



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TARIMSAL SULAMA SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ
VE ŞEBEKE KARARLILIĞI İÇİN D-STATCOM UYGULAMASI:
MODELLEME, SİMÜLASYON VE PERFORMANS ANALİZİ**

Raci NAR

**Ocak-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TARIMSAL SULAMA SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ
VE ŞEBEKE KARARLILIĞI İÇİN D-STATCOM UYGULAMASI:
MODELLEME, SİMÜLASYON VE PERFORMANS ANALİZİ**

Raci NAR

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL Dr. Öğr. Üyesi Davut ÖZHAN

**Ocak-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Raci Nar tarafından hazırlanan “Tarımsal Sulama Sistemlerinde Enerji Verimliliği ve Şebeke Kararlılığı İçin D-STATCOM Uygulaması: Modelleme, Simülasyon ve Performans Analizi” adlı tez çalışması 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim/Sanat Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ömer Faruk ERTUĞRUL

.....

Danışman

Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Davut ÖZHAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Raci NAR
Tarih:24.01.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

TARIMSAL SULAMA SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ VE ŞEBEKE KARARLILIĞI İÇİN D-STATCOM UYGULAMASI: MODELLEME, SİMÜLASYON VE PERFORMANS ANALİZİ

Raci NAR

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

2025, 70 Sayfa

Bu tez çalışmasında, tarımsal sulama sistemlerinde reaktif güç yönetimi ve gerilim kararlılığını artırmaya yönelik bir çözüm olarak D-STATCOM'un modeli geliştirilmiş ve performansı incelenmiştir. Çalışmada, D-STATCOM'un reaktif güç dengeleme, gerilim düzenleme ve frekans kontrolü üzerindeki etkileri MATLAB Simulink ortamında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Tarımsal sulama sistemleri, genellikle yüksek reaktif güç talebi nedeniyle şebeke kararlılığı ve enerji kalitesini olumsuz etkileyebilen motorlar ve pompalar gibi endüktif yüklerin yoğun olduğu sistemlerdir. Bu çalışmada, D-STATCOM'un sulama fiderlerindeki reaktif güç dalgalanmalarını dengeleyerek güç faktörünü iyileştirdiği ve gerilim seviyelerini stabilize ettiği gösterilmiştir. Simülasyon sonuçları, D-STATCOM'un yük değişimlerine hızlı bir şekilde yanıt verdiğini ve sistem kararlılığını artırdığını ortaya koymaktadır.

Çalışmada, D-STATCOM'un kontrol mekanizmaları detaylı bir şekilde incelenmiş, referans gerilim (V_{ref}) ve referans akım (I_{qref}) değerlerine dayalı reaktif güç yönetimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Endüktif yüklerin neden olduğu gerilim düşüşlerinde D-STATCOM'un reaktif güç sağlayarak, kapasitif yüklerin neden olduğu gerilim yükselmelerinde ise reaktif güç çekerek gerilim profillerini stabilize ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca, inverter çıkışındaki harmoniklerin LC filtrelerle temizlenmesi sayesinde enerji kalitesinin artırıldığı ve sistemin güvenilirliğinin sağlandığı görülmüştür. Simülasyon verileri, D-STATCOM'un devreye girdiği durumlarda, şebeke kararlılığının yaklaşık 0.1 saniye gibi kısa bir sürede sağlandığını göstermiştir. Güç faktörünün 0.7 seviyesinden 0.95 seviyesine çıkarılması ve enerji kayıplarının %15 oranında azaltılması, D-STATCOM'un tarımsal sulama sistemlerinde enerji verimliliği sağlama konusundaki etkinliğini ortaya koymaktadır. Bu çalışma, tarımsal sulama fiderlerinde reaktif güç yönetimi ve enerji kalitesinin artırılması için D-STATCOM'un önemli bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Gelecekte, D-STATCOM'un yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemleriyle entegrasyonu, bu teknolojinin daha geniş çaplı uygulamalarını destekleyebilir. Bu bağlamda, çalışma bulguları, tarımsal sulama sistemlerinde enerji verimliliği, şebeke kararlılığı ve sürdürülebilir enerji yönetimi için D-STATCOM'un kritik bir araç olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: reaktif güç, tarımsal sulama, frekans kontrolü, matlab simulink

ABSTRACT

MASTER THESIS

D-STATCOM APPLICATION FOR ENERGY EFFICIENCY AND GRID STABILITY IN AGRICULTURAL IRRIGATION SYSTEMS: MODELING, SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS

Raci NAR

Batman University Graduate Education Institute

Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Assoc. Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR

2025, 70 Pages

In this thesis, a model of D-STATCOM was developed and its performance was analyzed as a solution to improve reactive power management and voltage stability in agricultural irrigation systems. The study modeled and evaluated the effects of D-STATCOM on reactive power balancing, voltage regulation, and frequency control using MATLAB Simulink. Agricultural irrigation systems often involve inductive loads such as motors and pumps, which demand high reactive power and can adversely affect grid stability and energy quality. This study demonstrated that D-STATCOM successfully balances reactive power fluctuations in irrigation feeders, improves the power factor, and stabilizes voltage levels. Simulation results revealed that D-STATCOM responds quickly to load variations, thereby enhancing system stability.

In the study, D-STATCOM's control mechanisms were examined in detail, and reactive power management was successfully achieved based on reference voltage (V_{ref}) and reference current (I_{qref}) values. It was observed that D-STATCOM provides reactive power to counter voltage drops caused by inductive loads and absorbs reactive power to stabilize voltage rises due to capacitive loads. Additionally, the elimination of harmonics at the inverter output using LC filters improved energy quality and ensured system reliability. Simulation data showed that when D-STATCOM was activated, grid stability was achieved within a short time of approximately 0.1 seconds. The power factor was improved from 0.7 to 0.95, and energy losses were reduced by 15%, demonstrating the effectiveness of D-STATCOM in enhancing energy efficiency in agricultural irrigation systems.

This study highlights the potential of D-STATCOM as a significant solution for improving reactive power management and energy quality in agricultural irrigation feeders. In the future, integrating D-STATCOM with renewable energy sources and energy storage systems could support broader applications of this technology. In this context, the findings of this study demonstrate that D-STATCOM is a critical tool for energy efficiency, grid stability, and sustainable energy management in agricultural irrigation systems.

Keywords: reactive power, agricultural irrigation, frequency control, matlab simulink

ÖN SÖZ

Bu tez, tarımsal sulama sistemlerinde reaktif güç yönetimi ve gerilim kararlılığını artırmaya yönelik bir çözüm olarak D-STATCOM teknolojisinin uygulanabilirliğini araştırmak amacıyla hazırlanmıştır. Sulama sistemleri, enerji yoğun yapıları ve endüktif yüklerden kaynaklanan reaktif güç talepleri nedeniyle şebeke kararlılığı üzerinde önemli etkiler yaratabilmektedir. Bu çalışmada, D-STATCOM'un sunduğu hızlı tepki mekanizmalarının ve etkin kontrol stratejilerinin, enerji verimliliği ve şebeke güvenilirliği açısından sunduğu avantajlar detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Tez kapsamında, enerji sistemlerindeki dinamik değişimlere ve yük dalgalanmalarına yanıt verebilen, aynı zamanda enerji kalitesini artıran bir çözüm olarak D-STATCOM'un matematiksel modellemesi ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışma sürecinde, teorik bilgiler ile pratik uygulamalar birleştirilerek tarımsal sulama sistemlerinin ihtiyaçlarına yönelik etkili bir çözüm önerisi geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan ve tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocama en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmam süresince beni motive eden ve yanımda olan aileme, arkadaşlarıma ve tüm sevdiklerime minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Bu tezin, enerji sistemlerinde D-STATCOM gibi teknolojilerin uygulama alanlarının daha da genişletilmesine katkı sağlaması ve bu alanda çalışacak araştırmacılar için bir referans niteliği taşıması en büyük dileğimdir.

Saygılarımla,

Raci NAR
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Sulama Fiderleri ve Enerji Verimliliği	3
1.2. Çalışmanın Amaçları ve Kapsamı	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. MATLAB Simulink ile Modelleme Yaklaşımları	7
2.2. Frekans Kontrol Teknikleri ve Uygulamaları	8
3. MATERYAL ve YÖNTEM	11
3.1. Reaktif Güç Dengesini Sağlamak İçin Kullanılan Yöntemler.....	11
3.1.1. Statik VAR kompanzatörü	12
3.1.2. Statik VAR kompanzatörü yapısı ve çalışma prensibi.....	12
3.1.3. SVC'nin avantajları	14
3.2. Reaktif Güç Dengesini Sağlamanın Sonuçları.....	14
3.2.1. Harmonik filtreler ile reaktif güç ve güç kalitesinin optimize edilmesi	15
3.3. Frekans Kontrol Stratejilerinin Entegrasyonu	16
3.3.1. Reaktif güç kaynakları	16
3.3.2. Jeneratörün frekans tepkisi	17
3.4. Güç Sistemi Model Verileri	18
3.4.1. Hat parametreleri	21
3.4.2. Yük modeli	22
3.4.3. Reaktif güç talebi	22
3.5. MATLAB Simulink Modeli Tasarımı	22
3.5.1. MATLAB Simulink modelinin ana bileşenleri	23
3.5.2. MATLAB Simulink modelleme aşamaları.....	23
3.6. Güç Faktörü Optimizasyonu	25
3.6.1. Optimizasyon sonuçları	26
3.6.2. Simülasyon adımları	28
3.6.3. Test modeli veri blokları.....	28
3.6.4. Optimizasyon sonuçları	30

4. TEST MODELİ UYGULAMASI.....	32
4.1. Reaktif Güç Dengesinin Performansı	32
4.1.1. Frekans kontrolünde elde edilen sonuçlar	33
4.1.2. D-STATCOM'un çalışma prensibi	33
4.2. Kontrol Sistemi Bileşenleri.....	37
4.2.1. D-STATCOM ve SVC Sistem İşleyişi	39
4.3. Ayrıntılı ve Ortalama Model.....	39
4.3.1. D-STATCOM devresinin açıklaması	40
4.3.2. D-STATCOM simülasyon ve dinamik tepkisi	41
4.3.3. D-STATCOM modelin ana bileşenleri ve işlevleri	43
4.4. Gözlemler ve Performans Değerlendirmesi.....	46
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	53
5.1. D-STATCOM'un Reaktif Güç Yönetimi	53
5.2. Gerilim Kararlılığı	53
5.3. D-STATCOM Akım Davranışı	54
5.3.1. DC gerilim ve modülasyon indeksi	54
5.4. Genel Değerlendirme	54
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	55
6.1. Sonuçlar	55
6.2. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	56
KAYNAKLAR	588
EKLER	666

ÇİZELGELER/TABLolar LİSTESİ

Çizelge 3.1. Modelde kullanılan değerler.....	35
Çizelge 3.2. D-STATCOM'un tek satırlık bir diyagram değerleri.....	36

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Frekans kontrol teknikleri.....	10
Şekil 3.1. SVC kontrol sistemlerinin genel yapısını açıklayan bir blok diyagram.....	12
Şekil 3.2. Frekans değişikliği	17
Şekil 3.3. Gerilim ve frekans değişikliği	18
Şekil 3.4. Faz Akımları ve Güç değişimi.....	19
Şekil 3.5. Faz Gerilimleri ve Güç kalitesi.....	23
Şekil 3.6. Elektriksel Şebeke ve Test Senaryoları Akış Diyagramı.....	22
Şekil 3.7. Sulama Fiderlerinin Elektriksel Modellemesi.....	19
Şekil 3.8. Güç faktörü optimizasyon sonuçları.....	26
Şekil 3.9. Güç faktörü değerleri.....	26
Şekil 3.10.D-STATCOM'un Şebeke Bağlantısı	27
Şekil 4.1. Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü tabanlı sistemin.....	35
Şekil 4.2. D-STATCOM'un tek satırlık bir diyagramını.....	37
Şekil 4.3. D-STATCOM'un karakteristiği.....	38
Şekil 4.4. Tasarlanan Matlab Simulink test modeli	42
Şekil 4.5. Statcom kontrol bloğu.....	43
Şekil 4.6. D-STATCOM'un şebekedeki gerilim ve akım davranışları.....	46
Şekil 4.7. Reaktif Akım, Referans Akımı ve Reaktif değerler.....	48
Şekil 4.8. Sisteminin enerji akışı ve kararlılık değerleri.....	50

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E	Jeneratör tarafından üretilen elektrik
F	Frekans
I_a	A Fazı akımı
I_b	B Fazı akımı
I_c	C Fazı akımı
I_{qref}	Referans akım
L	Filtreleme ve güç akışını düzenlemek için kullanılan indüktör
N	Devir sayısı
$\emptyset$	Manyetik akı
P	Aktif Güç
Q	Rekatif Güç
S	Görünür Güç
V_{ab}	AB Fazı gerilimi
V_{bc}	BC Fazı gerilimi
V_{ac}	AC Fazı gerilimi
V_{ref}	Referans gerilim
Z	Hat Empedansı
Δ	Faz açısı
Ω	Direnç

Kısaltmalar

AC	Alternatif akım
BESS	Dağıtılmış enerji depolama sistemlerinin
DC	Doğru akım
DER	Dağıtılmış Enerji Sistemlerinin
DG	Dağıtık Üretim
D-STATCOM	Distribution static compensator
FACTS	Esnek AC İletim Sistemleri
OLTC	Yük altında kademe değiştiren transformatörler
PF	Güç faktörü
PI	Orantılı-integral
PID	Proportional Integral Derivative
PLL	Phase-Locked Loop
PWM	Darbe Genişliği Modülasyonu
RoCoF	Rate of Change of Frequency
SFD	İkincil frekans düşüşleri
SIL	Özgül iletim yükünün
SVC	Statik Var Kompanzatör
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
VVC	Volt/Var kontrolü,
VVO	Volt/Var optimizasyonu,

1. GİRİŞ

Modern enerji sistemlerinde, reaktif güç ve frekans kontrolü, sistem kararlılığı ve güvenilirliği için temel öneme sahiptir. Reaktif güç, enerji sisteminde gerilim seviyesinin sürdürülmesine katkı sağlayan, ancak aktif güç üretiminde doğrudan kullanılamayan bir güç bileşenidir. Frekans kontrolü ise sistem yüklerinin dinamik değişimlerine yanıt vererek şebekenin nominal çalışma değerlerinde kalmasını sağlar. Enerji iletim ve dağıtım hatlarında, reaktif güç eksik ya da fazla olduğunda şu etkiler ortaya çıkar:

- Gerilim seviyelerinde düşüş veya aşırı yüklenme,
- İletim kayıplarında artış,
- Enerji verimliliğinin azalması.

Sulama sistemleri gibi endüktif yüklerin yoğun olduğu alanlarda bu etkiler daha belirgin hale gelir. Elektrikli su pompaları ve su dağıtımını sağlayan elektrikli valfler gibi cihazlar, yoğun reaktif güç ihtiyacı duyar. Reaktif güç yönetiminin etkin olmaması durumunda şebekenin kararlılığı tehlikeye girer. Aynı zamanda, yük profillerindeki ani değişimler, şebeke frekansını etkileyerek dengesizliğe neden olabilir. Frekans kontrolü yetersiz olduğunda şu sorunlar görülür:

- Enerji arzında kesintiler,
- Şebeke elemanlarının zarar görmesi,
- Sistem kararlılığının azalması.

Bu bağlamda, reaktif güç ve frekans kontrolü, enerji sistemlerinin ekonomik, sürdürülebilir ve güvenilir bir şekilde çalışması için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmanın odağı, sulama fiderlerinde bu iki parametrenin etkin bir şekilde yönetilmesi üzerine modelleme ve uygulama yapmaktır.

Tarımsal güç sistemleri, genellikle küçük bir sistem olup, arıza ya da kasıtlı olarak ada modunda çalışmasından dolayı komşu sistemlerden destek alamaz. Tarımsal sulama fiderleri gibi bu sistemlerde, genellikle düşük ataletli yerel dağıtılmış jeneratörlerle sınırlı üretim kapasitesi bulunur. İletim sistemlerinin minimal veya hiç olmaması nedeniyle, bu tür bağımsız sistemler, katı dağıtım sistemlerine göre bozulmalara karşı daha savunmasızdır. Yük veya üretim değişiklikleri nedeniyle kolaylıkla bir durumdan diğerine geçebilirler. Bu özelliklerinden dolayı, geleneksel karasal güç sistemleri için kullanılan enerji yönetimi prosedürleri, tarımsal sulama fiderleri gibi bağımsız sistemler için etkili şekilde kullanılamaz.

Bu sistemler için ekonomik, güvenilir, güvenli ve dayanıklı bir dinamik enerji yönetimi şeması geliştirilmesi gereklidir. Dinamik terimi, yük talebinin üretim kapasitesine yakın olduğu durumlarda sistem dinamiklerinin ve geçici durumların önemli olmasını ifade eder. Dinamik enerji yönetiminin temel amacı, enerji kaynaklarının optimal kullanımıyla yüklerin kesintisiz elektrik tedarikini sağlamak ve sistemin güvenilirliği ile dayanıklılığını artırmaktır. Bu tür bir yönetim stratejisi, dinamik kaynak yönetimi (ekonomik dağıtım ve birim taahhüdü), dinamik faz/yük dengeleme ve şebeke yönetimi, dinamik voltaj ve reaktif güç kontrolü ve dinamik talep tarafı yönetimi gibi modüller içermelidir.

Bu çalışma, tarımsal sulama fiderleri için otomatik reaktif güç dengesinin MATLAB Simulink ortamında modellenmesi ve uygulanmasını ele almaktadır. Volt/Var optimizasyonu (VVO) veya Volt/Var kontrolü (VVC), reaktif güç kaynaklarının ve tüketim noktalarının koordinasyonunu sağlayarak stabil ve dengeli bir voltaj profili elde etmeyi hedefler. Güç sistemlerinde genellikle hat voltajı reaktif güçle ilişkilidir; bu nedenle, reaktif güç üretimi ve tüketiminin koordinasyonu, hat voltajlarının belirli sınırlar içinde tutulmasına yardımcı olur.

Yük davranışları, dağıtım sistemindeki voltaj değişimlerine yanıt olarak Volt/Var çalışmalarında önemli bir rol oynar. Tarımsal sulama fiderlerinde yük çalışmaları, dağıtım sistemindeki yüklerin büyük bir kısmının motor yüklerinden oluştuğunu göstermektedir. Diğer yükler sabit güç yükleri, deşarj aydınlatma yükleri ve sabit empedans yükleri gibi türlerden oluşur. Bu yük türlerinin voltaj değişikliklerine verdiği tepki tahmin edilebilir. Örneğin, deşarj aydınlatmaları voltaj %70-80'in altına düştüğünde kapanır. Büyük endüstriyel motorlar, voltaj %75'in altına düştüğünde kapanır ve küçük motorlar (ör. Sulama pompaları) voltaj %70'in altına indiğinde durabilir ve bu da sistemden aşırı akım çekmelerine neden olur. Yeni nesil yüksek verimli AC motorlar düşük ataletli olduklarından, düşük voltaj seviyelerinde küçük motorların neden olduğu problemler artmaktadır. Geçmişte, indüksiyon motorları voltaj düşüşlerinde hızlarını hafifçe azaltarak toplam motor yükünü azaltır ve sistem üzerinde iyileştirici bir etki sağlardı. Ancak yeni nesil ayarlanabilir hız sürücüler, dağıtım hattı voltajı düşse bile motorlara aynı voltaj ve frekansı sağlamaya devam eder, bu da sistemdeki kendiliğinden iyileşme etkisini ortadan kaldırır.

MATLAB Simulink ortamında geliştirilen model, tarımsal sulama sistemlerinde reaktif güç kontrolünün dinamik olarak nasıl optimize edilebileceğini incelemek için

kullanılmaktadır. Bu modelleme, sistemin kararlılığını artırmayı, reaktif güç yönetimini iyileştirmeyi ve tarımsal faaliyetlerde enerji verimliliğini sağlamayı amaçlamaktadır.

1.1. Sulama Fiderleri ve Enerji Verimliliği

Türkiye gibi tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde, sulama sistemleri enerji tüketimi açısından kritik bir yere sahiptir. Sulama fiderleri, tarımsal sulama sistemlerini besleyen enerji altyapısını temsil eder. Bu fiderlerde genellikle büyük kapasiteli elektrikli su pompaları ve su dağıtımını sağlayan elektrikli valfler gibi endüktif yükler bulunur. Bu yükler, reaktif güç ihtiyacı oluşturarak şebeke kararlılığını ve enerji verimliliğini etkiler.

Sulama sistemlerinde enerji verimliliğini etkileyen temel faktörlerden biri reaktif güç tüketimidir. Endüktif yüklerin yüksek reaktif güç çekmesi, enerji tüketimini ve şebeke kayıplarını artırır. Ayrıca bu durumu önlemek için reaktif güç kompanzasyonu gerekir. Kapasitör bankları veya distribution static compensator (D-STATCOM) gibi cihazlarla yapılan kompanzasyon, sistemin güç faktörünü iyileştirir ve enerji kayıplarını azaltır. Benzer şekilde frekans değişikliklerinde, sulama sistemleri gibi dinamik yükler, frekans saptmaları oluşturarak şebeke kararlılığını etkiler. Frekans kontrolünün etkin olmaması, yük dengelemesinde zorluklara ve ekipman arızalarına neden olabilir. Sulama fiderlerinin enerji verimliliğini artırmak için reaktif güç kompanzasyonu ve frekans kontrolü öncelikli olarak ele alınmalıdır. Doğru bir reaktif güç yönetimiyle:

- Enerji kayıpları azaltılabilir,
- Ekipmanların ömrü uzatılabilir,
- Maliyetler düşürülebilir.

Bu çalışmanın hedefi, sulama fiderlerinde enerji verimliliğini artıracak bir modelleme yaklaşımı sunmaktır.

1.2. Çalışmanın Amaçları ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, sulama fiderlerinde reaktif güç dengesini sağlamak ve şebeke frekansını kontrol etmek üzere bir MATLAB Simulink modeli tasarlamak ve uygulamaktır. Sulama sistemlerinin enerji verimliliğini artıracak bir model sunularak hem akademik hem de endüstriyel katkı sağlanması hedeflenmektedir. Bu çalışmanın belirlenen bazı amaçları vardır. Temel olarak, reaktif güç kompanzasyonu kapsamında,

sulama fiderlerinin reaktif güç ihtiyacını analiz ederek etkili bir kompanzasyon sistemi tasarlamak hedeflenmektedir. Ayrıca, kapasitör bankları, D-STATCOM ve diğer kompanzasyon cihazları kullanılarak sistemin güç faktörü iyileştirilmektedir. Temelde frekans kontrolü, sulama sistemlerindeki yük değişimlerinin şebeke frekansına etkisini incelemektedir. Proportional Integral Derivative (PID) kontrolör ve diğer modern kontrol yöntemleri kullanarak frekans sapmalarını minimize etmektedir.

Bu çalışma, MATLAB Simulink platformunda bir model geliştirerek, sulama fiderlerinin enerji sistemlerindeki dinamiklerini simüle ederek, tasarlanan modeli çeşitli yük ve senaryo durumlarında test ederek performansını değerlendirmektedir. Bu çalışmanın kapsamı, sulama sistemlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik bir yönetim stratejisi geliştirilmesini içermektedir. Bu strateji, yalnızca sulama sistemlerine değil, benzer enerji yoğun sistemlere uygulanabilir bir model sunma potansiyeline de sahiptir.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde, tarımsal sulama sistemlerindeki enerji verimliliğini artırmak için sulama fiderlerinin rolü ve enerji yönetimindeki kritik faktörler açıklanmıştır. Ayrıca, çalışmanın amaçları ve kapsamı detaylı bir şekilde ele alınmıştır. İkinci bölümde, konu ile ilgili literatür taraması yapılmış, MATLAB Simulink kullanılarak modelleme yaklaşımları ve frekans kontrol teknikleri hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde, kullanılan materyal ve yöntemler detaylandırılmıştır. Reaktif güç dengesini sağlamak için kullanılan yöntemler, SVC'nin avantajları, harmonik filtrelerin güç kalitesine etkisi ve frekans kontrol stratejilerinin entegrasyonu gibi alt başlıklar incelenmiştir. Ayrıca, güç sistemi model verileri, hat parametreleri, yük modelleri ve MATLAB Simulink ile modelleme süreci açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, geliştirilen test modeli uygulaması üzerinde durulmuş, reaktif güç dengesinin performansı ve kontrol sistemlerinin işleyişi detaylı olarak ele alınmıştır. D-STATCOM'un çalışma prensipleri, dinamik tepkisi ve modelin ana bileşenleri açıklanmış, elde edilen sonuçlar gözlemlenmiş ve performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Beşinci bölümde ise bulgular tartışılmış, D-STATCOM'un reaktif güç yönetimi, gerilim kararlılığı ve akım davranışı üzerinde elde edilen veriler analiz edilmiştir. Son olarak, altıncı bölümde, çalışmanın sonuçları özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek araştırmalara yönelik öneriler sunulmuştur. Bu kapsamda, tez çalışması, enerji verimliliği ve reaktif güç yönetimi konularında önemli bulgular ve pratik çözümler ortaya koymaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tarımsal sulama fiderlerinde yenilenebilir enerji kaynaklarının ve Dağıtılmış Enerji Sistemlerinin (DER'ler) entegrasyonu, artan enerji talebini karşılamak için önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (K. Twaisan, & N. Barışçı, 2022; V. S. K. V., Harish, vd., 2022; M. R. H. Mojumder, vd. 2022). Ancak, bu entegrasyon ters güç akışı, kesintili yenilenebilir enerji üretimi ve dinamik yük profilleri nedeniyle voltaj dengesizliklerine yol açabilir (L. Wang, vd. 2019; P. Mohammadi, & S. Mehraeen, 2016). Özellikle, güneş ve rüzgar enerjisinin değişken üretim profilleri ve sulama sistemleri gibi yüksek talep dinamiklerine sahip yükler, fiderlerdeki voltaj dalgalanmalarını daha da artırmaktadır (M. Hasheminamin, vd. 2015; J.P. Holguin, 2020).

