinden 1,014 pu değerine azalmıştır.

Sistem için istenilen voltaj regülasyonu birim basamak girişi için ±0,016 pu oranında sağlanmıştır. Yani 0,03 pu luk bir voltaj dalgalanması STATCOM tarafından yaklaşık % 53,33 oranında düzeltilmiştir.

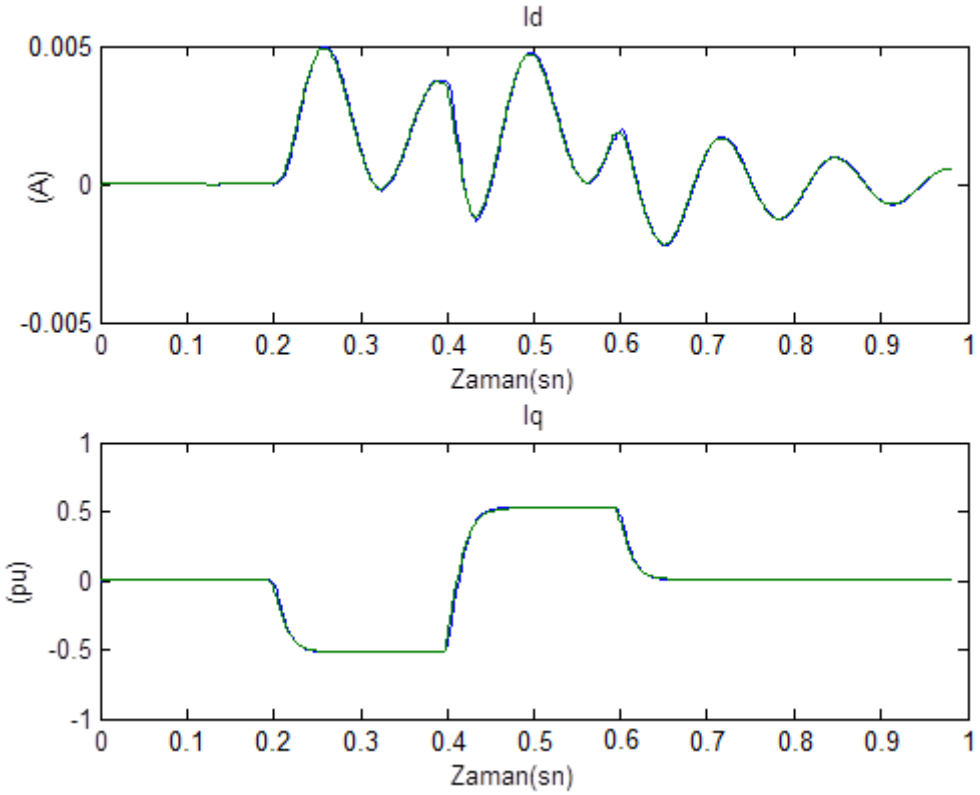
Sistemin ayarlanan PID parametreleri için elde edilen akım-gerilim-modülasyon indeksi değişimleri Şekil 4.45-46-47-48.'de verilmiştir.



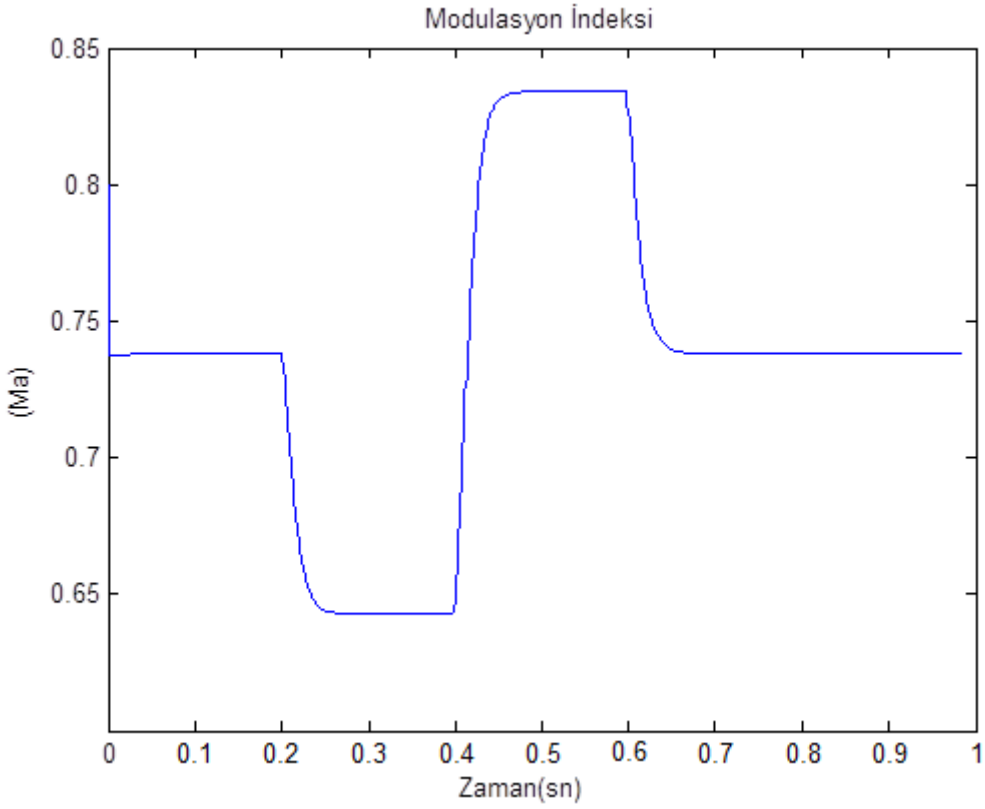
Şekil 4.45. V_{abc} ve I_{abc} Değişimleri