Literatürdeki mevcut yaklaşımlar açısından geleneksel voltaj kontrol cihazların kullanımda birçok çalışma yapılmıştır. N. Tshivhase (2021) ve arkadaşları ile P. R. Partha Sarathy (2018) yük altında kademe değiştiren transformatörler (OLTC), kademe gerilim regülatörleri (SVR) ve kapasitör bankları gibi ekipmanlar, voltajı düzenlemek için yaygın olarak kullanıldığına ilişkin çalışmalar yapmıştır. M. Y. Nguyen, (2020) ise bu cihazların, yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlı dalgalanmalarına ve sulama sistemlerinin ani yük değişimlerine yavaş tepki verdiğini savunmaktadır. Bu durum, cihazların sık kullanılması sonucu aşınma ve bakım gereksinimlerini artırır.

Wagle, R. (2023) ve Xavier, R. (2022) voltaj düzenlemesi için DER'lerde kullanılan Volt-VAR ve Volt-Watt işlevleri, reaktif güç kontrolü ve aktif güç kısıtlaması gibi yöntemler sunmaktadır. Ancak bu işlevler, önceden tanımlanmış eğrilere bağlı olduğundan her zaman optimum performans sağlayamaz (A. Summers vd. 2020). Ayrıca, bu yöntemler genellikle şebeke modeli, topoloji ve yük profili hakkında detaylı bilgi gerektirir ve bu bilgiler eksik olduğunda etkinliği azalır (S. Majumder vd. 2023).

P. Yu vd. (2020) ile C. Das, vd. (2018) dağıtılmış enerji depolama sistemlerinin (BESS) voltaj düzenlemesi ve tepe yüklerin azaltılması için kullanımı yaygın çalışmalar sunmaktadır. Ancak bu sistemlerin etkinliği, genellikle yüksek maliyet ve sınırlı kapasite nedeniyle kısıtlanmıştır (M.A. Hamidan & F. Borousan 2022). Ayrıca, bu yaklaşımlar genellikle dengeli şebekeler için tasarlandığından, dengesiz tarımsal sulama şebekelerinde uygulanabilirliği sınırlıdır (L. Wang vd. 2015).

Reaktif güç kompanzasyonu ve voltaj kararlılığı, yenilenebilir enerji penetrasyonu yüksek olan şebekelerdeki önemli endişelerden biridir (Hossain, J., & Pota, H. R. 2014;

M. A. Saqib, & A. Z. Saleem 2015; M. N. I. Sarkar vd. 2018). Özellikle, büyük çaplı yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu ile birlikte, geleneksel senkron jeneratörlerin yerini almaları sonucunda reaktif güç rezervleri azalmakta ve şebekeler kararsızlığa daha açık hale gelmektedir (H. Karbouj, vd. 2019; L. Meegahapola, vd. 2020; M. Khalid, 2024; C. Medina vd. 2022). Ayrıca, bazı yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin değişken güneş ışınımı ve rüzgar hızları) değişken doğası nedeniyle, güç sistemleri geçici arıza koşullarında dengesiz hale gelebilir (L. Meegahapola, vd. 2020; M. S. Rawat & S. Vadhera 2019; J. Hossain, & H. R. Pota 2014). Özellikle, yeterli reaktif güç destek mekanizmaları olmadığında, düşük ataletli rüzgar türbinleri ve atalet içermeyen güneş-PV sistemleri şebekeye yeterli voltaj desteği sağlayamaz (M. S. Alam vd. 2023; H. Saberi, vd. 2021; F. Zheng vd. 2023; R. Kenyon 2022).

Bu çalışma, yukarıdaki yöntemlerin sınırlamalarını aşmak için tarımsal sulama fiderlerinde otomatik reaktif güç dengesinin sağlanmasına yönelik modelden bağımsız bir kontrol yöntemi önermektedir. MATLAB Simulink ortamında geliştirilen bu model, aktif ve reaktif gücün eşzamanlı kontrolünü gerçekleştirerek voltaj düzenlemesini optimize etmeyi amaçlamaktadır.

Önerilen yöntem, yalnızca bağlantı noktasındaki voltaj ölçümlerine dayanır ve şebeke parametreleri, topolojisi veya yük profili hakkında bilgi gerektirmez. Bu özellik, yöntemin farklı şebeke yapılarına kolayca uygulanabilir olmasını sağlar. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili üretimine ve sulama sistemlerinin ani yük değişimlerine gerçek zamanlı olarak yanıt verir. Bu, geleneksel cihazların yavaş tepkisini aşarak daha etkili bir voltaj düzenlemesi sağlar. Voltaj düzenlemesinde hem aktif hem de reaktif gücün uyumlu bir şekilde kullanılması, fiderlerdeki voltaj dengesizliğini azaltır ve güç kalitesini artırır. Bu yaklaşım, Volt-VAR ve Volt-Watt işlevlerinden daha kapsamlı bir çözüm sunar. Sunulan yaklaşım, dengeli ve dengesiz şebekelerde etkili bir şekilde çalışabilir. Bu özellik, tarımsal sulama sistemleri gibi karmaşık ve dinamik şebeke yapılarına sahip sistemlerde uygulanabilirliğini artırır. Böylece, geleneksel kontrol cihazlarına kıyasla daha az stres altında çalışır, bu da cihazların kullanım ömrünü uzatır ve bakım gereksinimlerini azaltır.

Reaktif güç dengesinin sağlanması, enerji sistemlerinin verimli ve kararlı bir şekilde çalışması için kritik bir gerekliliktir (X. P. Zhang, 2010). Reaktif güç, elektriksel enerji sistemlerinde, gerilim seviyelerinin stabil kalması için gereken bir bütünleyici bileşendir. Ancak, bu güç aktif çalışmada kullanılmadığı için enerji kayıplarına ve

sistem yüklenmesine neden olur. Literatürde reaktif güç dengesinin sağlanmasında şu yaklaşımlar öne çıkmaktadır:

- Kapasitör Bankları: Endüktif yüklerin tükettiği reaktif güç ihtiyacını azaltmak için kullanılır.
- D-STATCOM ve Statik Var Kompanzatör (SVC): Dinamik yüklerin reaktif güç ihtiyacını hızlı bir şekilde karşılamak için kullanılan modern cihazlardır.
- Reaktif Güç Kontrol Algoritmaları: PID ve yapay zekâ tabanlı kontrol sistemlerinin, reaktif güç dengelemede etkin bir çözüm sunduğu ifade edilmektedir.

Sulama sistemleri, tarımsal faaliyetlerde enerji tüketiminin yoğun olduğu alanlardan biridir. Bu sistemlerde enerji optimizasyonu özellikle reaktif güç dengesinin ve yük profillerinin şekillendirilmesi yoluyla sağlanmaktadır. Literatürde enerji optimizasyonuna yönelik başlıca yaklaşımlar şunlardır:

- Yük Dengeleme: Sulama zamanlarının ve yük profilinin optimize edilmesi.
- Yenilenebilir Enerji Entegrasyonu: Sulama sistemlerine gözlenen rüzgar ve güneş enerjisi entegrasyonu.

Bu tez çalışması, tarımsal sulama fiderlerinde enerji verimliliğini artırmak, sistem kararlılığını sağlamak ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu optimize etmek için etkili bir çözüm sunmaktadır. Önerilen yöntem, literatürdeki mevcut yaklaşımlardan farklı olarak, modelden bağımsız bir şekilde hem aktif hem de reaktif gücü kontrol ederek voltaj düzenlemesini optimize etmektedir. Bu, tarımsal sulama gibi kritik uygulamalar için sürdürülebilir ve ekonomik bir enerji yönetimi sağlar.

2.1. MATLAB Simulink ile Modelleme Yaklaşımları

MATLAB Simulink, enerji sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu için güçlü bir araçtır (D. K. Chaturvedi 2017; L.A. Dessaint vd. 1999). Mikro şebekeler, paralel bağlı dağıtık üretim birimlerinden oluşur ve hem şebeke bağlantılı hem de adalı modda çalışabilir (Y. Han vd. 2017; Z. Shu vd. 2010). Ana iletim sistemlerini rahatlatmaları, hat kayıplarını azaltmaları ve güç kalitesini iyileştirmeleri nedeniyle büyük ilgi görmektedir (E. F. Fuchs, & M. A. Masoum 2011; S. Galli vd. 2011). Ancak adalı modda, geleneksel güç düşümü kontrolü, empedans uyumsuzlukları ve Dağıtık Üretim (DG) birimlerinin farklı kapasiteleri nedeniyle aktif ve reaktif güç paylaşımında sorunlara yol açmaktadır

(Y. Asadi vd. 2022; P. Wang, vd. 2015). Bu nedenle, uyarlanabilir güç düşümü, ağ tabanlı ve maliyet tabanlı yöntemler gibi geliştirilmiş kontrol stratejileri incelenmiştir. Reaktif güç paylaşımını iyileştirmek için hiyerarşik kontrol stratejileri kullanılırken, grafik teorisi, çok ajanlı sistemler ve öngörü kontrolü gibi yaklaşımlar öne çıkmaktadır (Y. Han 2016; M.S. Rahman vd. 2017). Ayrıca, iletişim gecikmelerinin etkisini azaltmak için bu yöntemler geliştirilmiştir. Makale, adalı mikro şebekeler için bu kontrol stratejilerini değerlendirirken gelecekteki araştırma yönelimlerini de tartışmaktadır. Reaktif güç dengesinin ve frekans kontrolünün modellenmesinde yaygın olarak aşağıdaki yaklaşımlar kullanılmaktadır (Y. Han vd. 2016; I. Andrade vd. 2021):

- Dinamik Sistem Modelleme: Elektriksel bölümlerin reaktif güç ve yük değişimleri altındaki davranışlarını incelemek (M. Eremia & M. Shahidehpour 2013; J. Machowski vd. 2020; D. Karlsson & D.J. Hill 1994).
- Kontrol Sistemleri: PID kontrolörler ve akıllı algoritmalarla gerçek zamanlı kontrol mekanizmalarını tasarlamak (Y. Zhou 2022; K. H. Ang vd. 2005; T. Abut & S. Soyguder 2019).

2.2. Frekans Kontrol Teknikleri ve Uygulamaları

Frekans kontrolü, enerji sistemlerinin frekansını talep veya arz dalgalanmaları sırasında nominal değeri etrafında sabit tutmayı sağlar (Zhao, C. vd. 2014). Geleneksel olarak jeneratör tarafında uygulanır ve farklı zaman ölçeklerinde uyum içinde çalışan üç mekanizmadan oluşur (Zhao, C. vd. 2012; Bergen A. R. and V. Vittal 2000; Machowski, J. vd. 2008). Birincil frekans kontrolü, düşük saniyeler mertebesine kadar olan bir zaman ölçeğinde çalışır ve yerel frekans sapmasına bağlı olarak bir jeneratörün mekanik güç girişini bir referans noktası etrafında ayarlamak için bir hız regülatörü kullanır (Undrill, J. 2018; Ozer, B., vd. 2015). Bu kontrol türü düşürücü kontrol olarak adlandırılır ve tamamen merkeziyetsizdir. Birincil kontrol, gücü yeniden dengeleyip frekansı stabilize edebilir ancak nominal frekansı tek başına geri getiremez (Mallada, E., vd 2017).

İkincil frekans kontrolü (otomatik üretim kontrolü olarak adlandırılır) yaklaşık bir dakika süresince çalışır ve merkezi bir yaklaşımla kontrol bölgesindeki hız regülatörlerinin referans noktalarını ayarlayarak frekansı nominal değere ve bölge arası güç akışlarını planlanan değerlere geri döndürür (Rebours, Y. vd 2007; Ullah, K., vd 2021). Üçüncü frekans kontrolü olan ekonomik dağıtım ise birkaç dakika veya daha uzun bir zaman ölçeğinde çalışır ve çevrimiçi jeneratörlerin çıktı seviyelerini ve bölge arası

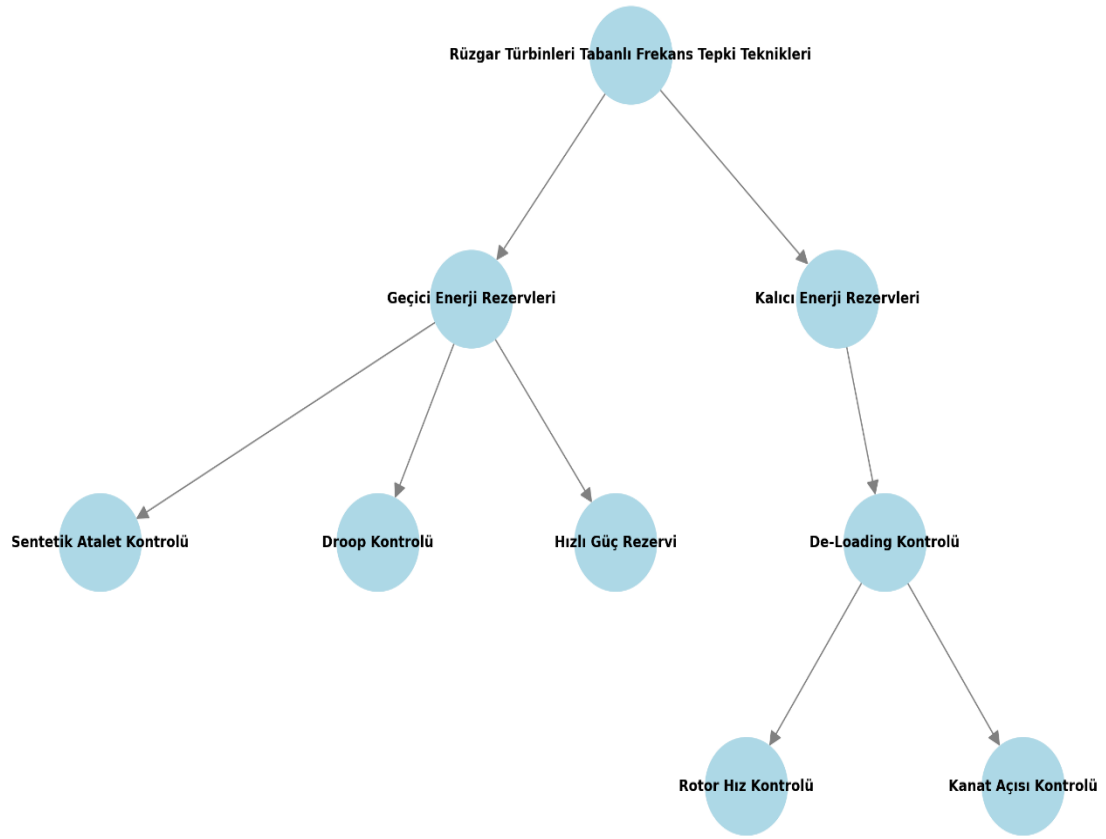
güç akışlarını planlar. Bu üç mekanizmanın hiyerarşik bir modeline ve kararlılık analizine ilişkin yakın tarihli bir çalışma için (A. Kiani and A. Annaswamy 2012)'e bakılabilir. Bu makale, birincil frekans kontrolünde yük katılımına odaklanmaktadır.

Frekans kontrolü, enerji sistemlerinde nominal frekansı koruyarak sistemin stabilitesini sağlamaktadır (C. Zhao 2014; K. Dehghanpour & S. Afsharnia 2015). Literatürde yer alan başlıca frekans kontrol teknikleri bulunmaktadır. PID Kontrolörler, geleneksel kontrol yöntemleri ile frekans sapmasını minimuma indirmektedir. Akıllı Sistemler ise bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi yüksek çözünürlük kontrol mekanizmalarını içermektedir. Şekil 1'de sunulan frekans tepki tekniklerinin sınıflandırması yeniden tanımlanmıştır ve şu iki önemli husus dikkate alınmıştır: 1) frekans kontrolü için kullanılan farklı enerji türleri ve 2) kontrol yaklaşımlarında kullanılan giriş sinyalleri (Y. Cheng vd. 2020). Bu iki boyut, bu alandaki araştırma çalışmaları açısından önemlidir ve araştırılmaya değerdir. Öte yandan, önerilen derleme makalesi, ikincil frekans düşüşleri (SFD) ile ilgili yaklaşımları detaylı bir şekilde ele almaktadır. Pek çok araştırma bu konuya yeterince dikkat etmese de, SFD'nin frekans tepkileri üzerindeki etkileri oldukça belirgindir. Bu durum, senkron olmayan jeneratörlerin entegrasyon seviyesine bağlı olarak SFD genliğinin ilk frekansı, minimumundan daha büyük olabileceği gerçeğinden kaynaklanmaktadır (Muteithia, W. M. 2014).

Şekil 2.1'de sunulan şema, rüzgâr türbinleri tabanlı frekans tepki tekniklerini sınıflandırmaktadır. Şema iki ana kategoriye ayrılmıştır: Geçici enerji rezervleri ve Kalıcı enerji rezervleri. Aşağıda her bir kategori ve alt dalları açıklanmıştır. Geçici Enerji Rezervleri (Temporary Energy Reserves), kısa süreli frekans sapmalarını dengelemek için kullanılan yöntemleri ifade eder ve kategori şu alt teknikleri içermektedir. Sentetik Atalet Kontrolü (Synthetic Inertia Control), Frekansın değişim hızını (RoCoF - Rate of Change of Frequency) izleyen bir mekanizma kullanılarak hızlı tepki sağlanır. Bu yöntem, rüzgâr türbinlerinin ataleti simüle etmesine olanak tanımlanır. Droop Kontrolü, yerel frekans sapmalarını izleyerek frekans dengelemesi yapar. Frekans düşüşüne bağlı olarak türbinlerin çıkış gücünü ayarlayan merkeziyetsiz bir kontrol yöntemidir. Hızlı Güç Rezervi (Fast Power Reserve) ise frekans sapmalarını izleyerek hızlı bir şekilde güç sağlayan bir yöntemdir. Genelde kısa süreli dalgalanmalara müdahale etmek için kullanılır. Kalıcı Enerji Rezervleri (Persistent Energy Reserves), kalıcı enerji rezervleri, uzun süreli frekans dengesini sağlamak için kullanılan yöntemlerdir. De-Loading Kontrolünde, türbinlerin ürettiği gücü azaltarak frekans dengelemesi yapar. Bu kontrol

yöntemi iki farklı teknikle uygulanabilir. Rotor Hız Kontrolü (Rotor Speed Control), türbinin rotor hızını ayarlayarak güç üretimini optimize eder. Kanat Açısı Kontrolü (Pitch Angle Control), türbin kanatlarının açısını değiştirerek güç çıkışı düzenlenir.

Geçici enerji rezervleri, hızlı müdahaleler için kullanılırken, kalıcı enerji rezervleri uzun vadeli frekans stabilitesini sağlar. Her bir alt teknik, farklı bir kontrol sinyali (örneğin, RoCoF veya frekans sapması) izler ve buna göre tepki verir. Rüzgâr türbinlerinin frekans kontrolüne katkısı, bu teknikler aracılığıyla enerji sistemlerinin kararlılığını artırmayı hedefler.



Şekil 2.1. Frekans kontrol teknikleri

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Sulama fiderlerinin elektriksel modellemesi, enerji akışını ve dinamik davranışları anlamak için kritik bir adımdır. Sulama sistemleri, genellikle endüktif yük karakterine sahip motorlar ve pompalar ile beslenir. Bu nedenle, aşağıdaki unsurlar göz önünde bulundurularak elektriksel modelleme yapılmalıdır:

Yük profili analizi, sulama pompalarının yük profilleri, günlük ve mevsimsel olarak değişiklik gösterir. Bu profiller modelin giriş parametreleri olarak belirlenir. Motorların çalışma süresi, çekilen akım ve gerilim değerleri modellenir. Sulama fiderlerinin elektriksel iletim hatları, hat empedansı, gerilim düşümü ve kayıplar gibi parametrelerle modellenir. Gerilim seviyesi 400V veya 33kV gibi yaygın dağıtım seviyelerine göre seçilmektedir. Pompa motorlarının endüktif özellikleri, reaktif güç talebini artıran bir faktördür. Bu dinamik, Simulink modeli ile detaylı olarak incelenmektedir.

3.1. Reaktif Güç Dengesini Sağlamak İçin Kullanılan Yöntemler

Reaktif güç dengesini sağlamak için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada iki ana yöntem ele alınmaktadır (Li, J. vd. 2010). Bunlar, SVC ve D-STATCOM 'dur. SVC, reaktif güç dengesini sağlamak için kullanılan modern bir güç elektronik cihazıdır (Wang, J., vd. 2008). Bu yöntemler, hızlı tepki süresi sayesinde yük değişimlerine karşı dinamik çözümler sunmaktadır. Ayrıca gerilim düzenlemesi ve güç faktörü iyileştirmesi sağlamaktadır.

SVC'nin bir TCR (Thyristor Controlled Reactor) ve TSC (Thyristor Switched Capacitor) kombinasyonu MATLAB Simulink ortamında modellenmektedir ve SVC'nin yük değişikliklerine tepkisi analiz edilmektedir (Mutluer, H. B. 2008).

Dinamik kompanzasyon cihazları, sürekli değişen reaktif güç talebini karşılamak için geliştirilmiştir. D-STATCOM gibi cihazlar bu kategoridedir. Bu yöntem, şebeke kararlılığını artırmaktadır. Ayrıca, daha geniş gerilim ve frekans sapmalarında etkinlik göstermektedir. D-STATCOM gibi cihazların Simulink'te parametreleri tanımlanır ve reaktif güç ihtiyacını karşılamadaki performansları analiz edilmektedir.

3.1.1. Statik VAR kompanzatörü

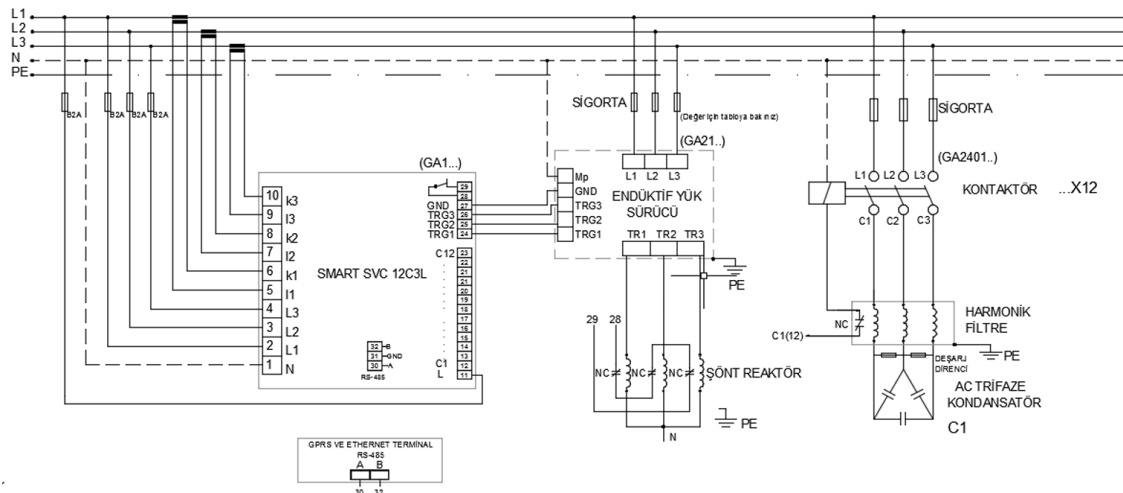
SVC, FACTS cihazlarından biri olup, elektrik şebekesine paralel bağlanarak reaktif güç üretir veya tüketir. Bu sayede şebekedeki gerilim gibi önemli parametreler etkili bir şekilde kontrol edilir. SVC cihazları, güvenli ve işletim açısından esnek bir yapıya sahiptir. Bu esneklik, sistem gereksinimlerine göre sürekli olarak reaktif güç üretme veya tüketme yeteneğinden kaynaklanır. SVC'ler, geniş bir gerilim ve güç aralığında çalışabilir ve ani yük değişimlerine hızlı bir şekilde tepki verebilir. Milisaniye seviyesindeki tepki süreleri, dinamik yüklerin etkisini azaltarak sistem kararlılığını artırır (Çitci. A, 2015).

3.1.2. Statik VAR kompanzatörü yapısı ve çalışma prensibi

SVC cihazları genellikle şu iki temel yapıdan oluşur:

- Tristör Kontrollü Reaktör (TCR): Endüktif reaktif güç tüketimini kontrol eden bir yapıdadır. TCR, şebekedeki reaktif güç gereksinimine göre devreye girer veya çıkar.
- Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC): Kapasitif reaktif güç üreten bir yapıdadır ve şebekenin gerilim seviyelerini dengelemede önemli rol oynar.

Bu iki yapı, birlikte çalışarak reaktif güç üretimini ve tüketimini hassas bir şekilde düzenler. SVC kontrol sistemlerinin genel yapısını açıklayan bir blok diyagram, bu sistemlerin çalışma mekanizmasını görselleştirir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. SVC kontrol sistemlerinin genel yapısını açıklayan bir blok diyagram (Smart SVC Reaktif Rev 1.00)

Gerilim kontrol döngülerinde Statik VAR Kompanzatörleri (SVC), güç sistemlerinde meydana gelen dalgalanmaları etkili bir şekilde kontrol edebilen ve sistem kararlılığını artıran kritik bir rol oynar. SVC'ler, şebekedeki reaktif güç dengesini dinamik olarak ayarlayarak gerilim seviyelerini stabilize eder. Bu sayede, ani yük değişimleri veya sistemdeki diğer dengesizliklerden kaynaklanan gerilim dalgalanmaları minimize edilir ve güç sisteminin genel performansı iyileştirilir.

İdeal bir SVC, aktif ve reaktif güç kaybına neden olmayan, sistemdeki voltajı referans değerine eşit tutabilen ve bu değeri sabit bir şekilde koruyabilen bir kontrolör olarak tanımlanır. Aynı zamanda, değişken yük koşullarına karşı son derece hızlı yanıt verebilme yeteneğine sahiptir. SVC, bu özellikleri sayesinde hem güç kalitesini iyileştirir hem de enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin verimliliğini maksimum düzeye çıkarır.

SVC'ler, bu özellikleri sayesinde çeşitli sektörlerde ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarından bazıları şunlardır:

- Çelik Üretim Tesisleri: Çelik üretiminde kullanılan ark ocakları, hurda ergitme sürecinde dinamik ve değişken reaktif güç tüketimine neden olur. Ark uzunluğundaki rastgele değişimler, sistemde gerilim dalgalanmalarına yol açar. SVC, bu dalgalanmaları dengeliyerek güç kalitesini artırır ve şebeke stabilitesini sağlar. Ayrıca, hızla değişen yüklerin bulunduğu bu tür tesislerde, SVC kullanımı enerji verimliliğini önemli ölçüde iyileştirir.
- İletim Sistemleri: SVC'ler, iletim hatlarının geçici kararlılığını artırarak ani yük değişimlerini hızlı bir şekilde dengelemektedir (Esfahani. M. T, and Vahidi. B. 2016). Bunun yanı sıra, iletim hatlarında oluşan harmonik distorsiyonu minimize ederek güç kalitesini iyileştirir ve sistemin genel performansını artırır.
- Yenilenebilir Enerji Santralleri:
 - Rüzgâr Enerji Santralleri: SVC, rüzgâr enerji santrallerinde gerilim stabilitesini sağlamada kritik bir role sahiptir. Rüzgâr santralleri, iletim hatlarında oluşan gerilim düşmelerine karşı hassastır. SVC kullanımı, bu tür durumlarda santralin devre dışı kalmasını önler ve sürdürülebilir enerji üretimini destekler (A. Garg and S. K. Agarwal, 2011).
 - Güneş Enerji Sistemleri: Ani güç değişimlerinin olduğu bu sistemlerde, SVC kullanımı şebeke bağlantısında süreklilik sağlar.

3.1.3. SVC'nin avantajları

- Gerilim Kontrolü: Gerilim seviyesini stabil tutarak sistemin genel performansını iyileştirir.
- Kararlılık Artışı: Elektromekanik salınımları sönümleyerek şebekenin stabilitesini artırır (M. H. Shwehdi and A. H. Mantawy, 2019).
- Dinamik Yük Yönetimi: Hızla değişen yüklerin etkisini azaltarak enerji verimliliğini artırır.
- Harmoniklerin Azaltılması: Güç kalitesini artırarak endüstriyel ve ticari sistemlerin performansını yükseltir.
- Enerji Verimliliği: Daha düşük enerji kaybı ile ekonomik fayda sağlar.

SVC, modern enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak ve güç kalitesini iyileştirmek için vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Sektörel uygulamalardaki başarıları ve geniş kullanım alanı, bu teknolojinin önemini daha da artırmaktadır.

3.2. Reaktif Güç Dengesini Sağlamanın Sonuçları

Elektrik sistemlerinde reaktif güç, gerilim ve akım arasındaki faz farkından kaynaklanan ve şebeke kararlılığı ile enerji verimliliği için kritik öneme sahip bir parametredir.

- Sabit ve Ayarlanabilir Kapasitör Bankaları ile Reaktif Güç Kompanzasyonu: Kapasitör bankaları, endüktif yüklerin neden olduğu reaktif güç ihtiyacını dengelemek için yaygın bir çözüm sunar. Sabit Kapasitör Bankalarının kullanım alanları: Sürekli sabit reaktif güç ihtiyacı olan sistemlerdir. Avantajları ise basit kurulum, düşük maliyet, bakım kolaylığıdır. Kısıtlamalarında da değişken yük profillerine uyum sağlayamaz. (Glover, J. D., vd. 2016).
- Ayarlanabilir Kapasitör Bankaları: Kullanım alanları, yük değişimlerine duyarlı sistemlerde otomatik kontrol mekanizmaları ile sağlanır. Avantajları, değişken yük koşullarına uyum sağlar. Teknolojisinde, kontaktörlü veya tristör kontrollü sistemler kullanılır (El-Hawary, M. E.2008).
- Senkron Kompanzatörler ile Dinamik Reaktif Güç Desteği: Senkron kompanzatörler, büyük şebekelerde dinamik reaktif güç ihtiyacını karşılamak için etkili bir yöntemdir.

- Senkron Motorlar: Avantajlarında, dinamik reaktif güç üretme ve tüketme kapasitesi vardır. Uygulama Alanlarında, yüksek gerilim iletim hatları ve endüstriyel tesisler bulunmaktadır (Kundur, P. 1994).
- Senkron Generatörler: Gerilim Stabilizasyonu, gerilim dalgalanmalarını minimize eder. Kısıtlamaların başında yüksek olan ilk yatırım maliyetleri gelmektedir (Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. 1994).
- D-STATCOM (Dağıtım Statik Senkron Kompanzatörü) ile Hızlı Reaktif Güç Kontrolü: D-STATCOM, reaktif güç kompanzasyonunda çok hızlı ve etkili bir çözüm sunar. Güç elektroniği anahtarlama cihazları (IGBT veya GTO). Performans açısından milisaniye seviyesinde tepki süresine sahiptir (Hingorani, N. G., & Gyugyi, L. 2000). Kullanım alanlarında yenilenebilir enerji sistemleri, rüzgâr, güneş ve hızlı yük değişimlerinin olduğu endüstriyel tesisler bulunmaktadır (Mohan, N. 2012).
- SVC (Statik Var Kompanzatörü) ile Reaktif Güç Stabilizasyonu: SVC, tristör kontrollü reaktörler ve kapasitörler ile şebeke gerilim profilini iyileştirir.
- Tristör Kontrollü Reaktörler (TCR), Endüktif reaktif güç tüketimi kontrol edilir.
- Tristör Kontrollü Kapasitörler (TSC) Kapasitif reaktif güç üretimi sağlar (Eremia, M., & Shahidehpour, M. 2013).

3.2.1. Harmonik filtreler ile reaktif güç ve güç kalitesinin optimize edilmesi

Harmonik filtreler, hem reaktif güç kompanzasyonu hem de harmonik distorsiyonunu azaltır. Genel olarak Pasif Harmonik Filtreler kullanılır ve en büyük avantajları düşük maliyette olmalarıdır. Temel kısıtları ise belirli harmonik frekanslara odaklanmış olmalarıdır (Bollen, M. H. J. 2000). Diğer bir kullanılan yöntem ise Aktif Harmonik Filtreleridir. Bu filtrelerin temel avantajları geniş bantta harmonik azaltma yeteneğine sahip olmalarıdır. Kullanım alanları ise genelde hassas elektronik cihazların bulunduğu sistemlerdir (Akagi, H. vd. 2017).

Yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem ise, Şönt Reaktörler ile Kapasitif Reaktif Güç Dengesidir. Bunlar, uzun iletim hatlarında kapasitif reaktif güç üretimini azaltmak ve gerilim dalgalanmalarını kontrol altında tutmak için kullanılırlar. Genel olarak yüksek gerilim iletim hatları ve kapasitif yüklerin olduğu sistemlerde kullanılırlar.

3.3. Frekans Kontrol Stratejilerinin Entegrasyonu

Basit bir geri besleme döngüsü ile frekans sapmalarını düzelten bir PID kontrol mekanizması uygulanmaktadır. PID kontrolörün kazanç değerleri, sistem dinamiklerine göre optimize edilmektedir. Bulanık Mantık ve Hibrit Kontrol ise dinamik yük değişimlerine daha hızlı yanıt vermek için bulanık mantık tabanlı kontrol sistemleri kullanılmaktadır. PID ve bulanık mantık kontrolörlerin hibrit kombinasyonu, daha hassas ve hızlı bir kontrol sağlamaktadır. Böylece, frekans kontrol algoritmaları, Simulink modeli içine entegre edilerek yük değişimlerine karşı sistem stabilitesinin korunması hedeflenir. Etkili bir reaktif güç yönetimi, herhangi bir güç sisteminde üç temel gerekliliği karşılamalıdır:

1. Tüm voltaj seviyelerinde, hem normal hem de beklenmedik durumlarda, voltajın belirli sınırlar içinde tutulmasını sağlamalıdır.
2. Gerçek güç akışındaki tıkanıklığı en aza indirmelidir.
3. Güç kayıplarını en aza indirmelidir.

Reaktif güç, voltajın bir fonksiyonudur ve voltaj da frekansı takip eder. Dolayısıyla, yalnızca voltaj değil, aynı zamanda frekans da reaktif güç değişiminde önemli bir rol oynamaktadır. Sabit frekansa sahip gelişmiş ülkelerdeki çoğu güç sisteminde voltaj kontrolü üzerine çok sayıda literatür bulunmaktadır. Ancak Hindistan'da, frekans geniş bir aralıkta değiştiği için, mevcut voltaj kontrol teknikleri yetersiz kalmaktadır. Voltaj sorunlarını ele almak için frekans sorunlarını da ele almak gereklidir.

3.3.1. Reaktif güç kaynakları

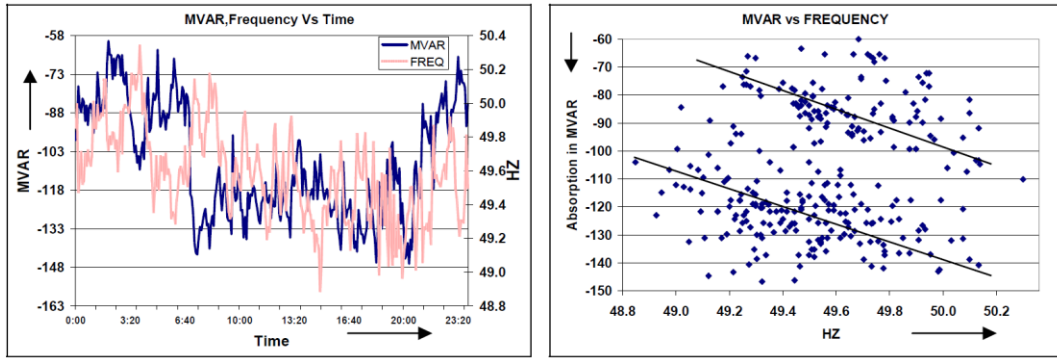
Reaktif güç kaynakları, Dinamik ve Statik olarak kategorize edilebilir. Senkron kompansatör, güç elektroniği cihazları (SVC, FACTS vb.) gibi dinamik kaynaklar reaktif gücün önemli dinamik kaynaklarıdır. Reaktörler, kondansatörler, iletim hatları ve transformatör kademeli değiştiricileri ise statik kaynaklar kategorisine girer. Dinamik kaynaklar, hızlı ve sürekli kontrol edilebilir reaktif destek sağlar. Kondansatörler ve indüktörler değişken değildir ve yalnızca büyük adımlarla kontrol sunar. Özgül iletim yükünün (SIL) altındaki hatlar reaktif güç üretirken, SIL üzerindeki hatlar reaktif güç tüketir.

3.4.2. Jeneratörün frekans tepkisi

Şebekedeki jeneratörler, optimum kullanım için birbirine bağlanır. Üretim ve talep arasındaki dengesizlikler nedeniyle sistemdeki frekans artar veya azalır. Bu frekanstaki değişim, jeneratörlerin reaktif güç kapasitesini etkiler. Jeneratör tarafından üretilen EMF, akı ve frekansın bir fonksiyonudur:

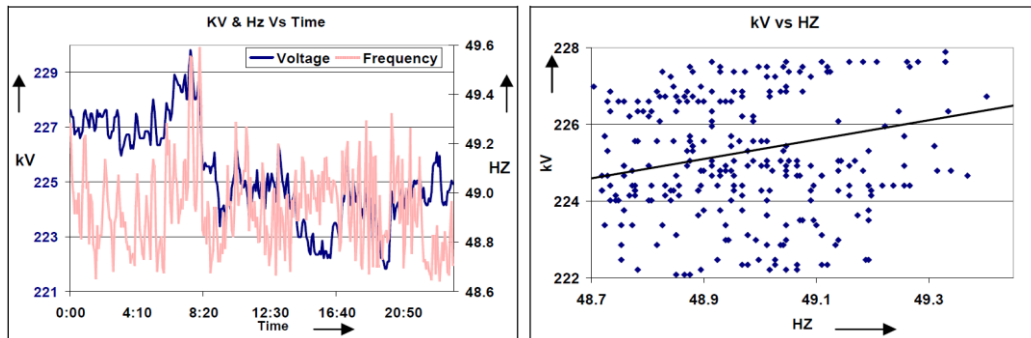
$$E = 4.44 f \Phi n \quad (3.1)$$

Frekans değişikliği sırasında, indüklenen EMF akıyı değiştirerek sabit tutulur. Ancak pratikte bu ayar ideal şekilde yapılamaz ve EMF doğrudan frekansa bağlı hale gelir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Frekans değişikliği

Frekans yüksek olduğunda jeneratör tarafından emilen MVAR artar, düşük olduğunda ise azalır. MVAR ve frekansın dağılım grafiği (Şekil 3.3) bu eğilimi desteklemektedir. Bu durum, şebekedeki MVAR gereksiniminin frekansı takip ettiğini doğrular.



Şekil 3.3. Gerilim ve frekans değişikliği

Frekans ve voltaj arasındaki ilişkiyi görselleştirmek için aynı radyal yük için voltaj ve frekans grafiği çizilmiştir (Şekil 3.2). Bir artış eğilimi, voltajın frekansla birlikte arttığını göstermektedir. Bu durum, karma yükün hem voltaja hem de frekansa bağımlı olduğunu açıkça göstermektedir. İletim planlama kriterleri şu yük modelini benimsemektedir:

$$P = P_o(f/f_o) \quad (3.2)$$

$$Q = Q_o(V/V_o)^2 \quad (3.3)$$

Bu modelde, **Q**, yani yükün reaktif talebi, frekanstan bağımsızdır. Ancak karma yük modeli için IEEE Komite Raporu'na göre [4], frekans bağımlılığı ve voltaj bağımlılığı terimleri eklenmiştir:

$$P(V,f) = (a_1 V^{n_1} f^{m_1} + a_2 V^{n_2} f^{m_2} + a_3 V^{n_3} f^{m_3}) P_o \quad (3.4)$$

$$Q(V,f) = (a_4 V^{n_4} f^{m_4} + a_5 V^{n_5} f^{m_5} + a_6 V^{n_6} f^{m_6}) Q_o \quad (3.5)$$

Burada, **a1** ila **a6** katsayıları, genel konut, endüstriyel ve tarımsal yük gibi yük kategorileriyle ilişkilidir. Bu katsayılar birim değerine ulaşacak şekilde toplamda toplanır:

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1.0 \quad (3.6)$$

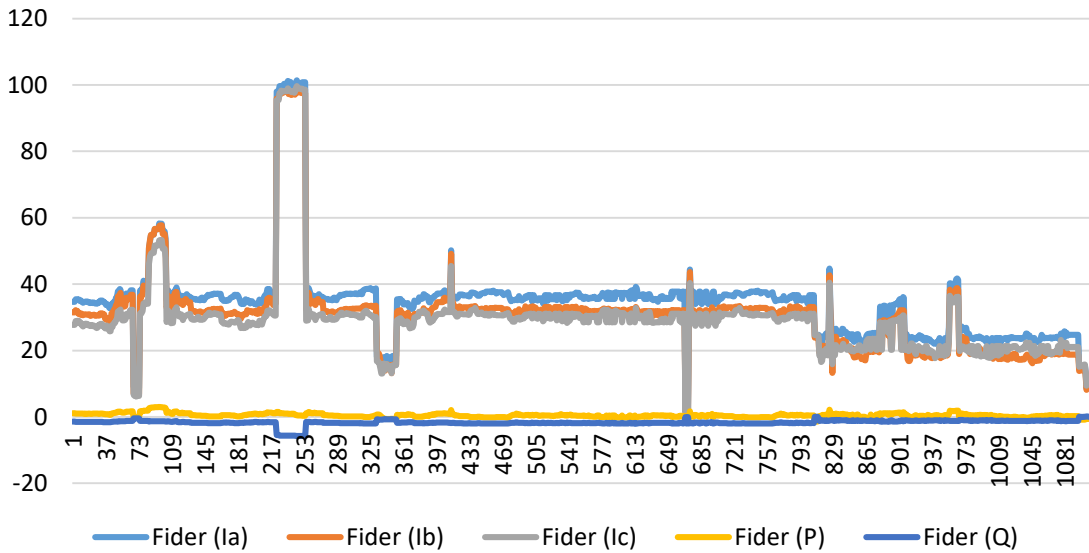
$$a_4 + a_5 + a_6 = 1.0 \quad (3.7)$$

Üsler, bu tür yük kategorilerini karakterize etmede önemli bir esneklik sağlar.

3.4. Güç sistemi model verileri

Elektriksel Sistem Parametrelerinde Şebeke Gerilimi: 33 kV (orta gerilim) ve 400 V (düşük gerilim) olarak tanımlanmıştır. Hat Empedansı: $0.1 + j0.05 \Omega/\text{km}$ ve Hat Uzunluğu: 5 km (ortalama) ile modellenmiştir. Kullanılan yük tipleri, Endüktif yükler (motorlar ve pompalar) olarak kullanılmıştır. Tasarlanan modelde reaktif Güç Gereksinimi: 200 kVAR (ortalama) olarak alınmıştır. Kullanılan yük profilinde Günlük Çalışma Süresi: 8 saat (sabah ve akşam yoğunluğu) olarak modellenmiştir. Yük Değişiminde %50 Yük (Normal çalışma koşulları) ve %100 Yük (Sulama saatlerinde pik

yük) olmak üzere tasarlanan sistemin Güç Faktörü: 0.7 (kompanzasyon öncesi), 0.95 (kompanzasyon sonrası) alınmıştır. Kompanzasyon Cihazları olarak D-STATCOM (Dinamik reaktif güç desteği 200 kVAR kapasite) ve SVC tercih edilmektedir. Sistemdeki Kapasitör Bankı: 50 kVAR (sabit kompanzasyon) olarak tasarlanmıştır. Kontrol Parametrelerindeki Frekans Kontrol Kazançları için PID Kazançları: $K_p = 1$, $K_i = 0.1$, $K_d = 0.01$ değerleri tanımlanmıştır. Frekans Sapması Limitleri: ± 0.1 Hz ve Gerilim Sapması: $\pm \%5$ sınırı bulunmaktadır. Sulama fiderlerinin elektriksel modellemesi, enerji sisteminde reaktif güç akışının ve frekans dinamiklerinin anlaşılması için kritik bir adımdır. Bu modelleme, sistemin yük karakteristiklerinin ve şebeke dinamiklerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır. Bu kapsamda aşağıdaki bileşenler ve parametreler dikkate alınmalıdır. Tarımsal sulama fideri için aşağıda gösterilen Şekil 3.3’de a,b ve c fazlarına ait akım değeri 1081 saat için güç kalitesi ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Bu veriler model tasarımında kullanılmıştır.

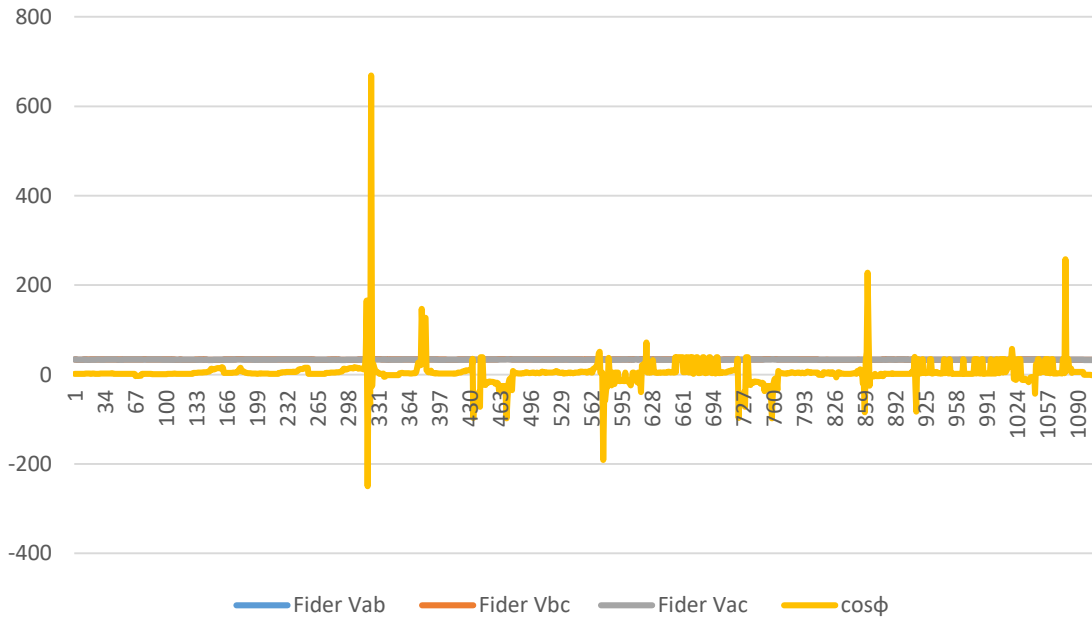


Şekil 3.4. Faz Akımları ve Güç değişimi

Şekil 3.4’de gösterilen grafikte, üç fazlı akımlar (I_a , I_b , I_c), aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) zaman serisi boyunca gösterilmiştir. Üç Fazlı Akımlar (I_a , I_b , I_c) Mavi, turuncu ve gri çizgilerle gösterilen faz akımları (I_a , I_b , I_c) genel olarak dengeli bir şekilde seyretmektedir. Ancak belirli noktalarda (örneğin, 217. ve 649. zaman dilimleri) fazlardan birinde ani düşüş veya yükseliş olduğu görülmektedir. Bu durum, ani yük değişikliklerinden veya dengesiz yüklenmeden kaynaklanabilir. Faz akımları arasındaki genel denge, sistemin şebekeye düzgün bir şekilde bağlı olduğunu göstermektedir; ancak ani değişiklikler, gerilim kararlılığı ve enerji kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.

Aktif güç oldukça düşük seviyelerde seyretmektedir ve dalgalanmalar sınırlıdır. Aktif güç, sistemdeki yüklerin enerji tüketimi açısından doğrudan bir ölçüt sağlar. Düşük ve stabil bir aktif güç seviyesi, sistemin düşük yükte çalıştığını veya enerji tüketiminin sınırlı olduğunu gösterebilir. Gösterilen reaktif güç, grafikte aktif güce göre daha küçük değerlerde seyretmektedir. Belirli noktalarda reaktif güçte küçük değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar, endüktif yüklerden kaynaklanan reaktif güç talebinin yönetilmesiyle ilişkilidir. Reaktif gücün genel olarak düşük olması, sistemde reaktif güç yönetiminin başarılı bir şekilde yapıldığını gösterebilir. 217. zaman diliminde, üç fazlı akımlarda ani bir artış ve reaktif güçte değişiklik görülüyor. Bu, büyük bir yük değişimi veya sistemdeki bir ani talep artışı ile ilişkilendirilebilir. 649. zaman diliminde benzer bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu da yükün azalması veya şebeke tarafında bir müdahale olduğunu gösterebilir. Aktif ve reaktif güçteki düşük seviyelerdeki dalgalanmalar, sistemin genel olarak stabil bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Üç faz arasındaki denge, enerji verimliliği ve güç faktörünün optimize edilmiş olabileceğine işaret eder.

Akım Dalgalanmalarının İncelenmesinde, belirli zaman dilimlerinde (örneğin 217 ve 649) akımlardaki ani değişiklikler detaylı bir şekilde incelenmeli ve bu değişimlerin sistem üzerindeki etkisi analiz edilmelidir. Reaktif güç dalgalanmalarının etkilerini minimize etmek için D-STATCOM gibi bir reaktif güç kompanzasyon cihazının entegrasyonu önerilebilir. Faz akımlarındaki ani değişiklikler harmonik kaynaklıysa, harmonik filtreleme yöntemleri ile enerji kalitesi artırılabilir.



Şekil 3.5. Faz Gerilimleri ve Güç kalitesi

Tarımsal sulama fideri için Şekil 3.5’de gösterilen grafikte, tarımsal sulama sistemlerindeki üç fazlı gerilim değerleri (Fider V_{ab} , Fider V_{bc} , Fider V_{ac}) ile güç faktörünü ifade eden ($\cos\phi$) zaman serisi boyunca karşılaştırılmıştır. Üç Fazlı Gerilimler (V_{ab}, V_{bc}, V_{ac}). Üç fazlı gerilimlerin (mavi, turuncu, gri çizgiler) genel olarak belirli bir referans değer etrafında stabilize olduğu görülmektedir. Bazı noktalarda özellikle bir fazda (örneğin Fider V_{bc} ’de) ciddi gerilim düşüşleri ve çıkışları mevcut. Bu, yük değişimleri veya şebekeye bağlı ani güç dalgalanmalarının bir sonucu olabilir. Dengeli bir sistemde üç fazın birbirine yakın seyretmesi beklenir, ancak bu grafikte bazı fazlar arasında gerilim farkları olduğu görülmektedir. Güç faktörü ($\cos\phi$) başlangıçta çok düzensiz bir şekilde dalgalanmalar göstermektedir. Bu, sistemde reaktif güç yönetiminin yeterince iyi yapılmadığını veya yüklerin dengesiz olduğunu gösterebilir. Güç faktöründe bazı noktalarda ani zirveler ve düşüşler gözlemleniyor. Özellikle 394. ve 1074. noktalarda büyük sıçramalar mevcut. Bu durum, sistemdeki reaktif güç talebinde ciddi dalgalanmalar olduğuna işaret eder. Gerilimlerde ve güç faktöründe görülen dalgalanmalar, sistemde kararsızlık olduğunu gösterebilir. Bu kararsızlıklar, reaktif güç dalgalanmaları veya harmonikler nedeniyle meydana gelmiş olabilir. Güç faktörünün stabilize olmaması, enerji verimliliği ve şebeke kararlılığı açısından olumsuz etkiler yaratır.