Şekil 4.46. V_{dc} Değişimi



Şekil 4.47. I_d ve I_q Değişimi



Şekil 4.48. m_a değişimi

- Uygulama-4 için Şekil 4.41.'de verilen sistemde, Şekil 4.13.'te verilen sistemin yük1, yük2 ve yük3 parametreleri değiştirilerek sistemin tepkisi incelenmiştir. Sistemin verilen referans değerlerine karşı gösterdiği tepki Şekil 4.42-43-44.'te verilmiştir. Şekil 4.42.'de elde edilen $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ değerleri için STATCOM devresindeki PID parametrelerinde yapılan değişimlerle sistemin voltaj regülâsyonunu % ±3 gerilim dalgalanması için % 53,33 oranında sağladığı görülmektedir. Sistemin $V_m, V_{ref}, Q_m, Q_{ref}$ değerleri için elde edilen sonuçlar Şekil 4.44.'te verilmiştir.
- Benzetimden elde edilen sonuçlara bakıldığında; Şekil 4.42-43-44.'te, V_{ref} değerine ve zamana bağlı olarak verilen pu değerlerine karşın, STATCOM devresindeki inverterin yükün durumuna göre sistemde voltaj regülâsyonu için verilen tepkiyi karşıladığı Şekil 4.44.'te görülmektedir.
- STATCOM'da DC gerilim sabit olduğu için inverter çıkış geriliminin temel bileşeninin genliği, PID parametreleri değiştirilerek ayarlanır. Şekil 4.42-43-44.'te görüldüğü gibi benzetim devresindeki STATCOM'un kontrolünü sağlayan PID kontrolörde gerekli ayarlamalar yapılarak, V_{ref} değerine ve zamana bağlı olarak, verilen pu değerlerine göre, STATCOM'un indüktif çalışması için, 0.2-0.4 s aralığında m_a'yı azaltmıştır. Benzer şekilde STATCOM'un kapasitif çalışması için 0.4-0.6 s aralığında m_a'yı arttırmıştır. m_a'daki değişmelere bağlı olarak STATCOM için gerekli voltaj regülâsyonu sağlanabilmektedir.
- Simülasyonu yapılan sistemden elde edilen değer parametrelerini incelediğimizde; Tablo 4.14'te generatör-1 bloğu, generatör-2 bloğu ve yük bloklarının nominal akım değerleri verilmiştir. Tablo 4.15'te bara1, bara2, bara3 ve STATCOM bloğunda ölçülen gerilim değişmelerini incelediğimizde bara1 ve bara3'te oluşan voltaj değişimlerine karşın STATCOM'un bara2'ye bağlı yük için gerekli voltaj regülasyonunu sağladığı görülmektedir. Tablo 4.16'da bara1, bara2, bara3 ve STATCOM bloğundan çekilen akımları, Tablo 4.17'de iletim hattında oluşan gerilim değerlerini, Tablo 4.18'de iletim hattında oluşan akım değerlerini, Tablo 4.19'da yük ve kaynak akımının sistemin çalışması sırasındaki değerleri görülmektedir.

Simülasyonu yapılan sistemden elde edilen değerler Tablo 4.14-15-16-17-18-19'da verilmiştir.

Tablo 4.14 Yük ve kaynak akımı nominal değerleri

1	phase_A	120 MW	30MVAr End	149.27 A	-99.34°
2	phase_B	120 MW	30MVAr End	149.27 A	140.66°
3	phase_C	120 MW	30MVAr End	149.27 A	20.66°
4	phase_A	320 MW	50MVAr End	238.92 A	-109.33°
5	phase_B	320 MW	50MVAr End	238.92 A	130.67°
6	phase_C	320 MW	50MVAr End	238.92 A	10.67°
7	phase_A	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	73.26 A	-108.39°
8	Uc_phase_A	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	115834.79 V	-18.39°
9	phase_B	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	73.26 A	131.61°
10	Uc_phase_B	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	115834.79 V	-138.39°
11	phase_C	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	73.26 A	11.61°
12	Uc_phase_C	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	115834.79 V	101.61°
13	phase_A	154 kV	800 MVA	1495.17 A	-24.98°
14	phase_B	154 kV	800 MVA	1495.17 A	-144.98°
15	phase_C	154 kV	800 MVA	1495.17 A	95.02°
16	phase_A	154 kV	1000 MVA	888.49 A	-17.77°
17	phase_B	154 kV	1000 MVA	888.49 A	-137.77°
18	phase_C	154 kV	1000 MVA	888.49 A	102.23°

Tablo 4.15 Bara ve STATCOM gerilim değerleri

1	Bara3/Va	113323.55 V	-19.33°
2	Bara3/Vb	113323.55 V	-139.33°
3	Bara3/Vc	113323.55 V	100.67°
4	Bara2/Va	115834.79 V	-18.39°
5	Bara2/Vb	115834.79 V	-138.39°
6	Bara2/Vc	115834.79 V	101.61°
7	Bara1/Va	118006.42 V	-9.34°
8	Bara1/Vb	118006.42 V	-129.34°
9	Bara1/Vc	118006.42 V	110.66°
10	8.66MVA STATCOM Va	115834.79 V	-18.39°
11	8.66MVA STATCOM Vb	115834.79 V	-138.39°
12	8.66MVA STATCOM Vc	115834.79 V	101.61°

Tablo 4.16 Bara ve STATCOM akım değerleri

1	Bara3/Ia	100.34 A	-85.09°
2	Bara3/Ib	100.34 A	154.91°
3	Bara3/Ic	100.34 A	34.91°
4	Bara2/Ia	40.79 A	-26.17°
5	Bara2/Ib	40.79 A	-146.17°
6	Bara2/Ic	40.79 A	93.83°
7	Bara1/Ia	282.43 A	-5.49°
8	Bara1/Ib	282.43 A	-125.49°
9	Bara1/Ic	282.43 A	114.51°

Tablo 4.17 İletim hattı gerilim değerleri

1	U_in_phase_1	L2 150 km	115834.79 V	-18.39°
2	U_in_phase_2	L2 150 km	115834.79 V	-138. 39°
3	U_in_phase_3	L2 150 km	115834.79 V	101.61°
4	U_out_phase_1	L2 150 km	113323.55 V	-19.33°
5	U_out_phase_2	L2 150 km	113323.55 V	-139.33°
6	U_out_phase_3	L2 150 km	113323.55 V	100.67°
7	U_in_phase_1	L1 200 km	118006.42 V	-9.34°
8	U_in_phase_2	L1 200 km	118006.42 V	-129.34°
9	U_in_phase_3	L1 200 km	118006.42 V	110.66°
10	U_out_phase_1	L1 200 km	115834.79 V	-18.39°
11	U_out_phase_2	L1 200 km	115834.79 V	-138.39°
12	U_out_phase_3	L1 200 km	115834.79 V	101.61°

Tablo 4.18 İletim hattı akım değerleri

1	I_in_phase_1	L2 150 km	410.92 A	-17.62°
2	I _in_phase_2	L2 150 km	410.92 A	-137.62°
3	I _in_phase_3	L2 150 km	410.92 A	102.38°
4	I _out_phase_1	L2 150 km	491.30 A	-30.06°
5	I _out_phase_2	L2 150 km	491.30 A	-150.06°
6	I _out_phase_3	L2 150 km	491.30 A	89.94°
7	I _in_phase_1	L1 200 km	178.58 A	-15.44°
8	I _in_phase_2	L1 200 km	178.58 A	-135.44°
9	I _in_phase_3	L1 200 km	178.58 A	104.56°
10	I _out_phase_1	L1 200 km	737.54 A	-22.61°
11	I _out_phase_2	L1 200 km	737.54 A	-142.61°
12	I _out_phase_3	L1 200 km	737.54 A	97.39°