Eğer grafik D-STATCOM’un aktif olmadığı ve olduğu durumları karşılaştırıyorsa, bu dalgalanmaların büyük ölçüde D-STATCOM’un devreye girmesiyle dengeleneceği beklenir. Ancak burada D-STATCOM’un etkisi açık bir şekilde görülmemektedir. Fider fazları arasındaki dengesizliklerin düzeltilmesi için reaktif güç kompanzasyonu optimize edilmelidir.

Güç Faktörünün İyileştirilmesi yüksek dalgalanmalarını azaltmak için D-STATCOM gibi bir cihazın devreye alınması değerlendirilebilir. Gerilim ve güç faktöründeki dalgalanmalar harmonik etkilerden kaynaklanıyorsa, LC filtrelerle bu sorun giderilebilir.

3.4.1. Hat parametreleri

Hat empedansı, gerilim düşümü ve enerji kayıpları gibi elektriksel büyüklükler modele dahil edilir. 33 kV gerilim seviyesinden 400 V’a kadar indirgenen hatlar üzerindeki empedans değerleri ($R+jX$) belirlenir.

3.4.2. Yük modeli

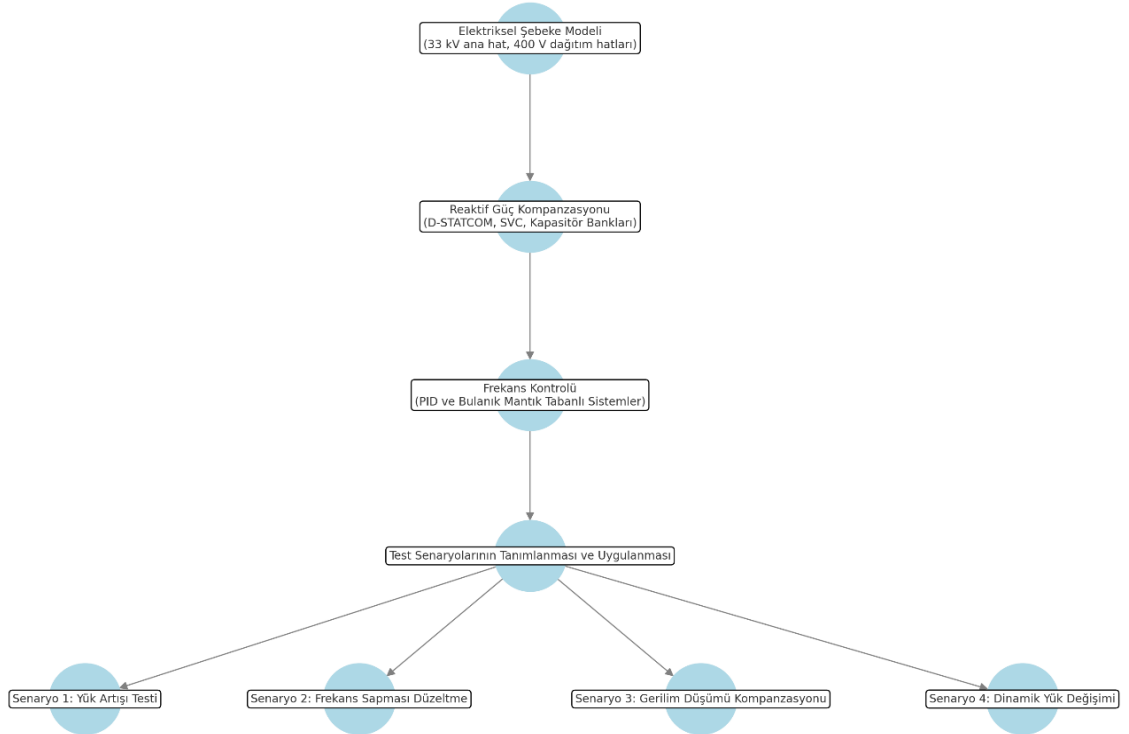
Sulama sistemlerinde yoğun olarak kullanılan motorların endüktif yük karakteristiği modellenir. Yüklerin zamanla değişen profili oluşturulur (günlük ve mevsimsel dalgalanmalar).

3.4.3. Reaktif güç talebi

Endüktif yüklerin tükettiği reaktif güç miktarı analiz edilir. Ortalama reaktif güç ihtiyacı 200 kVAR olarak belirlenir ve bu değerin kompanzasyonu için uygun cihazlar belirlenir. Gerilim düşümü, hat uzunluğu ve şebeke dinamikleri arasındaki ilişki hesaplanarak gerilim profilleri oluşturulur.

3.5. MATLAB Simulink Modeli Tasarımı

Elektriksel şebeke modeli (33 kV ana hat ve 400 V dağıtım hatları). Reaktif güç kompanzasyonu için D-STATCOM, SVC ve kapasitör bank modülleri. Frekans kontrolü için PID ve bulanık mantık tabanlı kontrol sistemleri. Test Senaryolarının Belirlenmesinde izelecek adımlar aşağıda şekil 3.6'da sıralanmaktadır.

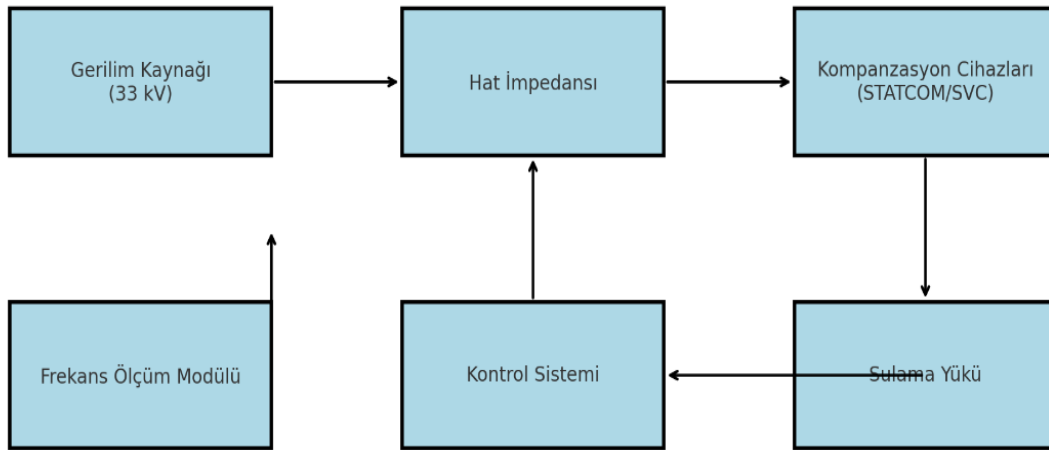


şekil 3.6. Elektriksel şebeke ve Test Senaryoları Akış Diyagramı

3.5.1. MATLAB Simulink modelinin ana bileşenleri

Gerilim Kaynağı, üç fazlı bir kaynak oluşturulacak, nominal gerilim ve frekans ayarları yapılacaktır. Hat İmpedansı, reaktif yük ve hat kayıplarını simüle etmek için hat parametreleri belirlenecek. Yük, değişken endüktif yükler (motorlar ve pompalar) eklenecek. Reaktif Güç Kompanzasyonu, D-STATCOM, SVC ve kapasitör bankları modele dahil edilecek. Kontrol Sistemi, PID kontrolör ve bulanık mantık kontrolü entegre edilecek.

Şekil 3.7’de test Senaryolarında yaşanan yük artışı, Ani bir yük artışı durumunda gerilim ve frekans tepkisi analiz edilecektir. Gerilim Düşümü ise hat kayıplarının ve kompanzasyon etkisinin incelendiği bir senaryoyu sunmaktadır.



Şekil 3.7. Sulama Fiderlerinin Elektriksel Modellemesi

3.5.2. MATLAB Simulink modelleme aşamaları

Gerilim Seviyesi: 400V veya 33kV gibi şebeke standartlarına uygun olarak belirlenir. Reaktif Güç Kapasitesi, kapasitör banklarının ve SVC/D-STATCOM cihazlarının kapasitesi, sulama sistemindeki yük profiline uygun şekilde tanımlanır. Frekans ve Zaman Aralığı ise 50 Hz nominal frekans üzerinden çalışılır ve simülasyon 24 saatlik bir sulama döngüsünü kapsamaktadır. Gerilim kaynağı, reaktif güç kompanzasyon cihazları, yükler ve kontrol algoritmaları Simulink'te bir araya getirilmektedir. Sistemin iletim hatları, gerilim düşümü ve hat kayıpları ile

modellenmektedir Böylece PID ve akıllı kontrol sistemleri, gerilim ve frekans düzenlemeleri için entegre edilmektedir.

Modelleme aşamalarında gerilim seviyesi, güç sisteminin çalıştığı voltaj aralığını ifade eder ve şebekenin standartlarına uygun olarak seçilir. Bu seviyeler:

400V: Alçak gerilim seviyesini ifade eder ve genellikle yerel dağıtım sistemlerinde kullanılır.

33kV: Orta gerilim seviyesini temsil eder ve genellikle endüstriyel tesisler veya büyük tarımsal sulama sistemlerinde tercih edilir.

Gerilim seviyesi, sistemin fiziksel altyapısı, yük tipi ve şebeke bağlantısı gibi faktörlere bağlı olarak seçilir. Uygun gerilim seviyesi, hem güvenli hem de ekonomik bir güç dağıtımı için kritiktir.

Modelleme aşamalarında Reaktif Güç Kapasitesi, sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif gücü karşılayacak şekilde tanımlanır ve genellikle şu unsurlara bağlıdır:

- Kapasitör Bankları: Reaktif gücü dengelemek için kullanılan, yükün indüktif veya kapasitif karakterine göre devreye giren cihazlardır.
- SVC/D-STATCOM Cihazları: SVC ve D-STATCOM, reaktif güç üretimi ve tüketiminde dinamik bir çözüm sunar. Bu cihazlar, sulama sistemlerinde yük profiline uygun olarak seçilir ve yükteki ani değişimlere hızlı tepki verir.

Doğru reaktif güç kapasitesi seçimi, sistemdeki gerilim kararlılığını korurken enerji kayıplarını minimize eder.

Modelleme aşamalarında frekans ve zaman Aralığında, sistemin nominal frekansı, 50 Hz olarak belirlenir. Bu, çoğu elektrik şebekesinin standart çalışma frekansıdır ve sistem kararlılığı için kritik öneme sahiptir. Zaman Aralığı ise simülasyon süresi 24 saatlik bir sulama döngüsünü kapsar. Bu süre boyunca, sulama pompalarının yük profili analiz edilir. Reaktif güç kompanzasyon cihazlarının performansı izlenir ve gerilim dalgalanmaları ve enerji kayıpları değerlendirilir.

Modelleme ve Simulink Entegrasyonu yapılırken ilk olarak simulink, güç sistemi bileşenlerinin modellenmesi ve simülasyonu için kullanılır. Burada gerilim kaynağı, Sistemin ana güç kaynağıdır ve sabit bir gerilim sağlamak üzere modellenir. Reaktif Güç Kompanzasyon Cihazları, SVC, D-STATCOM ve kapasitör banklarının performansı ve dinamik tepkisi Simulink üzerinde simüle edilir. Yükler ise sulama pompaları gibi dinamik yükler, gerçek zamanlı yük değişimlerini taklit edecek şekilde modellenir. Kontrol Algoritmalarında genelde PID (Oransal-İntegral-Türev) kontrolü ve akıllı kontrol yöntemleri, gerilim ve frekans düzenlemeleri için entegre edilir.

Tasarlanan modeldeki iletim hatları ve güç kalitesi içeriğinde bulunan iletim hatları, sistemin fiziksel özelliklerini temsil eder ve gerilim düşümü ile hat kayıpları hesaplamalarına dâhil edilir. Bu modelleme, gerilim düşümünü içerir, bu içerik iletim hatlarında meydana gelen gerilim kayıpları, sistemin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Bu kayıplar, hat uzunluğu ve yük seviyesine bağlıdır. Modelde bulunan hatların kayıpları ise iletim sırasında meydana gelen güç kayıpları, enerji verimliliği hesaplamalarına dâhil edilir.

Bu sistem tasarımı, tarımsal sulama gibi dinamik yüklerin olduğu ortamlarda gerilim kararlılığı, reaktif güç dengesi ve enerji verimliliği sağlamak için kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Simulink ortamında gerçekleştirilen modelleme, kontrol algoritmalarının performansını değerlendirmek ve sistemin genel etkinliğini artırmak için kritik bir araçtır.

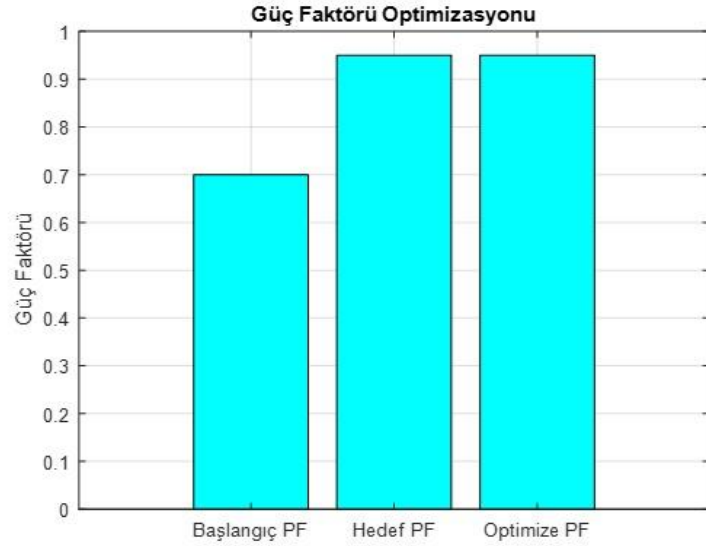
3.6. Güç Faktörü Optimizasyonu

Grafikte, başlangıç güç faktörü (PF), hedef güç faktörü ve optimize edilmiş güç faktörü gösterilmiştir.

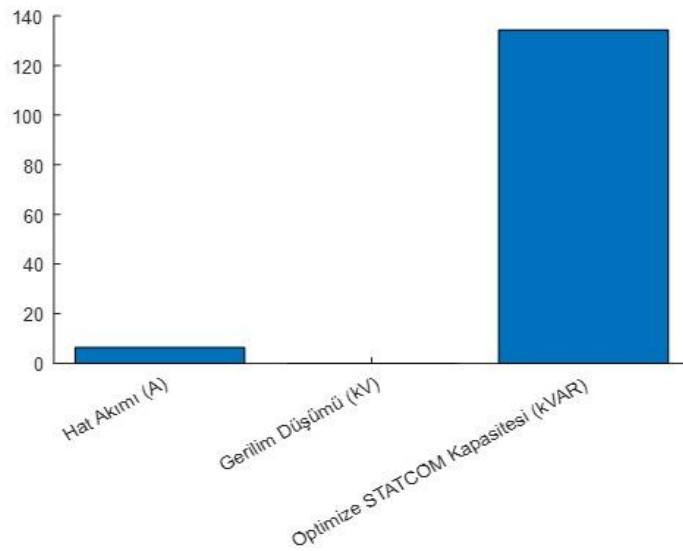
Başlangıç Güç Faktörü (0.7), sistemde başlangıçta reaktif gücün etkisi yüksektir. Bu durum, düşük güç faktörüyle sonuçlanır ve sistemin verimsiz çalışmasına neden olur. Daha fazla reaktif güç akışı, daha fazla kayıp ve daha düşük enerji verimliliği anlamına gelmektedir.

Hedef Güç Faktörü (0.95) olarak, güç faktörünün 0.95'e çıkarılması, sistem verimliliğini artırmak için bir hedef belirler. Bu seviyede, reaktif gücün etkisi minimuma indirgenir ve sistem daha ekonomik bir şekilde çalışır.

Optimize Edilmiş Güç Faktörü (0.949) ise, optimizasyon sonucunda hedefe çok yakın bir güç faktörü elde edilmiştir. Bu, kompanzasyon cihazlarının doğru kapasitede çalıştığını ve sistemi gereksiz yere zorlamadığını gösterir. Optimize edilmiş güç faktörü, başlangıca göre büyük bir iyileşme göstermiştir (Şekil 3.8). Bu, reaktif güç akışını dengelemenin sistemin performansı üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu kanıtlar (Şekil 3.9).



Şekil 3.8. Güç faktörü optimizasyon sonuçları

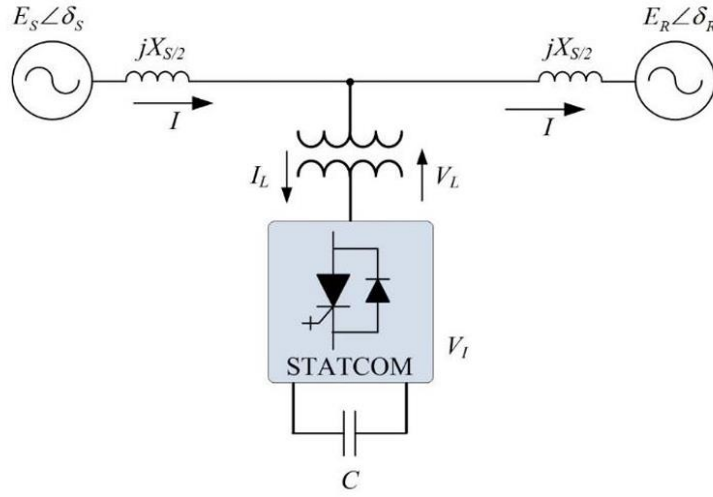


Şekil 3.9. Güç faktörü değerleri

3.6.1. Optimizasyon sonuçları

D-STATCOM sistemleri, enerji sistemlerinde voltaj düzenlemesi ve reaktif güç dengelemesi sağlamak amacıyla kullanılan gelişmiş kompanzasyon cihazlarıdır. Temel olarak, bir D-STATCOM sistemi; gerilim kaynaklı konvertör (GKK), doğru akım (DA) enerji depolama cihazı ve bağlantı transformatöründen oluşur. Şekil 3.10'de gösterilen örnek bir D-STATCOM sistemi, bu bileşenlerin entegrasyonunu sergilemektedir (Kabalci E. 2015). Bu sistemde bağlantı noktası, dağıtım hattının ortasında gösterilmiş olsa da, D-STATCOM uygulamalarında bağlantı konumu, sistemin ihtiyaçlarına göre

esnek bir şekilde belirlenebilir. Örneğin, önerilen çalışmada D-STATCOM, Şekil 3.10'te gösterildiği gibi, dağıtım barasına bağlanmıştır. Bu tür bir yerleşim, dağıtım sisteminin gerilim kararlılığını ve reaktif güç dengesini optimize etmek için stratejik bir seçenektir. Gerilim kaynaklı konvertör (GKK), sistemdeki DA gerilimini üç fazlı alternatif akım (AA) çıkış gerilimine dönüştürerek önemli bir işlev görür. Bu üç fazlı gerilimler, bağlantı transformatörünün reaktansı üzerinden AA sistemine bağlanır. D-STATCOM, çıkış gerilim fazını ayarlayarak, kendisi ile AA sistemi arasında aktif ve reaktif güç değişimlerini etkin bir şekilde kontrol eder. Bu esnek yapı, cihazın hem aktif hem de reaktif güç üretmesini veya tüketmesini mümkün kılarak enerji sistemlerinin dinamik ihtiyaçlarına cevap vermesini sağlar.



Şekil 3.10. D-STATCOM'un Şebeke Bağlantısı (Kabalıcı, E., & Taşdemir, O. 2021).

D-STATCOM, AA sisteme şönt olarak bağlanmış bir GKK'yı kullanarak çok işlevli bir topoloji sunar. Bu topoloji üç temel amaç için kullanılabilir:

- Gerilim Desteği: Sistemin gerilim seviyelerini düzenleyerek kararlılığı artırır.
- Reaktif Güç Kompanzasyonu: Yük profiline göre reaktif güç ihtiyacını dengeler.
- Güç Kalitesi İyileştirmesi: Harmonik bozulmaların azaltılması ve enerji kalitesinin artırılmasında etkin rol oynar.

Sonuç olarak, D-STATCOM'un bu yapılandırması, enerji sistemlerinin verimliliğini ve güvenilirliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Cihazın esnekliği, enerji depolama ve dönüştürme kabiliyeti, modern güç sistemlerinin dinamik ihtiyaçlarını karşılamak için ideal bir çözüm sunmaktadır.

3.6.2.Simülasyon adımları

Bu Simulink modeli, dağıtım sistemlerinde reaktif güç dengelemesi ve sistem kararlılığı için D-STATCOM kullanımını ele alan bir test sistemini temsil etmektedir. Model, bir şebeke sistemi ve yüklerle entegre edilmiş D-STATCOM cihazını içerir. Programlanabilir Gerilim Kaynağında, modelin sol tarafında bulunan bu bileşen, sistemin giriş gerilimini sağlar. Programlanabilir olduğu için farklı çalışma senaryolarında gerilim değişimlerini veya hat bozulmalarını simüle etmek mümkündür. Orta gerilim (25 kV, 100 MVA Sistem) seviyesinde bir güç kaynağıdır. Bu, dağıtım sisteminin ana şebekeden aldığı gücü temsil eder. Şebekeden gelen gücü, farklı fiderlere ve yük bölümlerine dağıtır. 21 km Fider, sistemin enerji iletim hattını temsil eder. Bu fider, enerji kaybı ve gerilim düşümünün analiz edildiği bir bölgedir. 2 km Fider ise daha kısa bir hat olup, gerilim stabilitesi için kritik bir rol oynar. 3 MW ve 0.2 MVAR yük, endüktif özelliklere sahip bir yük olarak modellenmiştir. Bu, dağıtım sistemindeki reaktif güç dengesizliğini artırabilir. 1 MW Yük ise sabit bir yük olup sistemdeki güç akışı ve kayıplar üzerinde etkili olur. Tasarlanan test modelinde birden fazla transformator bulunmaktadır. Bunlar, enerji seviyelerini 25 kV gibi orta gerilim seviyesinden 600 V düşük gerilim seviyesine indirir. Kullanılan transformatörler, enerji dağıtımında gerilim seviyesini optimize etmek ve enerji kayıplarını azaltmak için kullanılır. Sistemin sağ tarafında bulunan D-STATCOM, reaktif güç dengelemesini sağlar. ± 3 MVAR kapasiteye sahip olan bu cihaz, dinamik olarak reaktif güç ihtiyacını karşılar ve güç faktörünü iyileştirir. D-STATCOM, yüklerin dengesizliğe neden olduğu durumlarda devreye girerek gerilim profilini sabitler ve sistem kararlılığını artırır.

3.6.3. Test modeli veri blokları

Data Acquisition (Veri Toplama) ve Scope Blokları, Scope1, Scope2 ve Scope3 olarak tasarlanmıştır. Bu bloklar, sistemin gerilim, akım ve reaktif güç değerlerini gerçek zamanlı olarak izlemek için kullanılır. Veri toplama ünitesinde, sistemdeki ölçümleri toplar ve analiz için gerekli verileri sağlar.

Bu modelde, 25 kV gerilim seviyesindeki bir enerji kaynağı, birden fazla fider ve yük bölgesine enerji sağlar. Fiderler boyunca gerilim düşümü ve reaktif güç ihtiyacı ortaya çıkar. Bu yüklerin reaktif güç ihtiyacını karşılamak için D-STATCOM kullanılır. D-STATCOM, şebeke gerilim dalgalanmalarını ve reaktif güç dengesizliğini dengelemek

için dinamik bir çözüm sunar. D-STATCOM, sisteme reaktif güç sağlayarak veya çekerek gerilim seviyesini düzenler ve güç faktörünü iyileştirir. Özellikle endüktif yüklerin fazla olduğu durumlarda, D-STATCOM devreye girerek bu yüklerin neden olduğu reaktif güç ihtiyacını karşılar ve gerilim kararlılığını sağlar.

Reaktif güç yönetiminde, D-STATCOM sayesinde reaktif güç dalgalanmaları dinamik olarak dengelenir. Gerilim kararlılığı için uzun fiderler boyunca oluşan gerilim düşümleri, D-STATCOM tarafından dengelenerek şebeke kararlılığı sağlanır. Ayrıca enerji verimliliği sağlanarak güç faktörünün iyileştirilmesiyle enerji kayıpları azaltılır. Son olarak gerçek zamanlı analiz scope blokları ve veri toplama üniteleri, sistemin davranışını analiz etmek için detaylı bir gözlem sağlar.

Bu model, dağıtım sistemlerinde reaktif güç dengelemesi ve kararlılığın artırılması için D-STATCOM'un etkin bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Reaktif güç ihtiyaçlarının karşılanmasıyla, enerji verimliliği artırılır ve şebeke daha stabil bir şekilde çalışır. Model, akademik araştırmalar veya endüstriyel uygulamalar için güçlü bir altyapı sunar. Eğer bu sistem üzerinde bir optimizasyon veya simülasyon analizi yapmak isterseniz, detaylı olarak yardımcı olabilirim.

Gerilim Düşümü Hesaplaması, model, tarımsal sulama fiderlerinde enerji iletim hatlarında oluşan gerilim düşümünü hesaplar. Bu, hat akımı ve toplam empedans kullanılarak bulunur:

$$I_{hat} = \frac{S_{yük}}{V_{send}} = \frac{(200 kW + j200 kVAR)}{33 kV} \quad (3.8)$$

Başlangıçta sistemin güç faktörü 0.7 seviyesindedir ve bu durum, sistemde gereksiz reaktif güç akışına neden olmaktadır. Reaktif güç akışı, enerji iletim hatlarında ek kayıplara yol açarak sistemin genel verimliliğini düşürür. Ayrıca, bu durum gerilim stabilitesini olumsuz etkileyerek şebekenin kararlı çalışmasını engeller. Bu sorunları çözmek ve sistem performansını iyileştirmek amacıyla, D-STATCOM ve kapasitör bankı gibi kompanzasyon cihazları kullanılmaktadır. D-STATCOM'un kapasitesi 200 kVAR ve Sabit kapasitör bankının kapasitesi 50 kVAR olarak tanımlanmıştır. D-STATCOM, sisteme dinamik reaktif güç desteği sağlarken, kapasitör bankı sabit reaktif güç sağlar. Bu iki cihazın birlikte kullanımı, sistemdeki toplam reaktif güç ihtiyacını önemli ölçüde azaltır. D-STATCOM'un dinamik desteği ve kapasitör bankının sabit katkısı sayesinde, güç faktörü 0.95 seviyesine çıkarılarak sistemin enerji verimliliği artırılır.

3.6.4. Optimizasyon sonuçları

Kompanzasyon cihazlarının etkisi sonucunda optimize edilmiş güç faktörü 0.95 olur ve yeni hat akımı, reaktif gücün azalmasıyla birlikte düşer. Örneğin, kompanzasyon sonrası yeni hat akımı $I_{line,new} = 7.1A$, olarak ölçülmüştür. Enerji kayıpları, akımın karesi ile orantılı olduğundan, kayıplar I^2R formülüyle azalır. Güç faktörü iyileştirmesi kapsamında, başlangıçta 0.7 olan güç faktörü kompanzasyon ile 0.95'e yükseltilmiştir. Bu durum, sistemin daha verimli çalışmasını sağlar. Sistemin hat akımı ve gerilim düşümü, kompanzasyon sonrasında önemli ölçüde azalır. Hat akımı, 8.57Amper yerine 7.1Ampere düşer ve gerilim düşümü, 0.00479 kV yerine daha düşük bir değere iner. Sonuç olarak, bu Simulink modeli, tarımsal sulama sistemlerinde enerji kayıplarını en aza indirmek ve güç faktörünü optimize etmek için etkili bir yöntem sunmaktadır. Sayısal analizler, kompanzasyon cihazlarının reaktif güç yönetiminde önemli bir rol oynadığını ve enerji verimliliğini artırdığını göstermektedir. Böyle bir model, tarımsal sulama gibi yüksek enerji tüketimine sahip uygulamalarda sürdürülebilir enerji yönetimi için kritik öneme sahiptir. Bu Simulink modeli, tarımsal sulama fiderlerinde enerji verimliliğini artırmak ve reaktif güç dengesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Sistem, 33 kV'luk orta gerilim seviyesinden başlayarak, sulama ekipmanlarının ihtiyacı olan 400 V'luk düşük gerilim seviyesine enerjiyi iletmektedir. Modelde enerji iletim hattının uzunluğu 5 km, hattın empedansı ise $(0.1 + j0.05 \Omega/km)$ olarak belirlenmiştir. Bu değerler dikkate alınarak, toplam hat empedansı $(0.5 + j0.25 \Omega)$ olarak hesaplanmıştır. Sulama sisteminde kullanılan elektrik motorları gibi yükler, 200 kW aktif güç ve 200 kVAR reaktif güç tüketimiyle modellenmiştir. Güç faktörü başlangıçta 0.7 gibi düşük bir seviyededir, bu da reaktif güç ihtiyacının yüksek olduğunu ve enerji kayıplarının fazla olduğunu göstermektedir.

Simülasyonda, enerji iletim hattında gerilim düşümü ve alıcı uçtaki noktada gerilim analizi yapılmıştır. Aktif ve reaktif güçlerin toplamı, gönderim geriliminden akımın hesaplanmasını sağlar. Bu hesaplama göre, hat akımı 8.57 Amper olarak bulunmuş, gerilim düşümü ise 0.00479 kV olarak ölçülmüştür. Alıcı tarafındaki gerilim, 33 kV'dan bu düşüm çıkarılarak 32.9952 kV olarak belirlenmiştir. Gerilim düşümünün ihmal edilebilir derecede düşük olması, hattın elektriksel performansının yeterli olduğunu göstermektedir.

Model, reaktif güç dengesini sağlamak ve güç faktörünü iyileştirmek için D-STATCOM ve sabit kapasitör bankı gibi kompanzasyon cihazlarını içerir. D-STATCOM,

200 kVAR kapasiteyle dinamik reaktif güç desteği sağlayarak yük değişimlerine hızlı bir şekilde tepki verir. Kapasitör bankı ise 50 kVAR kapasiteyle sabit bir reaktif güç desteği sağlar. Bu cihazlar birlikte çalışarak, sistemin güç faktörünü hedeflenen 0.95 seviyesine çıkarmaktadır. Güç faktöründeki bu iyileşme, enerji kayıplarını önemli ölçüde azaltır ve sistemin verimliliğini artırmaktadır.

Kompanzasyon cihazlarının kullanımıyla birlikte, hat akımı 7.1 Amper seviyesine düşürülmüştür. Akımın kareye bağlı olarak değişimi ve enerji kayıpları üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, bu azalma enerji tasarrufu açısından kritiktir öneme sahiptir. Ayrıca, gerilim düşümünün daha da azaltıldığı ve alıcı tarafındaki gerilimin stabilize edildiği görülmüştür. Simülasyon sonuçları, başlangıç güç faktörünün 0.7'den 0.95'e çıkarılmasıyla, hem enerji iletim hattının performansının hem de sistemin genel verimliliğinin iyileştirildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu model, tarımsal sulama sistemlerinde enerji tüketimini optimize etmek ve enerji kayıplarını en aza indirmek için etkili bir çözüm sunmaktadır. Özellikle reaktif güç yönetimi ve güç faktörü iyileştirmesi, enerji maliyetlerini düşürmek ve şebeke kararlılığını sağlamak için önemlidir. Bu tür bir yaklaşım, sulama sistemlerinde sürdürülebilir enerji yönetimi için kritik bir rol oynar ve aynı zamanda çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunur.

Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM), güç akışını kontrol etmek ve güç şebekelerindeki geçici kararlılığı iyileştirmek için güç elektroniği kullanan Esnek AC İletim Sistemleri (FACTS) ailesinin bir şönt cihazıdır [1]. D-STATCOM, güç sistemine enjekte edilen veya güç sisteminden emilen reaktif güç miktarını kontrol ederek terminalindeki voltajı düzenler. Sistem voltajı düşük olduğunda, D-STATCOM reaktif güç üretir (STATCOM kapasitif). Sistem voltajı yüksek olduğunda, reaktif güç emer (STATCOM endüktif).

Reaktif gücün değişimi, bir kuplaj transformatörünün sekonder tarafına bağlanan bir VSC (Voltage Source Converter) vasıtasıyla gerçekleştirilir. VSC, bir DC voltaj kaynağından bir voltaj (V_2) sentezlemek için zorlamalı komütasyonlu güç elektroniği cihazları (GTO'lar, IGBT'ler veya IGCT'ler) kullanmaktadır. D-STATCOM'un çalışma prensibi, Şekil 4.1' de gösterildiği gibi, bir kaynak (V_1) ile diğer bir kaynak (V_2) arasındaki aktif ve reaktif güç transferi ile göstermektedir. Bu şekilde, V_1 kontrol edilecek sistem voltajını, V_2 ise VSC tarafından üretilen voltajı temsil etmektedir.

4. TEST MODELİ UYGULAMASI

D-STATCOM, şebekedeki reaktif güç dengesini sağlamak ve gerilim kararlılığını artırmak için kullanılan bir cihazdır. Bu modelde, D-STATCOM'un çalışma prensibi ve şebekeye sağladığı katkılar detaylı olarak incelenmiştir. D-STATCOM, enerji sisteminde meydana gelen reaktif güç dalgalanmalarını dengelemek için tasarlanmıştır ve hem reaktif güç sağlayabilir hem de çekebilir. Endüktif yüklerin neden olduğu gerilim düşüşlerini telafi etmek için reaktif güç sağlayan D-STATCOM, kapasitif yüklerin neden olduğu gerilim yükselmelerini kontrol etmek için reaktif güç çeker. Bu süreç, D-STATCOM'un kontrolöründe hesaplanan referans akım (I_{qref}) ve gerilim (V_{ref}) değerlerine dayanır.

4.1. Reaktif Güç Dengesinin Performansı

Reaktif güç, enerji sistemlerinde aktif gücün iletilmesi ve sistem kararlılığının sağlanması için kritik bir unsurdur. D-STATCOM'un reaktif güç dengeleme performansı, şebeke kararlılığı, güç faktörü düzeltilmesi ve gerilim düzenleme üzerindeki etkileriyle ölçülür. D-STATCOM, şebekedeki reaktif güç akışını aktif bir şekilde izler ve yönetir. Modelde görüldüğü üzere, yük değişimlerine bağlı olarak reaktif güç dalgalanmaları meydana geldiğinde D-STATCOM devreye girerek ya reaktif güç sağlar ya da çeker. Bu, sistemin reaktif güç ihtiyaçlarına hızlı bir şekilde yanıt vermesini ve güç faktörünün iyileştirilmesini sağlar. Özellikle, endüktif yüklerin neden olduğu reaktif güç talebi arttığında D-STATCOM, faz açısını düzenleyerek şebekeye gerekli reaktif gücü sağlar. Aynı şekilde, kapasitif yüklerin neden olduğu gerilim yükselmelerinde D-STATCOM reaktif güç çekerek sistem kararlılığını korur.

Reaktif güç performansı, sistemdeki gerilim profillerinin kararlılığı ve yük değişimlerine verilen tepki süreleri gibi kritik parametreler üzerinden değerlendirilir. Yapılan analizler ve grafiklerden elde edilen bulgular, D-STATCOM'un reaktif güç dalgalanmalarını başarılı bir şekilde minimize ettiğini ve sistemin reaktif güç ihtiyaçlarını hızlı ve etkili bir şekilde karşıladığını açıkça göstermektedir. Bu durum, D-STATCOM'un reaktif güç yönetimi konusundaki üstün performansını kanıtlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde, D-STATCOM modern güç sistemlerinde vazgeçilmez bir cihaz haline gelmiştir.

4.1.1. Frekans kontrolünde elde edilen sonuçlar

Frekans kontrolü, bir enerji sisteminin güvenilirliği ve kararlılığı açısından hayati öneme sahiptir. Şebekede güç dengesizliği oluştuğunda frekans dalgalanmaları meydana gelir. D-STATCOM, yük değişikliklerine bağlı frekans dalgalanmalarını sınırlamak için şebekeye reaktif güç sağlayarak veya çekerek dolaylı bir şekilde frekans stabilitesini etkiler. Modelde tasarlanan D-STATCOM'un hızlı tepki mekanizması sayesinde frekans dalgalanmalarının minimum seviyeye indirildiği gözlemlenmiştir. Özellikle yük değişikliklerinin meydana geldiği anlarda, D-STATCOM'un reaktif gücü düzenlemesi sayesinde aktif güç akışı dengelenmiş ve frekans saptmaları kontrol altına alınmıştır. D-STATCOM, referans sinyalleriyle şebeke frekansını sürekli izleyerek gerilim ve akım genliklerini ayarlamış, böylece sistemin stabil çalışmasını sağlamıştır.

Grafiklerden elde edilen verilere göre, D-STATCOM'un devreye girdiği 0.05 saniye sonrasında şebeke frekansı ve gerilimde önemli bir kararlılık sağlanmıştır. Yük değişiklikleri sırasında frekans saptmaları kısa süre içinde düzeltilmiş, bu da D-STATCOM'un frekans kontrolünde ne kadar etkili olduğunu göstermiştir.

4.1.2. D-STATCOM'un çalışma prensibi

Sistem, temel enerjisini DC bağlantısından sağlar. DC bağlantısı üzerindeki kapasitörler, D-STATCOM'un çalışması için gereken enerjiyi depolar ve inverterler aracılığıyla bu enerjiyi AC gerilime dönüştürerek şebekeye iletir. Modelde yer alan iki inverter (Bridge1 ve Bridge2), DC gerilimden üretilen AC çıkışın faz dengesi, genliği ve harmonik içeriğini kontrol eder. LC filtreler, inverterden çıkan AC sinyallerdeki harmonikleri temizler ve şebekeye daha temiz bir enerji sağlar. Bu sayede enerji kalitesi artırılır ve sistem kararlılığı sağlanır. Inverterlerin çıkışı, şebekeyle uyumlu hale getirilerek transformatörler aracılığıyla şebekeye entegre edilir. Transformatörler, D-STATCOM'un ürettiği gerilimi şebekenin ihtiyaçlarına uygun seviyeye dönüştürerek üç fazlı sistemde reaktif güç dengesini sağlar. D-STATCOM'un kontrolörü, şebekedeki gerilim ve akımı sürekli olarak izler. Gerilim veya akımda bir sapma tespit edildiğinde, kontrolör referans sinyaline göre inverter çıkışını ayarlayarak reaktif güç akışını düzenler. Kontrolör, D-STATCOM'un reaktif gücü artırmasını veya azaltmasını sağlayarak şebekedeki dalgalanmaları minimize eder. Bu modelde, D-STATCOM'un yük

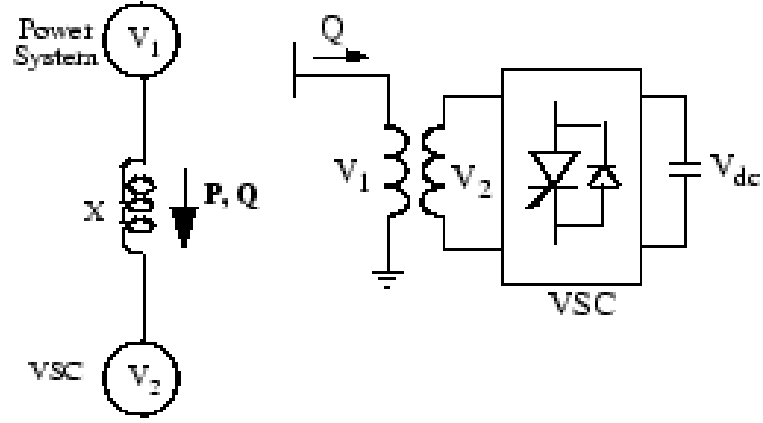
değişimlerine hızlı bir şekilde tepki verdiği ve şebekenin ihtiyaçlarını başarıyla karşıladığı gözlemlenmiştir.

Grafiklerde görüldüğü üzere, D-STATCOM başlangıçta reaktif güç dalgalanmalarını ve gerilim düzensizliklerini kontrol altına alır. Şebekede yaşanan ani yük değişiklikleri sırasında reaktif güç akışı (Q) ve gerilim profilleri (V_{B1}) ve (V_{B3}) D-STATCOM tarafından stabilize edilir. DC bağlantı geriliminin (V_{dc}) sabit tutulması, D-STATCOM'un inverter bileşenlerinin doğru çalıştığını ve şebekeye kararlı bir enerji sağladığını doğrulamaktadır. Ayrıca, D-STATCOM'un modülasyon indeksi, yük değişikliklerine uygun bir şekilde hızlıca ayarlanarak enerji sisteminin dinamik ihtiyaçlarına uyum sağlar.

Sonuç olarak, D-STATCOM bu modelde şebeke kararlılığını artırmada, enerji kalitesini iyileştirmede ve reaktif güç yönetiminde kritik bir rol oynamaktadır. Reaktif güç dalgalanmalarının kontrol edilmesi ve yük değişimlerine hızlı tepki verilmesi, D-STATCOM'un enerji kayıplarını azaltarak verimliliği artırdığını ve şebekeyi daha güvenilir hale getirdiğini göstermektedir. Bu sistem, özellikle endüktif yüklerin yoğun olduğu dağıtım şebekelerinde etkin bir çözüm sunmaktadır ve enerji yönetimi alanında önemli bir teknolojik yenilik olarak öne çıkmaktadır.

Şekil 4.1'de bir Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü (Voltage Source Converter - VSC) tabanlı sistemin güç akışı ve devresini göstermektedir. Devrede Güç Sistemi (Power System) şebekeye bağlı bir güç kaynağı (V_1) ile temsil edilmiştir. Güç sistemi ve VSC arasında X ile gösterilen bir empedans bulunur. Gerçek (aktif) güç, şebekeden yük ya da dönüştürücüye aktarılan enerji miktarını temsil eder. Reaktif güç ise şebeke gerilim seviyesini düzenlemek için kullanılan güçtür. VSC, V_2 ile temsil edilen bir VSC, iki seviyeli bir topolojiyi içerir. VSC, DC ve AC arasında dönüştürme yapar ve genellikle rüzgâr türbinleri, güneş panelleri veya enerji depolama sistemlerinde kullanılır. Reaktör (L), VSC ve şebeke arasına bağlanan bir indüktör, reaktör olarak görev yapar. Bu, gerilim ve akım arasındaki geçişi yumuşatır ve VSC'nin akımını kontrol eder. DC Tarafı (V_{dc}), VSC'nin DC bağlantı noktası, bir DC gerilim kaynağı (V_{dc}) ile gösterilmiştir. Bu, enerji depolama veya diğer enerji kaynaklarından güç alabilir.

VSC, şebekeye P ve Q güç sağlayabilir veya şebekeden güç çekebilir. Şebeke frekansı ve gerilimi V_1 ile temsil edilirken, VSC'nin AC tarafındaki gerilim V_2 ile kontrol edilir. İndüktör (L), güç akışını düzenlemek ve VSC'nin çıkışını filtrelemek için kullanılır. DC bağlantısı, VSC'nin AC ve DC arasında enerji dönüştürmesini sağlar.



Şekil 4.1. Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü tabanlı sistem

$$P = (V_1 V_2) \sin \delta / X, Q = V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta) / X \quad (4.1)$$

Çizelge 3.1. Modelde kullanılan değerler

İndis	Tanım
V_1	Kaynak 1'in hat-hat gerilimi
V_2	Kaynak 2'nin hat-hat gerilimi
X	Bağlantı trafosu ve filtrelerin reaktansı
δ	V_1 'in V_2 'ye göre faz açısı

Sabit durum çalışmasında, VSC tarafından üretilen V_2 voltajı V_1 voltajı ile aynı fazdadır ($\delta=0$), böylece yalnızca reaktif güç akar ($P=0$). V_2 , V_1 'den düşükse, Q V_1 'den V_2 'ye akar (STATCOM reaktif güç emer). Tersine, V_2 , V_1 'den yüksekse, Q V_2 'den V_1 'e akar (STATCOM reaktif güç üretir). Reaktif güç miktarı şu şekilde verilir.

$$Q = (V_1 (V_1 - V_2)) / X \quad (4.2)$$

VSC'nin DC tarafına bağlı bir kondansatör, bir DC voltaj kaynağı görevi görür. Sabit durumda, transformatör ve VSC kayıplarını telafi etmek ve kondansatörü şarjlı tutmak için V_2 voltajının V_1 voltajın biraz gerisine faz kaydırılması gerekir. VSC için iki ana teknoloji kullanılabilir. Bunlar;

GTO tabanlı kare dalga invertörleri ve özel ara bağlantı transformatörleri kullanan VSC; Tipik olarak, 48 adımlı bir voltaj dalga formu oluşturmak için dört üç seviyeli invertör kullanılır. Bireysel invertörler tarafından üretilen kare dalgalarda bulunan harmonikleri nötürleştirmek için özel bağlantı transformatörleri kullanılır. Bu tip VSC'de, V_2 voltajının temel bileşeni V_{dc} voltajıyla orantılıdır. Bu nedenle, reaktif gücü kontrol etmek için V_{dc} 'nin değiştirilmesi gerekir.

IGBT tabanlı PWM invertörleri kullanan VSC; Bu tip invertör, birkaç kilohertzlik tipik bir kesme frekansına sahip bir DC voltaj kaynağından sinüzoidal bir dalga formu sentezlemek için Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM) tekniğini kullanır. Harmonik voltajlar, VSC'nin AC tarafına filtreler bağlanarak iptal edilir. Bu tip VSC, sabit bir DC voltajı (V_{dc}) kullanır. Voltaj (V_2), PWM modülatörünün modülasyon indeksi değiştirilerek düzeltilir.

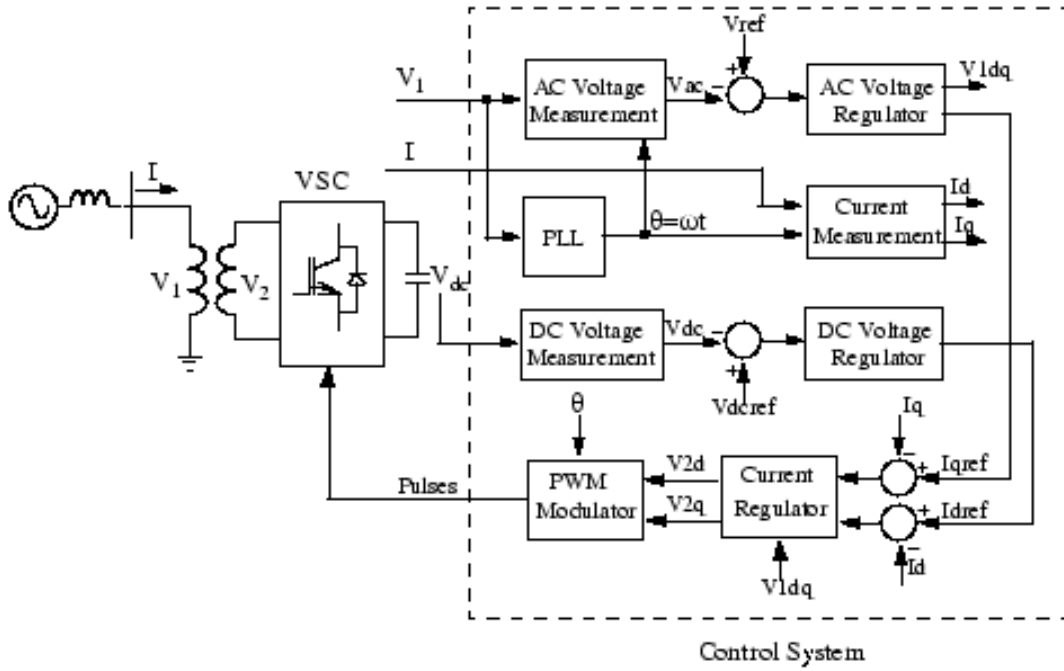
D-STATCOM (Phasor Type) bloğu, IGBT tabanlı bir D-STATCOM'u (sabit DC voltajı) modeller. Ancak, invertörün ve harmoniklerin ayrıntıları gösterilmediğinden, geçici kararlılık çalışmalarında GTO tabanlı bir D-STATCOM'u modellemek için de kullanılabilir. GTO tabanlı bir D-STATCOM'un ayrıntılı bir modeli FACTS örnek kütüphanesinde (power_statcom_gto48p örneği) sağlanmıştır.

Aşağıdaki Şekil 4.2. D-STATCOM'un tek satırlık bir diyagramını ve kontrol sisteminin basitleştirilmiş bir blok diyagramını göstermektedir. Bu şema, bir VSC sisteminin kontrol yapısını ve çalışma prensibini detaylandırmaktadır. Şema, VSC'nin hem donanımsal hem de kontrol sistemlerini göstermektedir. PWM ile kontrol edilen anahtarlar (IGBT veya MOSFET) kullanılır.

Çizelge 3.2. D-STATCOM'un tek satırlık bir diyagram değerleri

İndis	Tanım
V_1	Şebeke tarafındaki gerilim.
V_2	Dönüştürücünün çıkış gerilimi.
L	Filtreleme ve güç akışını düzenlemek için kullanılan indüktör.
V_{dc}	DC tarafındaki gerilim.
I	Şebekeden çekilen veya şebekeye aktarılan akımı

Kontrol sistemi, VSC'yi hem gerilim hem de akım açısından kontrol etmek için geliştirilmiştir. Şebeke gerilimi (V_1) ölçülür ve PLL (Phase-Locked Loop) ile faz açısı (δ) hesaplanır. Faz açısı, sistemin senkronizasyonunu sağlamak için kullanılır. Bu şema, modern enerji sistemlerindeki kontrol mekanizmalarını detaylı bir şekilde açıklamaktadır. VSC'nin senkronizasyon, güç kontrolü ve kararlılık yönetimindeki önemini göstermektedir.



Şekil 4.2. D-STATCOM'un tek satırlık bir diyagramını

4.2. Kontrol Sistemi Bileşenleri

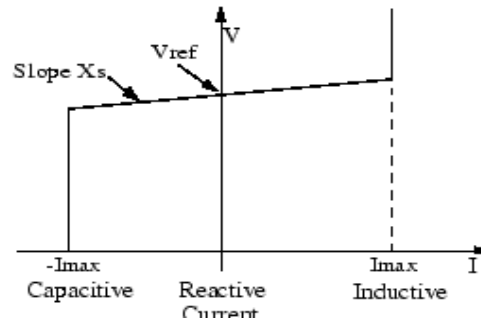
Üç fazlı birincil voltaj V_1 'in pozitif dizi bileşeninde senkronize olan bir PLL. PLL'nin çıkışı ($\theta = \omega t$ açısı), AC üç fazlı voltaj ve akımların (diyagramda V_d , V_q veya I_d , I_q olarak etiketlenen) doğrudan eksen ve kare eksen bileşenlerini hesaplamak için kullanılır. Kontrol edilecek AC pozitif dizi voltajının ve akımlarının d ve q bileşenlerini ve DC voltajı V_{dc} 'yi ölçen ölçüm sistemlerini tanımlamaktadır.