Tablo 4.19 Sistem çalıştıktan sonra oluşan yük ve kaynak akımı değerleri

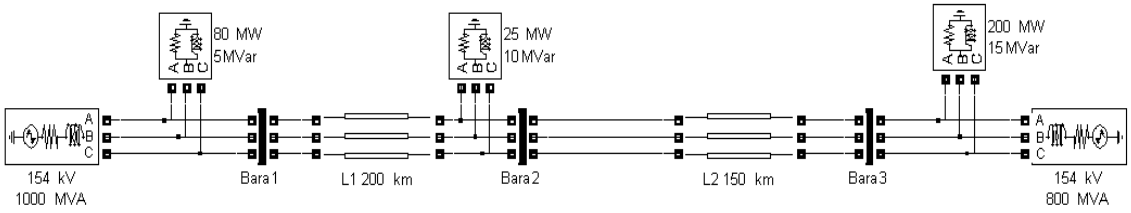
1	phase_A	120 MW	30MVAr End	-147.30 A
2	phase_B	120 MW	30MVAr End	94.62 A
3	phase_C	120 MW	30MVAr End	52.67 A
4	phase_A	320 MW	50MVAr End	-225.46 A
5	phase_B	320 MW	50MVAr End	181.20 A
6	phase_C	320 MW	50MVAr End	44.26 A
7	phase_A	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	-69.52 A
8	Uc_phase_A	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	-36538.20 V
9	phase_B	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	54.78 A
10	Uc_phase_B	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	-76925.40 V
11	phase_C	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	14.75 A
12	Uc_phase_C	50 MW	15MVAr End 5MVAr Cap	113463.60 V
13	phase_A	154 kV	800 MVA	-631.50 A
14	phase_B	154 kV	800 MVA	-857.94 A
15	phase_C	154 kV	800 MVA	1489.44 A
16	phase_A	154 kV	1000 MVA	-271.18 A
17	phase_B	154 kV	1000 MVA	-597.15 A
18	phase_C	154 kV	1000 MVA	868.33 A

4.5. Uygulama–5:

STATCOM'un PID kontrolör ile kontrolünün bir iletim hattında uygulanması ve voltaj regülasyonu modelinin Matlab-Simulinkte tasarımı.

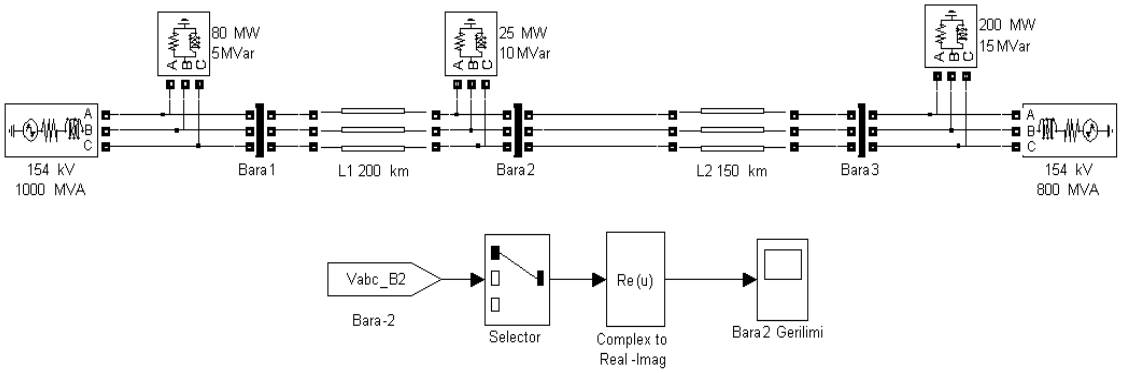
Simülasyonu yapılan sistem Şekil 4.49.'da verilmiştir. Önerilen sistemde 1000 MVA' lık ve 800 MVA'lık 154 kV, 60 Hz'lik iki adet generatörün ürettiği güç iletim hattından yüklere aktarılmaktadır. Yük olarak 80MW 5 MVAr'lık bir A şehri, 25MW 10MVAr'lık bir tesis ve 200MW 15MVAr'lık bir B şehri bulunmaktadır. Generatör-1'den üretilen 154 kV'luk gerilim, A şehri, 200Km'lik iletim hattı ve tesisten sonra STATCOM'a paralel bağlanmaktadır. Generatör-2'den üretilen 154 kV'luk gerilim ise B şehri ve 150 Km'lik iletim hattından sonra STATCOM'a bağlanmaktadır.

Sistemdeki STATCOM PID denetleyici ile kontrol edilerek tasarlanmıştır. Kullanılan STATCOM bloğu Matlab/Simulink ortamındaki hazır blok olup, denetleyici olarak bu bloğun içerisindeki mevcut PID kontrolör kullanılmıştır. Sistemde kullanılan Matlab/Simulink ortamındaki bloklar STATCOM için geliştirilmiştir. Sistemde STATCOM'un bara-2'ye bağlı 25MW 10MVAr'lık tesiste voltaj regülasyonunu sağlaması için oluşturduğu tepki incelenmiştir. Şekil 4.49.'da sistemde STATCOM yokken, bara-2'ye STATCOM bağlıyken ve iletim hattına bozucu yük ilave edildikten sonra bara-2'deki gerilim değişmeleri incelenmiştir.