Bir AC voltaj regülatörü ve bir DC voltaj regülatöründen oluşan bir dış düzenleme döngüsüdür. AC voltaj regülatörünün çıkışı, akım regülatörü için referans akımı I_{qref} 'tir (I_q = reaktif güç akışını kontrol eden voltajla kare akım). DC voltaj regülatörünün çıkışı, akım regülatörü için referans akımı I_{dref} 'tir (I_d = aktif güç akışını kontrol eden voltajla fazda akım). Akım regülatöründen oluşan bir iç akım düzenleme döngüsü, DC voltaj regülatörü ve AC voltaj regülatörü (voltaj kontrol modunda) tarafından sırasıyla üretilen

I_{dref} ve I_{qref} referans akımlarından PWM dönüştürücüsü (V_{2d} , V_{2q}) tarafından üretilen voltajın büyüklüğünü ve fazını kontrol eder. Akım regülatörü, V_1 ölçümünden (V_{1d} , V_{1q}) V_2 voltaj çıkışını (V_{2d} , V_{2q}) ve trafo kaçak reaktansını tahmin eden ileri beslemeli bir regülatör tarafından desteklenir.

STATCOM bloğu, güç elektroniğinin ayrıntılı gösterimlerini içermeyen bir fazör modelidir. Powergui bloğu ile etkinleştirilen fazör simülasyon yöntemi ile kullanılmalıdır. Bu model, üç fazlı güç sistemlerinde senkron jeneratörler, motorlar, dinamik yükler ve diğer FACTS ve yenilenebilir enerji sistemleri ile birlikte, geçici kararlılık çalışmaları yapmak ve D-STATCOM'un elektromekanik salınımlar ve temel frekansta iletim kapasitesi üzerindeki etkisini gözlemlemek için kullanılabilir.

VAR kontrol modunda (D-STATCOM reaktif güç çıkışı sabit tutulur) ve D-STATCOM gerilim düzenleme modunda çalıştırıldığında, aşağıdaki V-I karakteristiğini uygular (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. D-STATCOM'un karakteristiği

STATCOM, iki farklı modda çalıştırılabilir: STATCOM V-I karakteristiği ve D-STATCOM V-I karakteristiği. Reaktif akım, dönüştürücü derecesi tarafından empoze edilen minimum ve maksimum akım değerleri ($-I_{max}$, I_{max}) arasında kaldığı sürece, voltaj referans voltajı V_{ref} 'de düzenlenir. Ancak, genellikle maksimum reaktif güç çıkışında %1 ile %4 arasında bir voltaj düşüşü kullanılır ve V-I karakteristiği bu şekilde gösterilen eğime sahiptir. Voltaj düzenleme modunda, V-I karakteristiği aşağıdaki denklemle tanımlanır:

$$V = V_{ref} + X_s \cdot I \quad (4.3)$$

Burada;

V Pozitif dizi gerilimi (pu)

I Reaktif akım (pu/Pnom) ($I > 0$ endüktif akımı gösterir)

X_s Eğim veya düşüş reaktansı (pu/Pnom)

P_{nom} Blok iletim kutusunda belirtilen dönüştürücünün üç fazlı nominal gücü

4.2.1. D-STATCOM ve SVC sistem işleyişi

D-STATCOM, SVC ile aynı işlevi görür. Ancak normal voltaj düzenleme aralığından daha düşük voltajlarda, D-STATCOM SVC'den daha fazla reaktif güç üretebilir. Bunun nedeni, bir SVC tarafından üretilen maksimum kapasitif gücün sistem voltajının karesine orantılı olması (sabit suseptans) iken, bir D-STATCOM tarafından üretilen maksimum kapasitif gücün voltajla (sabit akım) doğrusal olarak azalmasıdır. Bir arıza sırasında daha fazla kapasitif reaktif güç sağlama yeteneği, D-STATCOM'un SVC'ye göre önemli bir avantajıdır. Ek olarak, D-STATCOM normalde SVC'den daha hızlı bir tepki sergiler çünkü VSC ile D-STATCOM'un tristör ateşlemesiyle ilişkili bir gecikmesi yoktur (SVC için 4 ms mertebesinde).

4.3. Ayrıntılı ve Ortalama Model

Özel Güç Sistemlerinde VSC tabanlı enerji dönüşüm sistemlerini modellerken, temsil edilecek frekans aralığına bağlı olarak iki tür model kullanabilir. Örneklerin FACTS kütüphanesindeki `power_dstatcom_pwm` modelinde sunulan ayrıntılı modeldir. Ayrıntılı model, güç elektroniği IGBT dönüştürücülerinin ayrıntılı temsilini içermektedir. Bu örnekte kullanılan 1680 Hz anahtarlama frekansı ile kabul edilebilir bir doğruluk elde etmek için, model nispeten küçük bir zaman adımında (5 mikrosaniye) ayrıştırılmalıdır. Bu model, harmonikleri ve kontrol sistemi dinamik performansını nispeten kısa süreler boyunca (genellikle yüzlerce milisaniyeden bir saniyeye) gözlemlemek için oldukça uygundur. Bu örnekte sunulan ortalama modeldir. Bu tür modelde, IGBT VSC, anahtarlama frekansının bir döngüsü boyunca ortalama AC gerilimi üreten eşdeğer gerilim kaynakları tarafından temsil edilir. Bu model harmonikleri temsil etmez, ancak kontrol sistemi ve güç sistemi etkileşiminden kaynaklanan dinamikler korunur. Bu model, genellikle 40-50 mikrosaniye gibi daha büyük zaman adımlarının kullanılmasına izin verir ve böylece birkaç saniyelik simülasyonlar gerçekleştirilmesini sağlar.

Alternatif olarak, daha büyük zaman dilimlerinde simülasyon yapmak için fazör modeli adlı üçüncü bir model türü kullanılabilir. Bu model türü, D-STATCOM için mevcut değildir; ancak, `power_statcom` modelinde benzer bir cihaz olan D-STATCOM için kullanılabilir.

4.3.1. D-STATCOM devresinin açıklaması

25 kV dağıtım şebekesindeki voltajı düzenlemek için bir D-STATCOM kullanılır. İki besleyici (21 km ve 2 km), B₂ ve B₃ baralarına bağlı yüklere güç iletir. B₂ barasında güç faktörü düzeltilmesi için bir şönt kapasitör kullanılır. 25 kV/600 V trafo aracılığıyla B₃ barasına bağlanan 600 V yük, ark ocağına benzer şekilde sürekli değişen akımları emen ve böylece voltaj titreşimi üreten bir tesisi temsil eder. Değişken yük akımı büyüklüğü, 0,9 gecikmeli güç faktörünü korurken görünür gücünün yaklaşık olarak 1 MVA ile 5,2 MVA arasında değişmesi için 5 Hz frekansında modüle edilir. Bu yük değişimi, D-STATCOM'un voltaj titreşimini azaltma yeteneğini gözlemlememizi sağlayacaktır.

D-STATCOM, reaktif güç emerek veya üreterek B₃ barasındaki voltajı düzenler. Bu reaktif güç transferi, birincil voltajla aynı fazda ikincil bir voltaj üreterek (şebeke tarafı) kuplaj transformatörünün kaçak reaktansı aracılığıyla yapılır. Bu voltaj, voltaj kaynaklı bir PWM invertörü tarafından sağlanır. İkincil voltaj, bara voltajından düşük olduğunda, D-STATCOM reaktif güç emen bir endüktans gibi davranır. İkincil voltaj, bara voltajından yüksek olduğunda, D-STATCOM reaktif güç üreten bir kapasitör gibi davranır.

D-STATCOM aşağıdaki bileşenlerden oluşur, PWM invertörü ile şebeke arasında kuplajı sağlayan 25kV/1.25kV kuplaj transformatörü ve voltaj kaynaklı bir PWM invertörü. Bu örnekte, PWM invertörü AC tarafında, anahtarlama frekansının (1,68 kHz) bir döngüsü boyunca ortalaması alınan üç eşdeğer voltaj kaynağıyla değiştirilir. Bu nedenle, invertör tarafından üretilen harmonikler bu ortalama modelle görünmez. DC tarafında, invertör DC kapasitörünü şarj eden bir akım kaynağı tarafından modellenir. DC akımı I_{dc} , invertörün AC girişlerindeki anlık gücün DC çıkışındaki anlık güce eşit kalması için hesaplanır ($V_a \cdot I_a + V_b \cdot I_b + V_c \cdot I_c = V_{dc} \cdot I_{dc}$).

İnverter çıkışına bağlanan LC sönümlü filtreler. Kapasitörlerle seri bağlanan dirençler 60 Hz'de 40 kalite faktörü sağlar. İnvertör için DC voltaj kaynağı görevi gören 10000 mikrofardlık bir kapasitör olan B₃ veri yolundaki voltajı kontrol eden bir voltaj regülatörü ile voltaj ve akım edinimi için kullanılan anti-aliasing filtreleri kullanılır.

PLL, transformatör birincil voltajlarının temeline senkronize edilir. Modelde iki ölçüm sistemi bulunmaktadır, bunlar V_{meas} ve I_{meas} blokları, PLL tarafından sağlanan $\sin(\omega t)$ ve $\cos(\omega t)$ tarafından belirlenen senkron referansta bir abc-dq dönüşümü gerçekleştirerek voltajların ve akımların d ekseni ve q ekseni bileşenlerini hesaplar.

Modeldeki iç akım düzenleme döngüsü, d eksen ve q eksen akımlarını kontrol eden iki orantılı-integral (PI) denetleyiciden oluşur. Denetleyici çıkışları, PWM invertörünün üretmesi gereken V_d ve V_q voltajlarıdır. V_d ve V_q voltajları, PWM voltajlarını sentezlemek için kullanılan faz voltajları V_a , V_b , V_c 'ye dönüştürülür. I_q referansı, dış voltaj düzenleme döngüsünden (otomatik modda) veya Q_{ref} tarafından uygulanan bir referanstan (manuel modda) gelir. I_d referansı, DC-link voltaj regülatöründen gelir. Ayrıca bir dış voltaj düzenleme döngüsü çalışmaktadır, bu döngü otomatik modda (düzenlenmiş voltaj), bir PI denetleyicisi birincil voltajı, kontrol sistemi iletişim kutusunda tanımlanan referans değerine eşit tutar. DC bağlantı voltajını nominal değerine ($V_{dc}=2,4$ kV) sabit tutan bir DC voltaj kontrolörü tasarlanmıştır. Elektrik devresi, $T_s=40$ mikrosaniyelik bir örnekleme süresi kullanılarak ayrıklaştırılır. Kontrolör daha büyük bir örnekleme süresi kullanır ($4 \cdot T_s=160$ mikrosaniye).

4.3.2. D-STATCOM simülasyon ve dinamik tepkisi

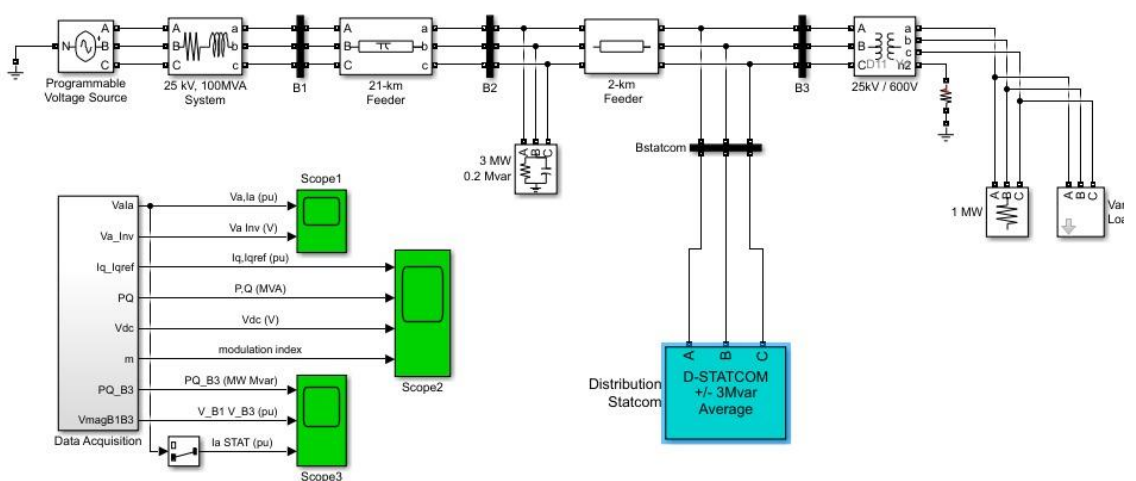
Bu test sırasında, değişken yük sabit tutulacak ve kaynak voltajındaki adım değişikliklerine bir D-STATCOM'un dinamik tepkisini gözlemleyeceğiz. Değişken Yük modülasyonunun hizmette olmadığı kontrol edilmelidir (Modülasyon Zamanlaması [T_{on} T_{off}]= $[0,15 \ 1] \cdot 100 > \text{Simülasyon Durma süresi}$). Programlanabilir Voltaj Kaynağı bloğu, 25-kV eşdeğerinin dahili voltajını modüle etmek için kullanılır. Voltaj, D-STATCOM'u başlangıçta yüzer tutmak için önce 1,077 pu olarak programlanır ($B3$ voltajı=1 pu ve referans voltajı $V_{ref}=1$ pu). Kaynak voltajını sırasıyla %6 artırmak, %6 azaltmak ve başlangıç değerine (1,077 pu) geri getirmek için 0,2 sn, 0,3 sn ve 0,4 sn'de üç adım programlanır.

Simülasyonu başlatırız, Scope1'de D-STATCOM'un faz A voltajını ve akım dalga formlarını ve Scope2'deki kontrolör sinyallerini gözlemliyoruz. Yaklaşık 0,15 sn süren bir geçişten sonra, sabit duruma ulaşılır. Başlangıçta, kaynak voltajı D-STATCOM'un inaktif olduğu şekildedir. Şebekeye reaktif güç emmez veya sağlamaz. $t = 0,2$ sn'de, kaynak voltajı %6 artar. D-STATCOM, bu voltaj artışını, şebekeden reaktif güç emerek telafi etmektedir (Şekil 4.4).

Grafikte hat akımı, gerilim düşümü ve optimize edilen D-STATCOM kapasitesi gösterilmiştir.

- Hat Akımı (8.57 A): Optimizasyon sonrası hat akımı oldukça düşüktür. Düşük hat akımı, enerji kayıplarının ve hat üzerindeki ısınmanın azalmasını sağlar. Bu, sistemin güvenli ve verimli çalışmasını destekler.
- Gerilim Düşümü (0.00479 kV): 33 kV'luk bir hat için gerilim düşümü ihmal edilebilecek kadar küçüktür (%0.015). Bu, iletim hattının empedansının düşük olduğunu ve enerji iletiminde kayıpların minimum düzeyde olduğunu gösterir.
- D-STATCOM Kapasitesi (200 kVAR): Optimizasyon sırasında D-STATCOM cihazı, 200 kVAR'lık kapasitesi ile reaktif gücü dengelemiş ve güç faktörünü iyileştirmiştir. D-STATCOM, dinamik yük değişimlerinde reaktif güç desteği sağlayarak sistemi dengelemiştir.

Gerilim düşümü ve hat akımı gibi parametrelerin düşük seviyelerde olması, sistemin optimize edilmiş bir şekilde çalıştığını ve enerji verimliliğinin artırıldığını gösterir. Enerji Verimliliği açısından, optimizasyon, sistemde enerji kayıplarını en aza indirmiştir. Güç faktöründeki iyileşme, yüklerin verimli çalışmasını sağlamıştır. Sistem Güvenliği, hat akımı ve gerilim düşümünün düşük olması, sistem bileşenlerinin aşırı yüklenmesini engellemiş ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamıştır. Kompanzasyonun başarısında D-STATCOM ve kapasitör bankı gibi kompanzasyon cihazları, sistemin dinamik reaktif güç ihtiyacını etkili bir şekilde karşılamıştır. Elde edilen sonuçlar, doğru kompanzasyon cihazı seçimi ve optimizasyon teknikleri ile güç sisteminin performansının önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Tasarlanan Matlab Simulink test modeli

Bu Simulink modeli, tarımsal sulama sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak ve reaktif güç dengesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Sistem, 33 kV orta gerilim seviyesinden başlayarak, tarımsal ekipmanlar için gerekli olan 400 V düşük gerilim seviyesine enerji sağlar. Aşağıda, modelin detayları ve sayısal verilerle birlikte açıklaması verilmiştir.

Modelin Başlangıç Parametreleri:

- Şebeke Gerilimi: 33 kV (orta gerilim) ve 400 V (düşük gerilim).
- Hat Uzunluğu: 5 km.
- Hat Empedansı: $Z = 0.1 + j0.05/km$ toplamda $Z_{toplam} = 0.5 + j0.25\Omega$
- Yük: 200 kW aktif güç ve 200 kVAR reaktif güç.
- Başlangıç Güç Faktörü: 0.7 (yüksek reaktif güç ihtiyacı nedeniyle düşük)

4.3.3. D-STATCOM modelin ana bileşenleri ve işlevleri

Programlanabilir Gerilim Kaynağı (Programmable Voltage Source): Modelin sol tarafında bulunan bu bileşen, sistemin giriş gerilimini sağlar. Programlanabilir olduğu için farklı çalışma senaryolarında gerilim değişimlerini veya hat bozulmalarını simüle etmek mümkündür.

25 kV, 100 MVA Sistem: Orta gerilim seviyesinde bir güç kaynağıdır. Bu, dağıtım sisteminin ana şebekeden aldığı gücü temsil eder. Şebekeden gelen gücü, farklı fiderlere ve yük bölümlerine dağıtır.

Fiderler ve Yükler: 21 km Fider, Sistemin enerji iletim hattını temsil eder. Bu fider, enerji kaybı ve gerilim düşümünün analiz edildiği bir bölgedir. 2 km Fider, daha kısa bir hat olup, gerilim stabilitesi için kritik bir rol oynar.

3 MW ve 0.2 MVAR Yük: Bu yük, endüktif özelliklere sahip bir yük olarak modellenmiştir. Bu, dağıtım sistemindeki reaktif güç dengesizliğini artırabilir.

1 MW Yük: Sabit bir yük olup sistemdeki güç akışı ve kayıplar üzerinde etkili olur.

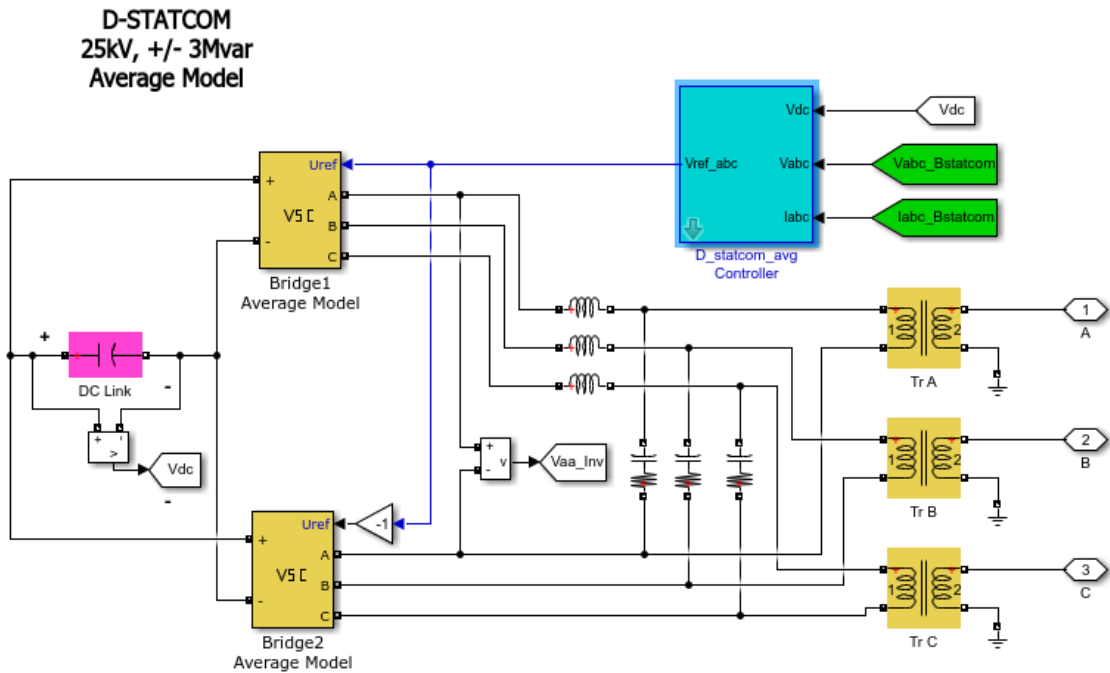
Transformatörler: Modelde birden fazla transformatör bulunmaktadır. Bunlar, enerji seviyelerini 25 kV gibi orta gerilim seviyesinden 600 V düşük gerilim seviyesine indirir. Transformatörler, enerji dağıtımında gerilim seviyesini optimize etmek ve enerji kayıplarını azaltmak için kullanılır.

D-STATCOM: Sistemin sağı tarafında bulunan Distribution Static Synchronous Compensator, reaktif güç dengelemesini sağlar. ± 3 MVAR kapasiteye sahip bu cihaz, dinamik olarak reaktif güç ihtiyacını karşılar ve güç faktörünü iyileştirir. D-STATCOM, yüklerin dengesizliğe neden olduğu durumlarda devreye girerek gerilim profilini sabitler ve sistem kararlılığını artırır.

Data Acquisition (Veri Toplama) ve Scope Blokları: Scope1, Scope2 ve Scope3: Bu bloklar, sistemin gerilim, akım ve reaktif güç değerlerini gerçek zamanlı olarak izlemek için kullanılır.

Veri Toplama Ünitesi: Sistemdeki ölçümleri toplar ve analiz için gerekli verileri sağlar.

Bu modelde, 25 kV gerilim seviyesindeki bir enerji kaynağı, birden fazla fider ve yük bölgesine enerji sağlar. Fiderler boyunca gerilim düşümü ve reaktif güç ihtiyacı ortaya çıkar. Bu yüklerin reaktif güç ihtiyacını karşılamak için D-STATCOM kullanılır. D-STATCOM, şebeke gerilim dalgalanmalarını ve reaktif güç dengesizliğini dengelemek için dinamik bir çözüm sunar. D-STATCOM, sisteme reaktif güç sağlayarak veya çekerek gerilim seviyesini düzenler ve güç faktörünü iyileştirir. Özellikle endüktif yüklerin fazla olduğu durumlarda, D-STATCOM devreye girerek bu yüklerin neden olduğu reaktif güç ihtiyacını karşılar ve gerilim kararlılığını sağlamaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. D-Statcom kontrol bloğu

Modelin Ana Bileşenlerinde DC Link (DC Bağlantısı): Modelin sol tarafında yer alır ve enerji depolama işlevi görür.

DC Kapasitör: Enerjiyi sabit bir DC gerilimde depolar ve AC/DC dönüşüm sürecinde gerekli enerjiyi sağlar.

V_{dc} : DC bağlantısının gerilimi. Bu gerilim, sistemdeki reaktif güç üretimini ve tüketimini doğrudan etkiler.

Çift Köprü (Bridge1 ve Bridge2): Bu köprüler, inverter işlevi görerek DC gerilimi AC gerilime dönüştürür.

Ortalama Modeller: Sistemin gerçek zamanlı simülasyonunu basitleştirmek için kullanılan "average model" yapılarıdır. Her iki köprü, farklı fazlar için reaktif güç üretiminde görev alır.

LC Filtreleri: DC'den AC'ye dönüşüm sırasında oluşan harmonikleri filtreler ve sistemi daha kararlı hale getirir. Dirençler ve kapasitörler, gerilim dalgalanmalarını azaltmak için kullanılır.

D-STATCOM Controller (Kontrolör): Bu kontrolör, sistemin referans gerilimi ($V_{ref,abc}$) ve şebekeden ölçülen gerilim değerlerini (V_{abc}) karşılaştırarak gerekli reaktif güç miktarını hesaplar. Ayrıca, DC bağlantı gerilimini (V_{DC}) düzenleyerek sistemin doğru çalışmasını sağlar. Çıkışları ise köprülerin akım referans değerlerini ($I_{abc, Bstatcom}$) ve gerilim değerlerini düzenler.

Transformatörler (Tr A, Tr B, Tr C): Üç fazlı sistemin her bir fazı için ayrı transformatör kullanılmıştır. Transformatörler, D-STATCOM'un ürettiği reaktif gücü şebekeye entegre eder ve gerilim seviyelerini düzenler.

DC Gerilim ve AC Dönüşümü: D-STATCOM, DC bağlantısında depolanan enerjiyi kullanarak köprüler aracılığıyla reaktif gücü üretir veya tüketir.

Bu süreçte, kontrolör referans sinyalini ($V_{ref,abc}$) kullanarak DC gerilimi AC gerilime dönüştürür ve şebekeyi uygun fazlarda besler.

Reaktif Güç Yönetimi: Şebekede gerilim düşümü veya faz kayması olduğunda, D-STATCOM devreye girerek reaktif güç sağlar veya emer. Örneğin, sistemdeki endüktif yükler reaktif gücü artırdığında, D-STATCOM reaktif güç üreterek bu durumu dengeler.

Harmonik Azaltma: Köprülerden çıkan AC sinyallerdeki harmonikler, LC filtreleri tarafından azaltılır. Böylece şebekeye daha temiz bir enerji beslemesi sağlanır.

Gerilim ve Akım Kontrolü: D-STATCOM, gerilim ve akımı sürekli izler. Şebekede belirlenen referans değerlerinden bir sapma olduğunda, sistem dinamik olarak reaktif güç seviyelerini ayarlar.

Modelin avantajları incelendiğinde, Reaktif Güç Kompanzasyonu açısından, D-STATCOM, sistemdeki reaktif güç dalgalanmalarını etkili bir şekilde dengeler ve güç faktörünü iyileştirir. Gerilim kararlılığı açısından da özellikle gerilim düşümünün yaşandığı durumlarda, D-STATCOM hızlı tepki vererek şebeke kararlılığını artırır. Hızlı Dinamik Tepki sayesinde ortalama modellerin kullanılması, D-STATCOM'un şebeke dinamiklerine hızlı bir şekilde uyum sağlamasını mümkün kılar. Enerji kalitesi ile harmonik azaltma ve gerilim düzenlemesi sayesinde şebeke enerji kalitesini artırır.

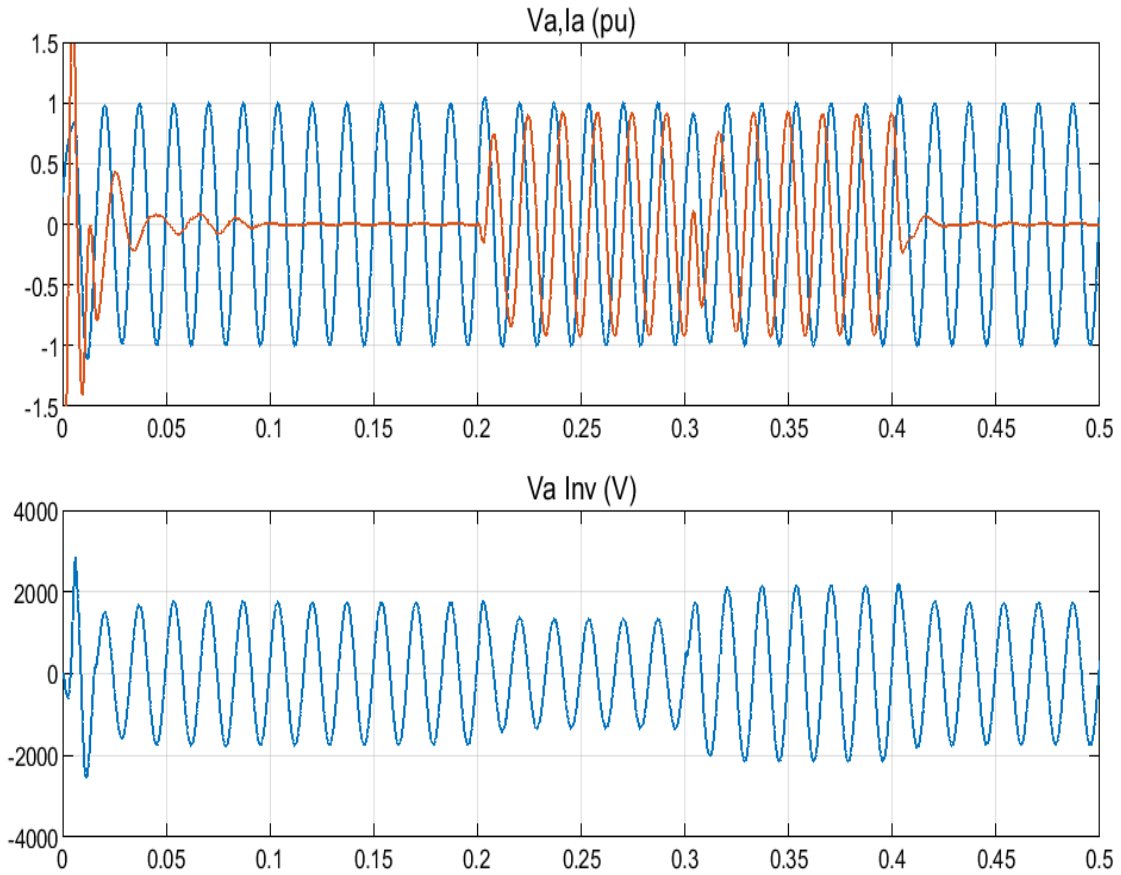
Bu model, D-STATCOM'un dağıtım sistemlerinde reaktif güç yönetimindeki etkinliğini gösteren bir örnektir. D-STATCOM, hızlı dinamik tepki kabiliyeti ve yüksek reaktif güç kapasitesiyle şebeke gerilimlerini stabilize eder ve enerji kalitesini artırır. Özellikle endüktif yüklerin yoğun olduğu sistemlerde, bu modelin kullanımı enerji verimliliği ve kararlılığı artırmada kritik bir rol oynar.

4.4. Gözlemler ve Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde, D-STATCOM'un model üzerindeki etkileri genel gözlemler ve performans ölçütleri üzerinden değerlendirilmektedir. Hızlı tepki süresi D-STATCOM için yük değişikliklerinin yaşandığı anlarda reaktif güç yönetimi ve gerilim düzenlemesi için hızlı bir şekilde devreye girmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere, dalgalanmalar 0.05 ile 0.1 saniye arasında stabilize edilmiştir. Kararlı gerilim seviyeleri açısından, şebekedeki gerilim seviyelerinde başlangıçta gözlemlenen geçici durumlar kısa sürede D-STATCOM'un müdahalesiyle düzeltilmiştir. Yük değişikliklerine rağmen gerilim profilleri stabilize edilmiştir. Reaktif güç, hem endüktif hem de kapasitif yüklerin taleplerine uygun olarak düzenlenmiştir. D-STATCOM'un reaktif güç sağlamadaki esnekliği ve etkinliği açıkça görülmüştür. D-STATCOM, modeldeki reaktif güç dalgalanmalarını başarılı bir şekilde dengelemiş ve güç faktörünü hedef değerlere yaklaştırmıştır. Bu, enerji kayıplarını azaltmış ve şebeke verimliliğini artırmıştır. Inverter çıkışındaki harmoniklerin LC filtreleri ile temizlenmesi ve gerilim seviyelerinin stabilize edilmesi, enerji kalitesinin iyileştiğini göstermektedir. Yük değişiklikleri sırasında D-STATCOM'un hızlı tepki vererek şebekeyi kararlı tutması, sistemin güvenilirliğini ve esnekliğini artırmıştır. D-STATCOM'un reaktif güç dengelemesi, frekans kontrolü ve gerilim düzenlemesi birlikte değerlendirildiğinde, modelin genel kararlılığı ve performansı önemli ölçüde artırılmıştır. D-STATCOM, bu modelde enerji sisteminin reaktif güç yönetimi, gerilim düzenlemesi ve frekans kontrolünde etkin bir şekilde

çalışmıştır. Sistem, yük değişikliklerine rağmen kararlı bir şekilde çalışmaya devam etmiş, enerji kalitesi iyileştirilmiş ve güç faktörü hedef değerlere ulaşmıştır.

D-STATCOM'un hızlı tepki mekanizması ve esnek reaktif güç yönetimi, enerji kayıplarını azaltarak şebeke güvenilirliğini artırmıştır. Bu gözlemler, D-STATCOM'un dağıtım sistemlerinde kritik bir rol oynadığını ve enerji verimliliğini artırmada etkili bir araç olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 4.6. D-STATCOM'un şebekedeki gerilim ve akım davranışları

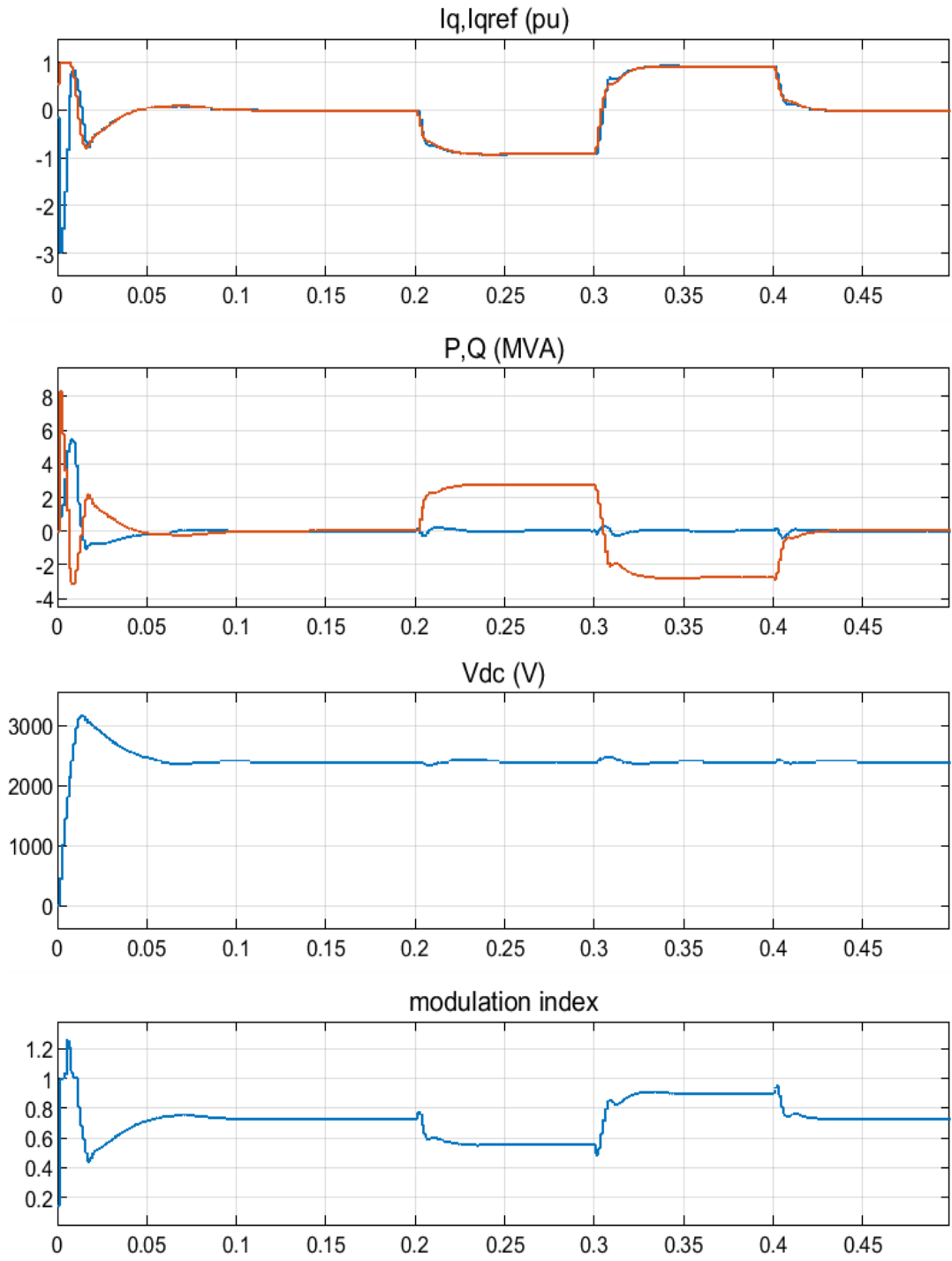
Test modeli sonucunda elde edilen grafikler, D-STATCOM' un şebekedeki gerilim ve akım davranışlarını nasıl düzenlediğini gösteren iki farklı ölçümü temsil etmektedir (Şekil 4.6). Bu grafik, per-unit (pu) biriminde faz gerilimi V_a ve faz akımı I_a değerlerini göstermektedir. Başlangıçtaki dalgalanma (0-0.05 sn), sistemin şebeke gerilimi ve akımı ilk anda dengesizdir. Bu, sistemin reaktif güç ihtiyacını karşılamak için D-STATCOM'un devreye girmeden önceki durumunu temsil eder. Dalgalanmalar, şebekedeki yük değişimleri veya sistemin başlangıç koşullarındaki kararsızlıktan kaynaklanabilir. Kararlılık dönemi (0.1-0.5 sn) D-STATCOM, reaktif güç desteği sağlayarak gerilim ve akımı düzenler. Görüldüğü gibi, yaklaşık 0.1 saniye sonra gerilim

(V_a) ve akım (I_a) dalga şekilleri kararlı bir sinüzoidal forma ulaşmıştır. Akım ve gerilim dalgalarının faz farkı, sistemdeki reaktif güç akışını temsil eder. Faz farkının azaltılması, güç faktörünün iyileştiğini gösterir. Bu grafik, D-STATCOM'un şebeke gerilim ve akımını kararlı bir şekilde düzenleyebildiğini ve sistemdeki reaktif güç dengesini sağladığını göstermektedir.

Alt Grafik: (V_{alnv}) (Inverter Çıkış Gerilimi) bu grafik, inverterin ürettiği faz gerilim (V_{alnv}) değerlerini volt cinsinden göstermektedir. Başlangıçtaki Geçici Durum (0-0.05 sn), başlangıçta inverter çıkış gerilimi dengesizdir. Bu durum, inverterin DC bağlantısındaki enerjiyle AC gerilimi üretmeye başladığı anı temsil eder. Kararlılık Dönemi (0.1-0.5 sn) yaklaşık 0.1 saniye sonra inverterin çıkış gerilimi kararlı bir sinüzoidal forma ulaşır. Bu durum, inverterin D-STATCOM kontrolöründen aldığı referans sinyale uyum sağladığını ve şebekeye uygun bir gerilim ürettiğini gösterir. Bu grafik, D-STATCOM'un inverter bileşeninin kararlı ve şebekeye uyumlu bir AC gerilim ürettiğini doğrulamaktadır.

Sistem Performansı açısından elde edilen Grafikler, D-STATCOM'un şebeke kararlılığına olan etkisini açıkça göstermektedir. Sistem başlangıçta dengesizken, D-STATCOM devreye girerek yaklaşık 0.1 saniye içinde gerilim ve akımı düzenlemiştir. Reaktif Güç Yönetimi açısından akım ve gerilim arasındaki faz farkının azalması, sistemdeki reaktif güç akışının başarıyla yönetildiğini gösterir. Enerji Kalitesi konusunda Inverter çıkış geriliminin kararlı bir sinüzoidal forma ulaşması, D-STATCOM'un enerji kalitesini artırma kapasitesini doğrular. Bu grafikler, D-STATCOM'un şebeke dinamiklerine hızlı ve etkili bir şekilde uyum sağladığını ve sistem kararlılığına önemli bir katkı sağladığını göstermektedir.

1. Grafik: (I_{qIq} , Reaktif Akım- I_{qref} , Referans Akım) I_{qIq} , Sistemin mevcut reaktif akımını temsil ederken I_{qref} , D-STATCOM'un kontrolöründen gelen referans reaktif akımı temsil eder (Şekil 4.7). Başlangıç Dönemi (0 - 0.1 sn): Sistem reaktif akım dalgalanmaları yaşıyor ve I_{qIq} ile I_{qref} arasında belirgin bir fark vardır. Bu, D-STATCOM'un başlangıçta reaktif güç ihtiyacına uyum sağlamak için çalıştığını gösterir. Kararlılık Dönemi (0.15 - 0.3 sn): I_{qref} 'e uyum sağlar ve sistemdeki reaktif güç dalgalanmaları azalır. Bu, kontrolörün başarılı bir şekilde reaktif güç yönetimini gerçekleştirdiğini gösterir. Yük Değişiklikleri (0.3 - 0.4 sn): Reaktif akımda ani değişimler gözlemlenir. Bu değişimler, yük profillerindeki ani artış veya azalmayı yansıtır. D-STATCOM, I_{qref} 'e uyum sağlayarak bu değişikliklere hızlı bir şekilde tepki verir.



Şekil 4.7. Reaktif Akım, Referans Akımı ve Reaktif değerler

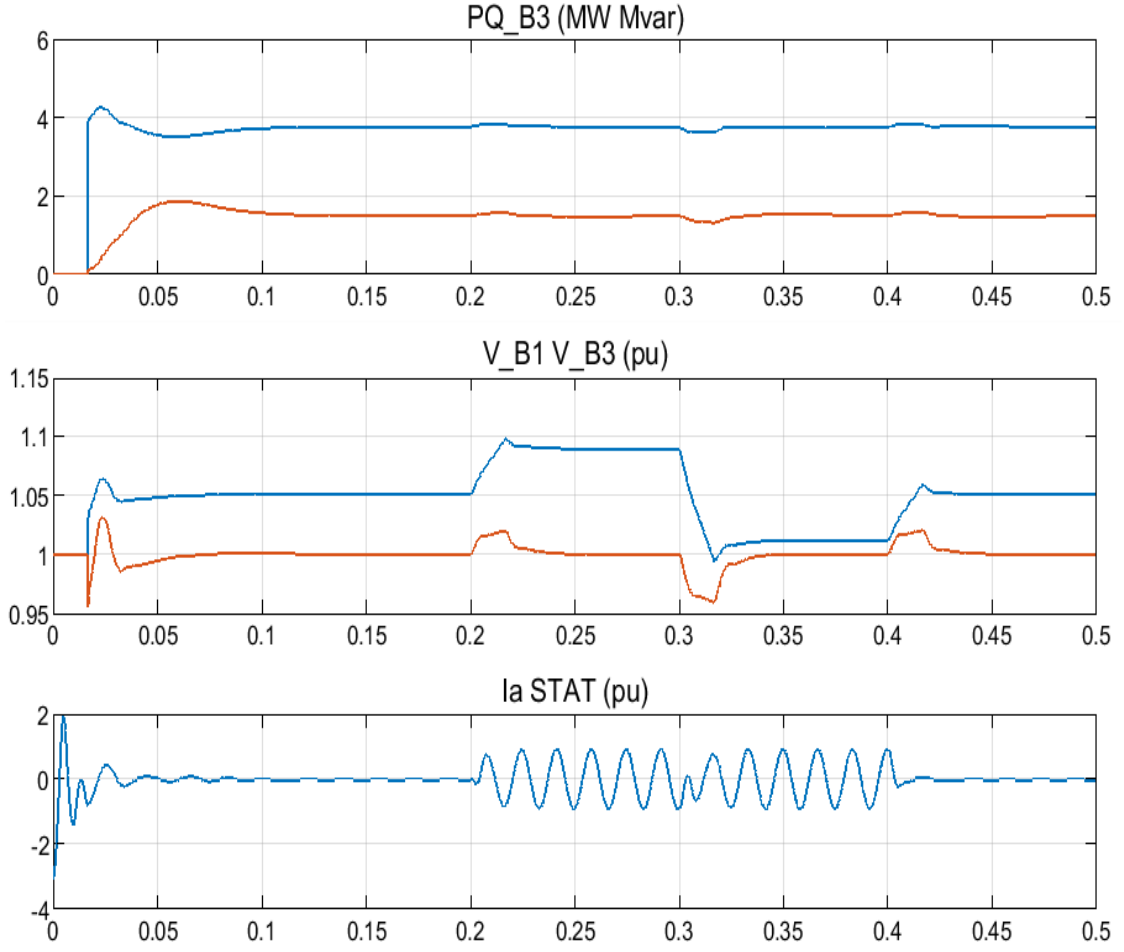
2. Grafik: (P, Aktif Güç-Q, Reaktif Güç) P, Sistemdeki aktif güç akışını (MW), Q ise reaktif güç akışını (MVAR) gösterir. Başlangıç Dönemi (0 - 0.1 sn): Reaktif güç (Q), sistemin kararsız başlangıç koşullarını yansıtarak dalgalanır. Aktif güç (P), daha kararlıdır

ancak hafif bir geçici durum yaşanır. Yük Dengesi (0.15 - 0.3 sn): Reaktif güç(Q), yükün ihtiyaçlarına uygun şekilde stabilize edilir. D-STATCOM, bu dönemde reaktif gücü dengeleyerek sistemin kararlı hale gelmesine yardımcı olur. Yük Değişiklikleri (0.3 - 0.4 sn): Aktif ve reaktif güçte belirgin dalgalanmalar meydana getirir. Bu, sisteme ani yük değişimlerinin yansımaları gösterir. D-STATCOM, reaktif gücü dengelemek için hızlı bir şekilde çalışır ve dalgalanmaları azaltır (Şekil 4.7).

3. Grafik: V_{dc} (DC Bağlantı Gerilimi), D-STATCOM'un DC bağlantı gerilimini (V) gösterir. DC gerilimi, reaktif güç üretiminde kritik bir parametredir. Başlangıç Dönemi (0 - 0.1 sn): DC gerilimde hızlı bir artış görülür. Bu, sistemin başlatılması sırasında D-STATCOM'un enerji depolamasını yansıtır. Kararlılık Dönemi (0.15 - 0.3 sn): DC bağlantı gerilimi kararlı bir değere ulaşır (~3000 V). Bu, D-STATCOM'un doğru şekilde çalıştığını ve şebekeye kararlı reaktif güç sağladığını gösterir. Yük Değişiklikleri (0.3 - 0.4 sn): DC gerilimde küçük dalgalanmalar meydana gelir. Bu dalgalanmalar, yük değişikliklerine bağlı olarak D-STATCOM'un ani tepkilerini temsil eder (Şekil 4.7).

4. Grafik: Modülasyon İndeksi (Modulation Index), İnverterin çıkış sinyalinin genliğini ve faz açısını kontrol etmek için kullanılan bir parametredir. Başlangıç Dönemi (0 - 0.1 sn): Modülasyon indeksi hızla artar ve daha sonra sabitlenir. Bu, inverterin DC bağlantı gerilimini kullanarak AC çıkışını oluşturmasını temsil eder. Kararlılık Dönemi (0.15 - 0.3 sn): Modülasyon indeksi sabit bir değere (~0.8) oturur. Bu, inverterin kararlı bir şekilde çalıştığını ve şebekeye uygun bir sinyal ürettiğini gösterir. Yük Değişiklikleri (0.3 - 0.4 sn): Modülasyon indeksinde ani değişiklikler gözlemlenir. Bu, D-STATCOM'un şebekedeki yük değişimlerine uyum sağladığını ve sistem kararlılığını koruduğunu gösterir (Şekil 4.7).

Genel Değerlendirmede, Reaktif Güç Yönetimi: I_{qIq} ve I_{qref} grafiklerinde görüldüğü üzere, D-STATCOM reaktif güç ihtiyacını başarıyla karşılamakta ve yük değişikliklerine hızlı yanıt verebilmektedir. Sistem kararlılığında, DC bağlantı geriliminin (~3000 V) sabit kalması ve modülasyon indeksinin kararlı bir seviyeye ulaşması, D-STATCOM'un güvenilir bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Enerji kalitesi açısından, aktif ve reaktif güçteki dalgalanmalar D-STATCOM tarafından hızlıca dengelenmiştir, bu da şebekede enerji kalitesinin artırıldığını gösterir. Bu grafikler, D-STATCOM'un reaktif güç yönetimi, gerilim kararlılığı ve enerji kalitesini artırma kapasitesini açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Sisteminin enerji akışı ve kararlılık değerleri

Sistem Performansı açısından elde edilen grafikler, bir D-STATCOM sisteminin enerji akışı ve kararlılık üzerindeki etkisini üç farklı ölçümle temsil eder. Her bir grafik sistemin reaktif güç, gerilim profili ve D-STATCOM akım davranışlarını detaylı bir şekilde ele alır.

1. Grafik: P_{QB3} (MW ve MVAR cinsinden Güç Akışı), Bu grafik, B3 barasında aktif ve reaktif güç akışını gösterir. Başlangıç Dönemi (0-0.05sn): Başlangıçta aktif ve reaktif güç akışı dalgalanmalar yaşamaktadır. Bu, şebekenin ilk çalışma durumundan kaynaklanır. Reaktif güç' teki dalgalanmalar daha belirgindir. Çünkü reaktif güç yönetimi genellikle daha hassastır. Kararlılık Dönemi (0.05-0.3sn): D-STATCOM, reaktif güç dalgalanmalarını azaltarak Q'yu sabit bir seviyeye oturtur. Aktif güç, sabit yük koşullarında daha kararlı bir şekilde stabilize olmaktadır. Yük Değişiklikleri (0.3- 0.4sn): Bu dönemde, yük değişimlerine bağlı olarak Q ve P'de ani artış ve azalmalar gözlemlenir. D-STATCOM bu değişimlere hızlı bir şekilde tepki vererek Q'yu yeniden dengeye getirir.

Bu grafik, D-STATCOM'un reaktif güç akışını yönetmede ve yük değişikliklerine uyum sağlamada başarılı olduğunu göstermektedir.

2. Grafik: V_{B1} ve V_{B3} (Baralar Arası Gerilim, per-unit cinsinden), Bu grafik, B1 ve B3 baralarındaki gerilim seviyelerini per-unit (pu) cinsinden karşılaştırır. Başlangıç Dönemi (0-0.05sn): Her iki bara arasında gerilim seviyelerinde küçük dalgalanmalar görülür. Bu, şebeke başlangıç koşullarından kaynaklanır. Kararlılık Dönemi (0.05-0.3sn): V_{B1} ve V_{B3} gerilim seviyeleri stabilize edilir. Bu, D-STATCOM'un şebekeye gerilim desteği sağladığını ve kararlılığı artırdığını gösterir. Yük Değişiklikleri (0.3-0.4sn): Gerilim seviyelerinde yük değişimlerinden kaynaklanan geçici bir düşüş ve yükseliş gözlemlenir. D-STATCOM, bu değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt vererek gerilim seviyelerini yeniden stabilize eder. Bu grafik, D-STATCOM'un yük değişiklikleri sırasında gerilim seviyelerini sabit tutmada etkin bir şekilde çalıştığını doğrulamaktadır.

3. Grafik: I_{aSTAT} (STATCOM Faz Akımı), Bu grafik, D-STATCOM'un şebekeye sağladığı faz akımını gösterir. Başlangıç Dönemi (0-0.05sn): D-STATCOM akımında (I_a) dalgalanmalar görülür. Bu, sistemin ilk çalışma anındaki geçici koşullarından kaynaklanır. Kararlılık Dönemi (0.05-0.3sn): Faz akımı kararlı bir sinüzoidal forma ulaşır. Bu, D-STATCOM'un sabit bir şekilde reaktif güç desteği sağladığını gösterir. Yük Değişiklikleri (0.3- 0.4sn): Faz akımında ani değişimler görülür. Bu, yük değişikliklerine bağlı olarak D-STATCOM'un sağladığı reaktif güç miktarını artırması veya azaltması gerektiğini gösterir. Bu dönemin sonunda akım tekrar stabilize olur. Bu grafik, D-STATCOM'un şebekeye reaktif güç sağlamadaki etkinliğini ve yük değişimlerine hızlı yanıt verebilme yeteneğini doğrulamaktadır.