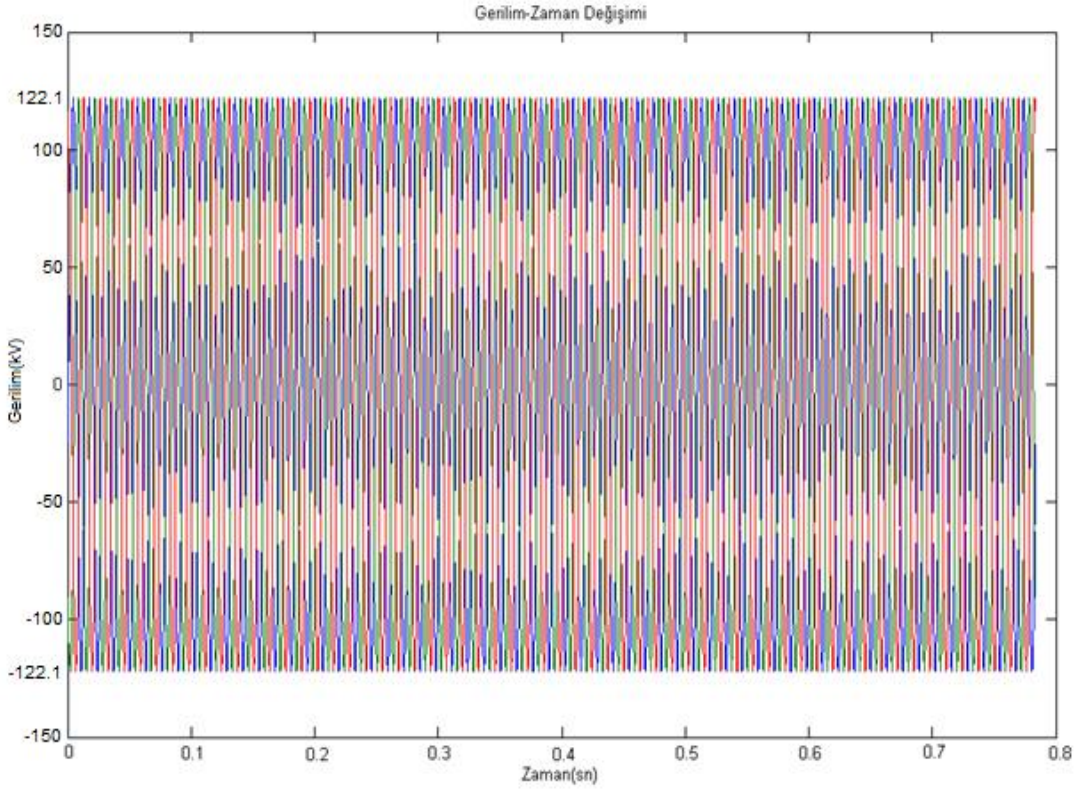


Şekil 4.49. Simülasyonu Yapılan İletim Hattı

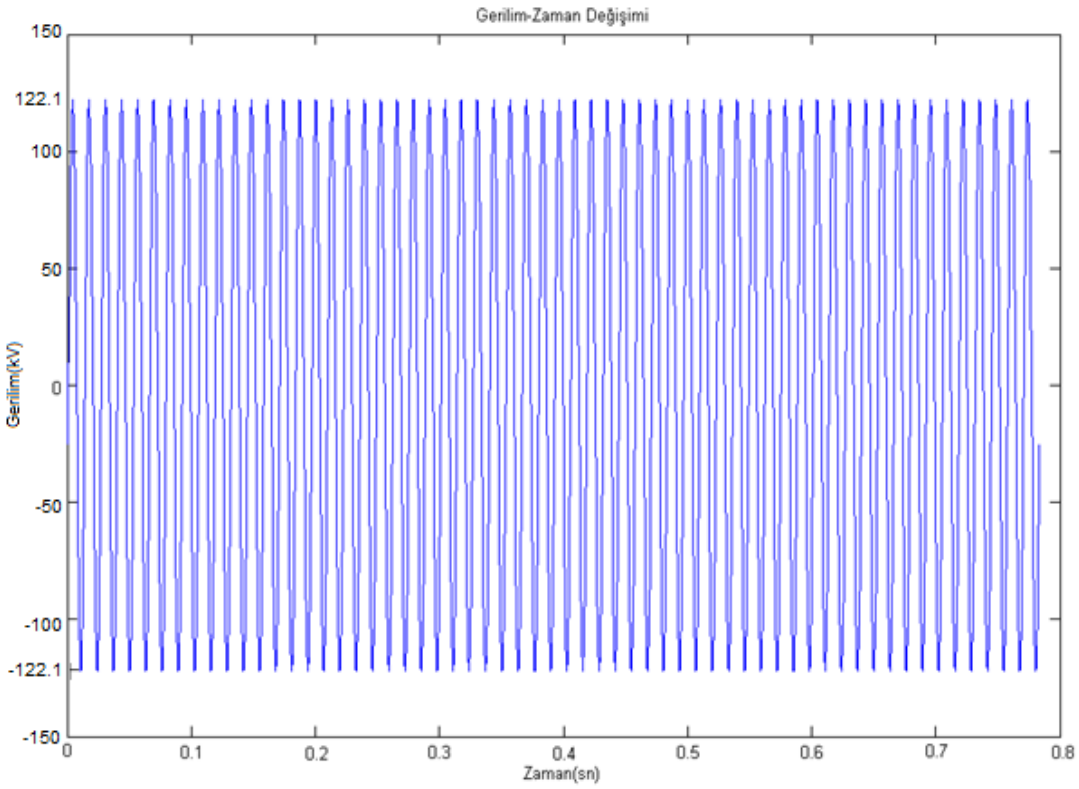
a) Sisteme STATCOM bağlı değilken bara-2'de ölçülen gerilim;



Şekil 4.50. İletim Hattı ve Bara-2 Ölçüm Bloğu



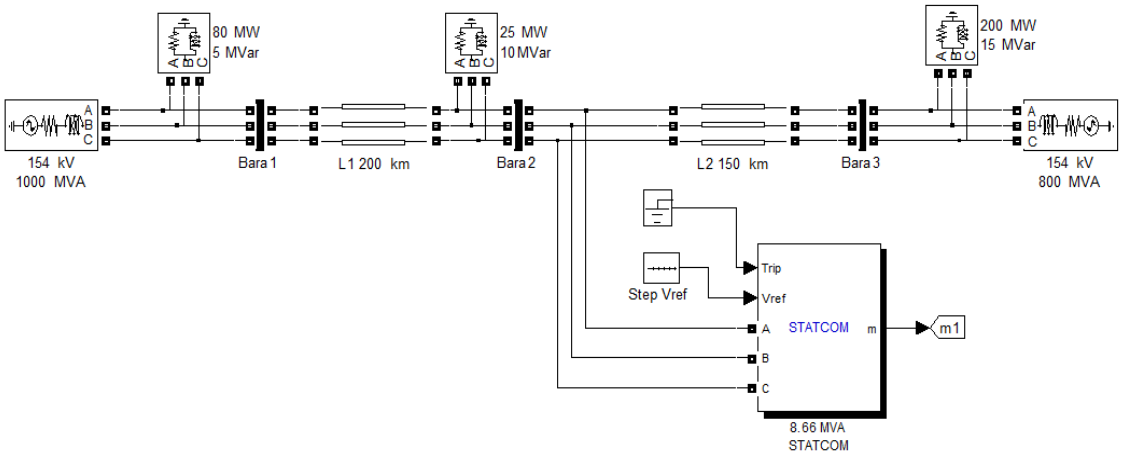
Şekil 4.51.Bara-2'nin Üç Faz Bacağında Ölçülen Gerilim



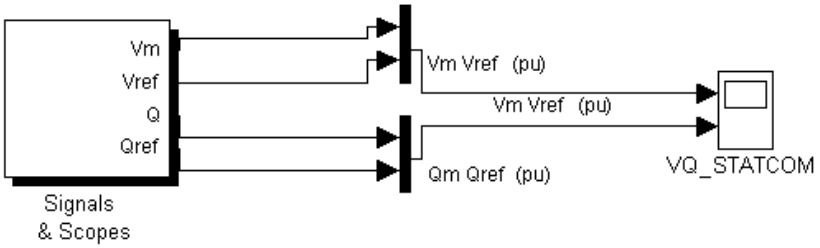
Şekil 4.52.Bara-2'nin Tek Faz Bacağında Ölçülen Gerilim

Şekil 4.49.'da verilen sisteme STATCOM bağlı değilken bara-2'ye osiloskop bağlandığında (Şekil 4.50), Şekil 4.51. ve Şekil 4.52.'de ölçülen gerilim değeri 122100 V'tur. Yani bara-2'deki gerilim iletim hatları ve yüklere bağlı olarak 125.735 V'tan 122100 V değerine % 2.90 oranında (bara-2'de ölçülen gerilim değeri %97.10) düşmüştür.

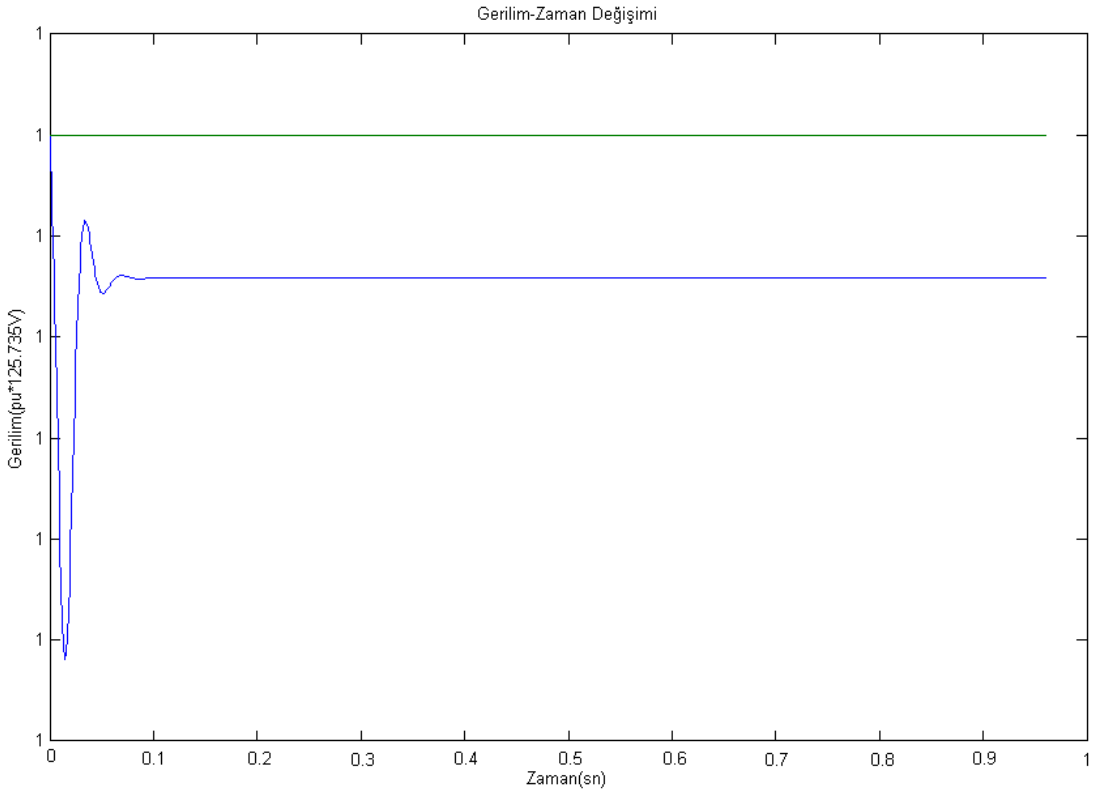
b) Sisteme STATCOM bağlıyken bara-2'de ölçülen gerilim



Şekil 4.53. İletim Hattına STATCOM' un Bağlanması



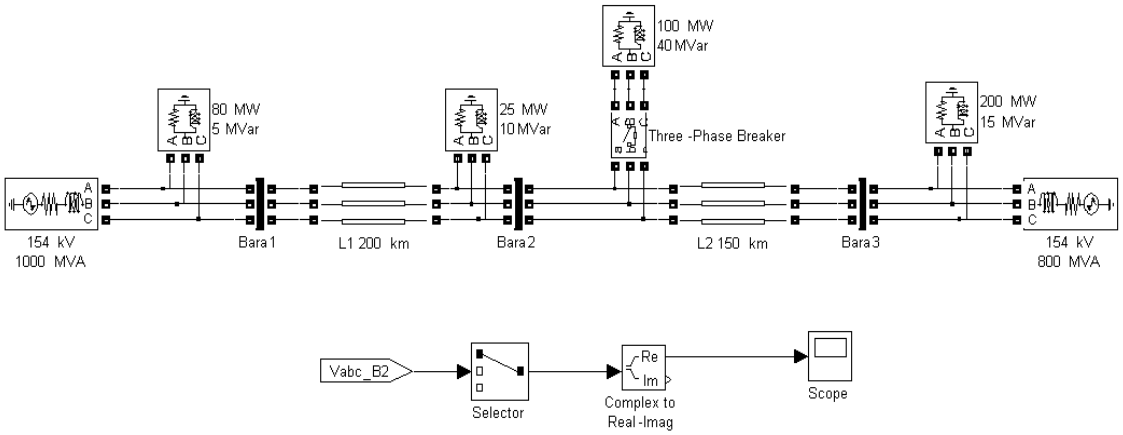
Şekil 4.54.STATCOM Ölçüm Bloğu



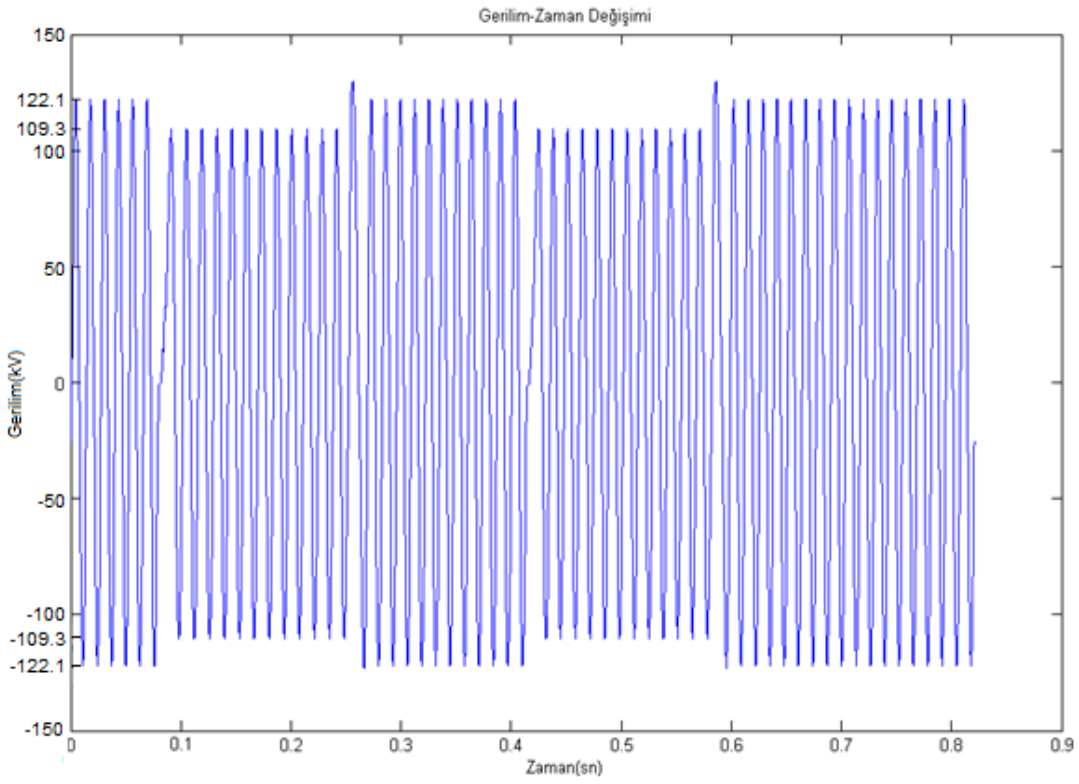
Şekil 4.55.STATCOM Bağlıyken Bara-2' de Ölçülen Gerilim

Şekil 4.49.'da verilen sisteme STATCOM bağlandığında (Şekil 4.53.), STATCOM'un bağlı olduğu bara-2'de osiloskoptan ölçülen gerilim değeri Şekil 4.55.'deki gibi 1 pu (1pu=125.735 V)'dur. Yani bara-2'deki gerilim iletim hatları ve yüklere bağlı olarak 122100 V değerine % 2.90 oranında azalmasına rağmen bara-2'ye bağlı STATCOM tarafından gerilim değeri 1 pu'ya yükseltilmiş bara-2'de olması gereken şebeke gerilimi korunmuştur.

c) Sisteme bozucu yük eklendiğinde ve STATCOM bağlı değilken bara-2'de ölçülen gerilim;



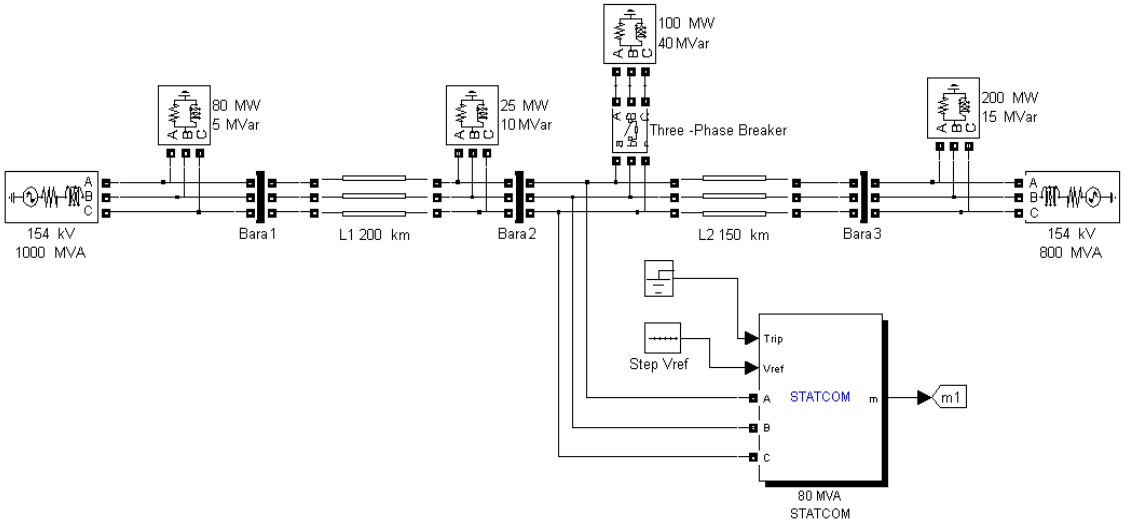
Şekil 4.56.Bozucu Yükte İletim Hattı ve Bara-2 Ölçüm Bloğu



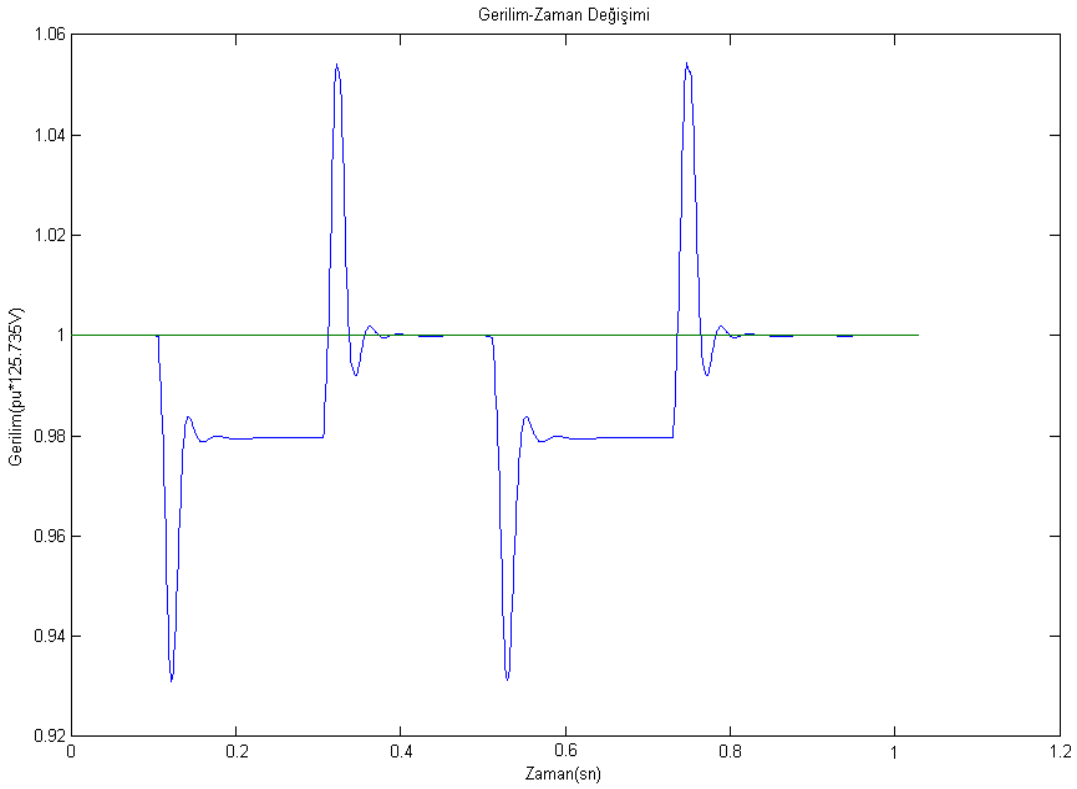
Şekil 4.57. Bozucu Yükte Bara-2'nin Tek Faz Bacağında Ölçülen Gerilim

Şekil 4.49.'da verilen sisteme STATCOM bağlı değilken ve iletim hattına 100MW ve 40MVAr End. yük eklendiğinde, (sisteme bağlı yüke anahtar bağlı olup 0.1-0.3s ve 0.5-0.7s aralığında anahtar kapatılarak yük devreye alınmıştır), bara-2'ye bağlı osiloskopta, Şekil 4.57'de verildiği gibi ölçülen gerilim değeri anahtar kapatıldığında (yük devreye alındığında) 109.300 V değerine azalmakta, anahtar açıldığında ise 122100 V değerine artmaktadır. Yani bara-2'deki gerilim iletim hatları ve sisteme eklenen yüke bağlı olarak 125735 V'tan anahtar kapatıldığında 109300 V değerine %13.07 oranında (bara-2'de ölçülen gerilim değeri %86.92), anahtar kapatıldığında ise 122100 V değerine % 2.90 oranında (bara-2'de ölçülen gerilim değeri %97.10) azalmıştır.

d) Sisteme bozucu yük eklendiğinde ve STATCOM bağlıyken bara-2'de ölçülen gerilim;



Şekil 4.58. Bozucu Yükte İletim Hattına STATCOM Bağlanması



Şekil 4.59. Bozucu Yükte STATCOM Bağlıyken Bara-2' de Ölçülen Gerilim

Şekil 4.49.'da verilen sisteme, Şekil 4.58'de verildiği gibi STATCOM bağlandığında ve iletim hattına 100MW ve 40MVAr End. yük eklendiğinde, (sisteme bağlı yüke anahtar bağlı olup 0.1-0.3s ve 0.5-0.7s aralığında anahtar kapatılarak yük devreye alınmıştır) ve Şekil 4.59.'daki gibi anahtar 0.1s ve 0.5s'de kapatılarak anahtarın bağlı olduğu yük devreye alındığında STATCOM'un bağlı olduğu bara-2'de osiloskoptan ölçülen gerilim değeri anahtarın kapatılma anında 0.9311pu (117062 V) değerine %6.89 oranında azalmaktadır. Oluşan gerilim düşümü anahtar tekrar açılıp yük devreden çıkarılana kadar STATCOM tarafından 0.98pu (123220 V)'ya (olması gereken bara-2 gerilimine 125735 V) %98 oranında arttırılmaktadır. Anahtara bağlı yük devreden çıkarıldığında STATCOM, bara-2'de olması gereken 1pu (125735 V)'yu sağlamaktadır.

Bara-2'deki gerilim, iletim hatları ve sisteme eklenen yüke bağlı olarak, anahtar kapatıldığında 125.735 V'tan 117.062 V değerine %6.89 oranında azalmıştır. Ancak bara-2'ye bağlı STATCOM tarafından gerilim değeri 0.98pu'ya arttırılmış, anahtar tekrar açılıp yük devreden çıkarıldığında ise bara-2'ye bağlı STATCOM tarafından gerilim değeri 1pu'ya yükseltilmiş, bara-2'de olması gereken şebeke gerilimi korunmuştur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada kompanzasyon ile ilgili temel kavramlardan kısaca bahsedilmiş, modern kompanzasyon tekniği olan FACTS cihazları kısaca anlatılmıştır. FACTS'lar iletim şebekelerinin kullanım kapasitesini arttıracak güç elektroniği temelli kontrolörlerdir ve çok hızlı çalışarak iletim sistemlerinin çalışma sınırlarını arttırmaktadırlar. Tezde FACTS cihazlarından olan STATCOM'un çalışma prensibi ve hesaplama yöntemleri anlatılmış, kontrol sistemleri ve PID kontrolörler incelenerek PID kontrolörün güç sistemleri üzerindeki etkisi Uygulama-1 üzerinde açıklanmıştır. Son olarak STATCOM'un PID kontrolör ile kontrolü Uygulama-2, Uygulama-3, Uygulama-4 ve Uygulama-5'te verilen değişken sistem parametreleri için MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyonlarla incelenmiştir.

İncelenen sistemlerde, elektrik iletimi için 154 kV seviyesinde, 1000MVA ve 800MVA anma gücünde iki adet enerji santralinin ürettiği güç, iletim hattına bağlı yükler ve yüklere paralel olarak bağlanmış STATCOM yapısı, MATLAB/Simulink programı ile tasarlanmış ve sistemin değişken koşullarda (iletim hattı mesafesi, değişken yük v.b.) karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Benzetimden elde edilen sonuçlara bakıldığında; V_{ref} değerine, sisteme ilave edilen yüke ve zamana bağlı olarak verilen değerlere karşın, STATCOM devresindeki inverterin yükün durumuna göre sistemde voltaj regülâsyonu için verilen tepkiyi karşıladığı görülmüştür.
- STATCOM'un çalışması, güç sisteminin çalışma şartlarına (indüktif ya da kapasitif) bağlıdır. Yani, güç sisteminin indüktif olduğu durumda STATCOM kapasitif bir reaktif akım, güç sisteminin kapasitif olduğu durumda ise STATCOM indüktif bir reaktif akım üretir. Bu durum ise Uygulama-2, Uygulama-3, Uygulama-4 ve Uygulama-5'te verilen sistemlerden elde edilen sonuçlarda görülmüştür.
- Uygulama-2, Uygulama-3, Uygulama-4 ve Uygulama-5'te verilen değişken sistem parametreleri için STATCOM'un sistemde voltaj regülâsyonunu sağladığı görülmüştür.

6. KAYNAKLAR

[1]. R. Çöteli, Z. Aydoğmuş, *DGM-Statcom ile Reaktif Güç Kompanzasyonu*, **Journal of Polytechnic**, 10:2 (1998) 123-128.

[2]. L. Gyugyi, *Power Electronics in Electric Utilities: Static VAr Compensators,* **Proceedings of The IEEE**, (1988), 483-493.

[3]. Cigre, *Static Synchronous Compensator,* **Working Group** 14:19 (1998).

[4]. L. Gyugyi, *Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits,* **IEEE Trans. Ind. Appl**., 15:5, (1979), 521-532.

[5]. A. Hasanovic, *"Modeling and Control of The Unified Power Flow Controller (UPFC)",* Yüksek Lisans Tezi, West Virginia Üniversitesi, 2000.

[6]. http://w3.gazi.edu.tr/~bayindir/D2.pdf*, Elektrik Şebekelerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu.*

[7]. Ş Özdemir, Ş. Kuşdoğan, E. Özdemir, Gelişmiş Statik VAr Kompanzatörün (GSVK) Anlık Güç Teorisi Tabanlı Denetimi, ELECO'2002 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu**,** Bursa, Aralık (2002) s. 130–134.

[8]. J. Afonso, *Active Filters with Control Based on the p-q Theory*, **IEEE Industrial Electronics Society Newsletter**, 47:3, (2000), 5-11.

[9]. www.fizik.us/.../alternatif-akim-devrelerinde-guc.html.

[10]. TMMOB, TMMOB Reaktif Güç Kompanzasyonu, Seminer Notları*,* İstanbul, EMO, (1999).

[11]. T. Yalçınöz, H. Erbaş, İ. Yücel, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemlerinde Kullanılan Elemanlar, Kaynak Elektrik, Kasım (2001).

[12]. Simulation In Power Networks, John Wiley&Sons LTD, 2004.

[13]. N. G. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technolgy Flexible AC Transmission Systems*, **IEEE Press**, New York, (1999).

[14]. R. M. Mathur, R. K. Varma, *Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems*, **IEEE Press**, USA, (2002).

[15]. H. B. Çetinkaya, S. Öztürk, A. Basa Arsoy, B. Alboyacı, M. Şengül, T. Türker, Enerji İletim Hatlarındaki Enerji Kalitesini Düzenleyen Klasik ve Modern Kontrol Yapıları, Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, Mayıs (2005).

[16]. U. Eminoğlu, T. Yalçınöz, S. Herdem, Analysis Of FACTS Devvices For Dynamic Loads Using MATLAB, UPEC 2000, Thessaloniki Greece, 01-03 September (2003) pp. 377-380.

[17]. U. Arifoğlu, Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Alfa Yayınevi, İstanbul, 2002.

[18]. A. Kara, T. Yalçınöz, Esnek Ac İletim Sistemlerinde Kullanılan Cihazlar Ve TCR, SVC, TSR Yapılı Paralel Kompanzatörlerin Yük Gerilimine Etkisinin Matlab Ortamında İncelenmesi, Kasım (2005).

[19]. J. B. Ekanayake, N. Jenkins and C. B. Cooper, *Experimental Investigation of An Advanced Static VAr Compensator, Generation, Transmission and Distribution*, **IEEE Proceed,** 142:2, (1995), 202-210.

[20]. C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, W. T. Cease, A. Edris, *Development of a ±100 MVAr Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems*, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 10: 3, (1995), 1486-1496.

[21]. C. Ö. Gerçek, B. Gültekin, M. Deniz ve T. Atalık, 7- Seviyeli STATCOM Prototipi için Yapılan Tasarım ve Modelleme Çalışmaları, EMO II. Enerji Verimliliği Sempozyumu, Kocaeli, 17-18 Mayıs (2007).

[22]. A. Çetin, *"Design and Implementation of A Voltage Source Converter Based STATCOM for Reactive Power Compensation and Harmonic Filtering",* METU Electrical and Electronic Engineering Department, Phd Thesis, 2007, p. 222.

[23]. C. Schauder and H. Mehta, *Vector Analysis and Control of Advanced Static VAr Compensators*, **IEE Proceedings-C**,140:4, (1993), 299-306.

[24]. G. Narain, H.İngorani, L Gyugyi, Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, John Wiley &Sons Incorporated, November 1999.

[25]. U. Eminoğlu, S. Herdem, T. Yalçınöz, İnvertör Temelli Facts Cihazları Kullanarak Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Gerilim Kontrolü, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi.

[26]. E. Uzunoviç, C. A Canizares, J. Jeeve, Fundemental Frequency Model of Static Synchronous Compensator, North American Power Symposium (NAPS), October (1997), pp. 49-54.

[27]. A. T. Yong Hua Song (Editor), A. T. Johns , *Flexible AC Transmission Systems (Facts),* **IEE Publication Series**, January (1999).

[28]. http://www.elektrikdersi.com/kontrol-sistemleri/.

[29]. T. Uzun, Endüstriyel Otomatik Kontrol Sistemleri*,* EHM 014 6105 (303), Ders Notları.

[30]. http://www.bilimonline.com/kontrol/, *Otomatik kontrol,* 1 Ekim (2009).

[31]. C.C. Lee, *Fuzzy Logic in Control Systems*, *Fuzzy Logic Controller-Part I,* **EEE Trans. Syst., Man, Cybern**., 20:2, (1990), p:404-418.

[32]. İ. H. Altas, *Bulanık Mantık: Bulanık Denetim, Enerji, Elektrik, Elektromekanik -3e,* **Bileşim Yayıncılık** Sayı: 64, Eylül (1999), s. 76-81.

[33]. E. Öztemel, *Yapay Sinir Ağları*, **Papatya Yayıncılık**, İstanbul, (2003), s. 36.

[34]. Ç. Elmas, *Yapay Sinir Ağları Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama*, **Seçkin Yayıncılık**, Ankara (2003), s. 27-28.

[35]. S. Haykin, *Neural Networks,* **Macmillan Collage Printing Company**, New Jersey (1994), s. 41.

[36]. M. Ö. Efe, O. Kaynak, Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul 2004, s.1.

[37]. A. M. Ceylan, *"Çok Değişkenli Sistemlerde İleri Kontrol Algoritmalarının İncelenmesi"*, Y.Lisans Tezi, 2001.

[38]. K. J. Astrom and T. Hagglund, PID Controllers: Theory, Design and Tuning, Instrument Society of America*,* This book provides detailed explanation on the most topics treated in the text except the classical tuning method of the two degree of freedom PID controller, 1995, p. 343.

[39]. H. Taguchi and M. Araki, Two degree of freedom PID controllers. Proceedings of the IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control, Elsevier, This paper provides a brief survey of the properties of the two degree of freedom PID controller as well as its tuning method, 2000, p. 91-96.

[40]. S. Bennett, A History of Control Engineering, Peter Peregrinus, This book contains a short history of early PID controllers, 1993, p. 28-69.

[41]. H. Kuşçu, Otomatik Kontrol (PID kontrol), Ders notları.

[42]. R. Çöteli, *"Statcom ile Güç Akış Kontrolü*", Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2006.

[43]. K. B. Bose, Modern Power Electronics and AC Drivers, Prentice Hall PTR, 2002.

[44]. E. Uzunovic, *“EMTP, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers* ”, Phd. Thesis, Canada 2001.

[45]. E. W. Kimbark, Direct Current Transmission, Vol. 1, John Wiley New York 1971.

ÖZGEÇMİŞ

15.09.1983 yılında Kahramanmaraş'ta doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimini Kahramanmaraş'ta tamamladım. 2001 yılında Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünde başladığım lisans öğrenimini 2005 yılında bitirdim. 2007 yılında etüd, proje ve keşif mühendisi olarak bir kamu kurumunda çalışmaya başladım. 2008 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladım. Halen aynı kamu kurumunda çalışmaya devam etmekteyim.