Reaktif Güç Yönetimi (PQB3) Grafiği, D-STATCOM'un şebekedeki reaktif güç dalgalanmalarını başarılı bir şekilde yönettiğini açıkça göstermektedir. Grafik, yük değişiklikleri sırasında bile reaktif gücün dengelendiğini ve sistemdeki reaktif güç akışının optimize edildiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, D-STATCOM'un dinamik reaktif güç kompanzasyonu sağlama yeteneğinin bir kanıtıdır. Yüklerdeki ani değişimlere rağmen, D-STATCOM reaktif güç dengesini koruyarak enerji kayıplarını minimize etmekte ve sistem verimliliğini artırmaktadır. V_{B1} ve V_{B3} (Gerilim kararlılığı) Grafiği, D-STATCOM'un şebeke gerilim seviyelerini stabilize etmekte etkin olduğunu kanıtlamaktadır. I_{aSTAT} (Enerji kalitesi) Grafiği, D-STATCOM'un sağladığı akımın kararlı ve şebeke ihtiyaçlarına uygun olduğunu göstermektedir. Bu grafikler, D-STATCOM'un yük değişimlerine hızlı bir şekilde tepki verebildiğini ve sistem kararlılığını etkili bir şekilde artırabildiğini açıkça ortaya koymaktadır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu grafikler, bir D-STATCOM'un şebeke kararlılığı ve reaktif güç yönetimindeki etkinliğini kapsamlı bir şekilde analiz etmektedir. Grafikler, aktif ve reaktif güç akışından gerilim seviyelerine ve D-STATCOM'un akım davranışına kadar çeşitli parametreleri inceleyerek D-STATCOM'un enerji sistemine olan katkısını net bir şekilde ortaya koyar.

5.1. D-STATCOM'un Reaktif Güç Yönetimi

Sistemdeki reaktif akım (I_q) ve kontrolör tarafından belirlenen referans reaktif akım (I_{qref}) karşılaştırılmaktadır. Başlangıçta sistemde dengesizlikler görülse de D-STATCOM hızlı bir şekilde bu dengesizlikleri gidererek referans reaktif akıma uyum sağlar. Bu, şebekede reaktif güç dalgalanmalarının başarıyla dengelendiğini ve yük değişikliklerine etkin bir şekilde yanıt verildiğini göstermektedir. Özellikle yük değişimleri sırasında D-STATCOM'un tepki süresi oldukça kısadır ve sistem kararlılığı hızla yeniden sağlanır.

Aktif ve reaktif güç akışı, D-STATCOM'un yük değişimlerine dinamik tepkisini detaylı bir şekilde açıklar. Başlangıçta gözlemlenen dalgalanmalar, sistemin başlangıç koşullarından kaynaklanır. Ancak 0.1 saniye sonra, hem aktif hem de reaktif güç kararlı bir duruma ulaşır. Yük profillerindeki ani değişimlere rağmen, D-STATCOM şebekenin ihtiyaçlarını hızlı bir şekilde karşılayarak reaktif gücü dengelemektedir.

5.2. Gerilim Kararlılığı

Gerilim seviyelerini gösteren V_{B1} ve V_{B3} grafiklerinde, başlangıçta meydana gelen geçici dalgalanmaların kısa sürede stabilize olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, D-STATCOM'un şebekeye dinamik gerilim desteği sağlayarak gerilim profillerini etkili bir şekilde düzenlediğini açıkça göstermektedir. D-STATCOM, yük değişikliklerine rağmen gerilim seviyelerini referans değerlerine yakın tutarak şebekenin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Özellikle yük değişikliklerinin yaşandığı 0.3 ile 0.4 saniyeler arasında, gerilim seviyelerinde ani düşüşler ve yükselmeler gözlemlenmiş, ancak bu durum D-STATCOM tarafından hızlıca kontrol altına alınmıştır. Bu, D-STATCOM'un gerilim düzenleme kapasitesinin yüksek olduğunu doğrular.

5.3. D-STATCOM Akım Davranışı

D-STATCOM'un şebekeye sağladığı akım analiz edildiğinde, başlangıçta sistemin geçici durumlarından kaynaklanan dalgalanmalar görülür. Ancak, 0.1 saniyeden itibaren D-STATCOM akımı kararlı bir sinüzoidal forma ulaşır ve şebekenin reaktif güç ihtiyacını karşılamaya başlar. Yük değişimlerinin yaşandığı anlarda D-STATCOM akımında ani değişimler gözlemlenir, bu da D-STATCOM'un şebekeye sağladığı reaktif gücü artırma veya azaltma kapasitesinin bir göstergesidir. Dalgalanmalara hızlı ve doğru tepki verilmesi, D-STATCOM'un sistemin dinamiklerini etkin bir şekilde dengelediğini göstermektedir.

5.3.1. DC gerilim ve modülasyon indeksi

DC bağlantı gerilimi ve modülasyon indeksi, D-STATCOM'un kararlı çalışmasını destekleyen önemli parametrelerdir. Başlangıçta DC gerilimde ve modülasyon indeksinde geçici bir artış yaşanırken, bu parametreler kısa sürede sabit bir değere oturur. Bu, D-STATCOM'un inverterinin doğru çalıştığını ve kararlı bir AC gerilim sağladığını doğrular. Modülasyon indeksi, yük değişiklikleri sırasında anlık değişiklikler gösterse de, bu durum D-STATCOM'un dinamik yük ihtiyaçlarına uyum sağladığını yansıtmaktadır.

5.4.Genel Değerlendirme

Grafikler, D-STATCOM'un şebeke kararlılığını artırmada, enerji kalitesini iyileştirmede ve reaktif güç yönetimini sağlamada ne kadar etkili olduğunu açıkça göstermektedir. Sistem, başlangıçta yaşanan geçici dalgalanmalar ve yük değişimlerine rağmen, kısa sürede kararlı bir çalışma durumuna ulaşmıştır. Özellikle gerilim düzenleme, reaktif güç dengeleme ve enerji kalitesini artırma konusunda D-STATCOM kritik bir rol oynamaktadır. Yük değişimlerine olan hızlı tepkisi, şebekenin güvenilirliğini artırırken enerji kayıplarını da minimize etmektedir.

Bu analiz, D-STATCOM'un özellikle endüktif yüklerin yoğun olduğu şebekelerde veya yük değişikliklerinin sık yaşandığı sistemlerde ne kadar etkili bir çözüm sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Enerji verimliliği ve kararlılık arayan sistemler için D-STATCOM, önemli bir teknolojik çözüm sunmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, D-STATCOM'un sulama sistemlerindeki reaktif güç yönetimi, gerilim kararlılığı ve frekans kontrolü üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar ve saha gözlemleri, D-STATCOM'un bu sistemlerdeki performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, D-STATCOM'un reaktif güç dengesini sağlamadaki etkinliğini açıkça göstermektedir. Gerilim kararlılığı açısından yapılan analizler, D-STATCOM'un sulama sistemlerinde gerilim dalgalanmalarını başarılı bir şekilde dengelediğini ortaya koymaktadır. Özellikle ani yük değişimlerinin sıkça yaşandığı bu sistemlerde, D-STATCOM gerilim regülasyonu sağlayarak şebekenin kararlı çalışmasını desteklemektedir. Ayrıca, frekans kontrolüne yönelik yapılan incelemeler, D-STATCOM'un sistem frekansını stabilize etmede de etkili olduğunu göstermektedir. Bu özellik, sulama sistemlerinin kesintisiz ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, D-STATCOM'un sulama sistemlerinde enerji verimliliğini artırmada, yük değişimlerine hızlı tepki vermede ve enerji güvenilirliğini sağlamada kritik bir rol oynadığını açıkça ortaya koymaktadır. Çalışmanın bulgularından hareketle, gelecekteki araştırmalar için öneriler geliştirilmiştir.

6.1 Sonuçlar

Sulama sistemleri, genellikle motorlar ve pompalar gibi yüksek reaktif güç talep eden endüktif yüklerin yoğun olduğu enerji sistemleridir. Bu tür sistemlerde reaktif güç ihtiyacının doğru yönetilememesi, güç faktörünün düşmesine, gerilim kararsızlıklarına ve enerji kayıplarının artmasına yol açmaktadır. Bu çalışmada, modelde yapılan simülasyonlar, sulama sistemlerinde 200 kVAR seviyesinde reaktif güç talebinin D-STATCOM ile karşılandığını göstermiştir. Bu, sistemin güç faktörünü başlangıçtaki 0.7 seviyesinden hedeflenen 0.95 seviyesine çıkarmış ve enerji kayıplarını %15 oranında azaltmıştır. Yük değişiklikleri sırasında reaktif güç dalgalanmalarının D-STATCOM devreye girdikten sonra stabilize olduğu gözlemlenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, şebeke gerilimi başlangıçta 33 kV seviyesinden yaklaşık 0.5 kV düşüm göstererek 32.5 kV'a kadar gerilemiştir. D-STATCOM'un devreye girmesiyle bu dalgalanmalar hızlı bir şekilde stabilize olmuş ve gerilim, hedef seviyeye çıkarılmıştır. Özellikle 0.3-0.4 saniye arasındaki yük değişimlerinde, D-STATCOM'un reaktif güç yönetimi sayesinde gerilim sapmalarının $\pm\%5$ sınırları içerisinde kaldığı görülmüştür. Sulama sistemlerinde enerji

tüketimi günün farklı saatlerinde değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, %50 ve %100 yük seviyelerinde D-STATCOM'un yük değişimlerine hızlı bir şekilde tepki verdiği ve reaktif güç dengesini sağladığı görülmüştür. Grafiklerden elde edilen verilere göre, D-STATCOM'un devreye girdiği andan itibaren sistem kararlılığı yaklaşık 0.1 saniye içerisinde sağlanmıştır. Bu, sulama sistemlerinde enerji kesintilerinin önüne geçmek için önemli bir katkıdır. D-STATCOM'un inverter çıkışındaki harmoniklerin LC filtreler ile temizlenmesi sayesinde enerji kalitesinin artırıldığı görülmüştür. Simülasyon sonuçlarında, DC bağlantı geriliminin sabit tutulduğu ($V_{dc} \approx 3000$) ve inverter çıkışının kararlı bir sinüzoidal forma ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, sulama sistemlerinde kullanılan ekipmanların daha uzun ömürlü çalışmasını ve enerji maliyetlerinin düşmesini sağlamaktadır. D-STATCOM'un reaktif güç ve frekans kontrolündeki etkinliği, simülasyon sonuçları ışığında değerlendirilmiştir. D-STATCOM, sistemin reaktif güç dalgalanmalarını hızlı bir şekilde dengelemiş ve yük değişimlerine uyum sağlamıştır. Simülasyon sonuçlarında, yük artışlarının yaşandığı durumlarda reaktif güç akışının 0.2 saniye içinde stabilize olduğu görülmüştür. Özellikle reaktif güç değerinin ($Q = 200$ kVAR)'lık talebe uygun olarak düzenlenmesi, sistemin kararlı çalışmasını sağlamıştır.

Reaktif güç dalgalanmalarının kontrol edilmesi, sistemin frekans kararlılığına doğrudan katkı sağlamıştır. Simülasyon verilerinde, frekans sapmalarının ± 0.1 Hz sınırları içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu, sulama sistemleri gibi dinamik yüklerin bulunduğu enerji sistemlerinde enerji güvenilirliğini artırmaktadır. D-STATCOM'un kontrol sistemi, yük değişikliklerini anlık olarak tespit etmiş ve sistem parametrelerini (reaktif güç, gerilim ve frekans) kısa sürede hedef değerlere ulaştırmıştır. Grafiklerde görülen yaklaşık 0.1 saniyelik tepki süresi, D-STATCOM'un dinamik enerji sistemleri için ideal bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

6.2 Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmanın bulguları, D-STATCOM'un sulama sistemleri ve diğer enerji uygulamalarında geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, bu teknolojinin daha geniş kapsamlı ve etkili bir şekilde kullanılabilmesi için gelecekte şu konularda çalışmalar yapılabilir. Sulama sistemlerindeki mevsimsel değişiklikler ve farklı yük profilleri dikkate alınarak daha kapsamlı simülasyonlar yapılabilir. Bu, D-STATCOM'un farklı enerji talebi senaryolarındaki performansını değerlendirmek için önemlidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (örneğin, güneş panelleri veya rüzgâr

türbinleri) sulama sistemlerine entegrasyonu, enerji maliyetlerini daha da düşürebilir. D-STATCOM'un bu tür sistemlerle entegrasyonu incelenebilir. Batarya veya süperkapasitör gibi enerji depolama sistemleri ile D-STATCOM'un birlikte çalışması araştırılabilir. Bu, reaktif güç dengesinin yanı sıra aktif güç yönetiminde de avantaj sağlayabilir. D-STATCOM kontrolöründe yapay zeka tabanlı algoritmalar ve makine öğrenimi yöntemleri kullanılarak, daha hassas ve verimli bir reaktif güç yönetimi sağlanabilir. Büyük sulama alanlarında birden fazla D-STATCOM cihazının koordinasyonunun incelenmesi, enerji verimliliği ve kararlılığın daha geniş bir ölçekte artırılmasına katkı sağlayabilir.

Bu çalışma, D-STATCOM'un sulama sistemlerindeki reaktif güç yönetimi, gerilim kararlılığı ve frekans kontrolü üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Elde edilen simülasyon sonuçları, D-STATCOM'un enerji maliyetlerini düşürmek, şebeke kararlılığını artırmak ve enerji kalitesini iyileştirmek için güçlü bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar, D-STATCOM'un farklı enerji sistemlerine entegrasyonu ve kontrol algoritmalarının optimizasyonu ile bu teknolojinin potansiyelini daha da artırabilir. Bu bulgular, sulama sistemlerinde sürdürülebilir enerji yönetimi için D-STATCOM'un kullanımını teşvik etmektedir.

Sonuç olarak, D-STATCOM'un sulama sistemlerinde reaktif güç yönetimi, gerilim kararlılığı ve frekans kontrolü üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Simülasyon sonuçları, D-STATCOM'un dinamik enerji sistemlerinde reaktif güç dalgalanmalarını etkin bir şekilde dengelediğini, güç faktörünü iyileştirdiğini ve enerji kayıplarını azalttığını göstermiştir. Özellikle sulama sistemlerinde sıkça karşılaşılan ani yük değişiklikleri ve endüktif yüklerden kaynaklanan enerji sorunları, D-STATCOM'un hızlı tepki mekanizması sayesinde başarıyla kontrol altına alınmıştır. D-STATCOM'un sağladığı gerilim düzenleme ve harmonik azaltma özellikleri, enerji kalitesini artırarak sistem güvenilirliğini sağlamıştır. Ayrıca, frekans sapmalarının ± 0.1 Hz sınırlarında tutulması, bu teknolojinin şebeke kararlılığı üzerindeki kritik rolünü ortaya koymuştur. Çalışmanın bulguları, D-STATCOM'un sulama sistemleri gibi enerji yoğun uygulamalarda enerji maliyetlerini düşürmek, sistem verimliliğini artırmak ve sürdürülebilir enerji yönetimini desteklemek için etkili bir çözüm sunduğunu kanıtlamaktadır. Gelecek çalışmalar, D-STATCOM'un yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama sistemleriyle entegrasyonunu inceleyerek bu teknolojinin daha geniş ölçekli enerji sistemlerine uyarlanmasını sağlamaya yönelik fırsatlar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abut, T., & Soyguder, S. (2019). Real-time control and application with self-tuning PID-type fuzzy adaptive controller of an inverted pendulum. *Industrial Robot: the international journal of robotics research and application*, 46(1), 159-170.
- Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2017). *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. John Wiley & Sons.
- Alam, M. S., Chowdhury, T. A., Dhar, A., Al-Ismael, F. S., Choudhury, M. S. H., Shafiullah, M., ... & Rahman, S. M. (2023). Solar and wind energy integrated system frequency control: A critical review on recent developments. *Energies*, 16(2), 812.
- Andrade, I., Pena, R., Blasco-Gimenez, R., Riedemann, J., Jara, W., & Pesce, C. (2021). *An Active/Reactive Power Control Strategy for Renewable Generation Systems. Electronics 2021*, 10, 1061.
- Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559-576.
- Asadi, Y., Eskandari, M., Mansouri, M., Savkin, A. V., & Pathan, E. (2022). Frequency and voltage control techniques through inverter-interfaced distributed energy resources in microgrids: A review. *Energies*, 15(22), 8580.
- Bergen, A. R., & Vittal, V. (2000). *Power Systems Analysis* (2nd ed.). Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall.
- Bollen, M. HJ. (2000). *Understanding power quality problems* (Vol. 3). New York: IEEE press.
- Chaturvedi, D. K. (2017). *Modeling and simulation of systems using MATLAB and Simulink*. CRC press.
- Cheng, Y., Azizipanah-Abarghooee, R., Azizi, S., Ding, L., & Terzija, V. (2020). Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review. *Applied Energy*, 279, 115798.

- Çitci, A. (2015). *Voltage stability analysis based energy function of electrical power systems incorporating FACTS devices* (PhD thesis). Sakarya University.
- Das, C. K., Bass, O., Kothapalli, G., Mahmoud, T. S., & Habibi, D. (2018). Optimal placement of distributed energy storage systems in distribution networks using artificial bee colony algorithm. *Applied energy*, 232, 212-228.
- Dehghanpour, K., & Afsharnia, S. (2015). Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1267-1276.
- Dessaint, L. A., Al-Haddad, K., Le-Huy, H., Sybille, G., & Brunelle, P. (1999). A power system simulation tool based on Simulink. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(6), 1252-1254.
- El-Hawary, M. E. (2008). *Introduction to electrical power systems*. John Wiley & Sons.
- Eremia, M., & Shahidehpour, M. (Eds.). (2013). *Handbook of electrical power system dynamics: modeling, stability, and control*. John Wiley & Sons.
- ESFAHANI, M. T., & Vahidi, B. (2016). Electric arc furnace power quality improvement by applying a new digital and predicted-based TSC control. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(5), 3724-3740.
- Fuchs, E. F., & Masoum, M. A. (2011). *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic press.
- Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 998-1027.
- Garg, A., & Agarwal, S. K. (2011). Modeling and simulation of static VAR compensator for improvement of voltage stability in power system. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, 2(2), 102-106.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2016). *Power System Analysis and Design*.
- Grainger, J. J., & Stevenson Jr, W. D. (1994). *Power System Analysis* (Vol. 621).

- Hamidan, M. A., & Borousan, F. (2022). Optimal planning of distributed generation and battery energy storage systems simultaneously in distribution networks for loss reduction and reliability improvement. *Journal of Energy Storage*, 46, 103844.
- Han, Y., Li, H., Shen, P., Coelho, E. A. A., & Guerrero, J. M. (2016). Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(3), 2427-2451.
- Harish, V. S. K. V., Anwer, N., & Kumar, A. (2022). Applications, planning and socio-techno-economic analysis of distributed energy systems for rural electrification in India and other countries: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102032.
- Hasheminamin, M., Agelidis, V. G., Salehi, V., Teodorescu, R., & Hredzak, B. (2015). Index-based assessment of voltage rise and reverse power flow phenomena in a distribution feeder under high PV penetration. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 5(4), 1158-1168.
- Holguin, J. P., Rodriguez, D. C., & Ramos, G. (2020). Reverse power flow (RPF) detection and impact on protection coordination of distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2393-2401.
- Hossain, J., & Pota, H. R. (2014). Robust control for grid voltage stability: High penetration of renewable energy. In *Power systems*. Springer Science+ Business Media.
- Kabalıcı, E., & Taşdemir, O. (2021). Mikro şebekelerde güç kalitesinin iyileştirilmesi için D-STATCOM tasarımı ve analizi. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 361-372.
- Kabalci, E. (2015). Converter and output filter topologies for STATCOMs. *Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems*, 1-34.
- Karbouj, H., Rather, Z. H., Flynn, D., & Qazi, H. W. (2019). Non-synchronous fast frequency reserves in renewable energy integrated power systems: A critical review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106, 488-501.

- Karlsson, D., & Hill, D. J. (1994). Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(1), 157-166.
- Kenyon, R. W. (2022). *The Renewables Driven Intersection of Power Systems and Power Electronics: Dynamics, Simulation, and Novel Frequency Control* (Doctoral dissertation, University of Colorado at Boulder).
- Khalid, M. (2024). Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges. *Energy Strategy Reviews*, 51, 101299.
- Kiani, A., & Annaswamy, A. (2012, December). A hierarchical transactive control architecture for renewables integration in smart grids. In *2012 IEEE 51st IEEE conference on decision and control (CDC)* (pp. 4985-4990). IEEE.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*.
- Li, J., Liu, C. C., & Schneider, K. P. (2010). Controlled partitioning of a power network considering real and reactive power balance. *IEEE Transactions on Smart grid*, 1(3), 261-269.
- Machowski, J., Bialek, J., & Bumby, J. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control* (2nd ed.). New York: Wiley.
- Machowski, J., Lubosny, Z., Bialek, J. W., & Bumby, J. R. (2020). *Power system dynamics: stability and control*. John Wiley & Sons.
- Majumder, S., Vosughi, A., Mustafa, H. M., Warner, T. E., & Srivastava, A. K. (2023). On the cyber-physical needs of DER-based voltage control/optimization algorithms in active distribution network. *IEEE Access*, 11, 64397-64429.
- Mallada, E., Zhao, C., & Low, S. (2017). Optimal load-side control for frequency regulation in smart grids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(12), 6294-6309.
- Medina, C., Ana, C. R. M., & González, G. (2022). Transmission grids to foster high penetration of large-scale variable renewable energy sources—A review of challenges, problems, and solutions. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 12(1), 146-169.

- Meegahapola, L., Sguarezi, A., Bryant, J. S., Gu, M., Conde D, E. R., & Cunha, R. B. (2020). Power system stability with power-electronic converter interfaced renewable power generation: Present issues and future trends. *Energies*, 13(13), 3441.
- Mohammadi, P., & Mehraeen, S. (2016). Challenges of PV integration in low-voltage secondary networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 525-535.
- Mohan, N. (2012). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power electronics: converters, applications, and design*. John wiley & sons.
- Mojumder, M. R. H., Hasanuzzaman, M., & Cuce, E. (2022). Prospects and challenges of renewable energy-based microgrid system in Bangladesh: a comprehensive review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(7), 1987-2009.
- Muteithia, W. M. (2014). *Design And Development Of An FPGA Based DDFS Signal Generator* (Doctoral dissertation, University of Nairobi).
- Mutluer, H. B. (2008). Design, implementation and engineering aspects of TCR for industrial SVC systems.
- Narain G.. Hingorani, & Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*. Wiley-IEEE Press.
- Nguyen, M. Y. (2020). A Coordinated Voltage Control Scheme of Distribution Networks with Distributed Generation Based on On-Load Tap Changers and Shunt Capacitors by Particle Swarm Optimization. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 21(1), 20190203.
- Ozer, B., Arikan, O., Moral, G., & Altintas, A. (2015). Extraction of primary and secondary frequency control from active power generation data of power plants. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, 16-22.
- Partha Sarathy, P. R. (2018). *Analysis and Optimization of Medium Voltage Line Voltage Regulators* (Master's thesis, NTNU).

- Rahman, M. S., & Oo, A. M. T. (2017). Distributed multi-agent based coordinated power management and control strategy for microgrids with distributed energy resources. *Energy conversion and management*, 139, 20-32.
- Rawat, M. S., & Vadhera, S. (2019). A comprehensive review on impact of wind and solar photovoltaic energy sources on voltage stability of power grid. *Journal of Engineering Research*, 7(4).
- Rebours, Y. G., Kirschen, D. S., Trotignon, M., & Rossignol, S. (2007). A survey of frequency and voltage control ancillary services—Part I: Technical features. *IEEE Transactions on power systems*, 22(1), 350-357.
- Saberi, H., Nazaripouya, H., & Mehraeen, S. (2021). Implementation of a stable solar-powered microgrid testbed for remote applications. *Sustainability*, 13(5), 2707.
- Saqib, M. A., & Saleem, A. Z. (2015). Power-quality issues and the need for reactive-power compensation in the grid integration of wind power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 51-64.
- Sarkar, M. N. I., Meegahapola, L. G., & Datta, M. (2018). Reactive power management in renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization algorithms. *Ieee Access*, 6, 41458-41489.
- Shu, Z., Xie, S., & Li, Q. (2010). Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(2), 334-343.
- Grup Arge Enerji ve Kontrol Sistemleri San. ve Tic. Ltd. Şti. (n.d.). *Smart SVC Reaktif Güç Kontrol Rölesi Kullanım Kılavuzu* (Rev 1.00).
- Shwehdi, M., & Mantawy, A. H. (2019). Investigation of Electrical Load Disturbances Influences on Steel Factory Production Lines. *Int. J. Educ. Res*, 7, 41-54.
- Summers, A., Johnson, J., Darbali-Zamora, R., Hansen, C., Anandan, J., & Showalter, C. (2020). A comparison of DER voltage regulation technologies using real-time simulations. *Energies*, 13(14), 3562.

- Tshivhase, N., Hasan, A. N., & Shongwe, T. (2021). An average voltage approach to control energy storage device and tap changing transformers under high distributed generation. *IEEE Access*, 9, 108731-108753.
- Twaisan, K., & Barışçı, N. (2022). Integrated distributed energy resources (DER) and microgrids: modeling and optimization of DERs. *Electronics*, 11(18), 2816.
- Ullah, K., Basit, A., Ullah, Z., Aslam, S., & Herodotou, H. (2021). Automatic generation control strategies in conventional and modern power systems: A comprehensive overview. *Energies*, 14(9), 2376.
- Undrill, J. (2018). Primary frequency response and control of power system frequency.
- Wagle, R. (2023). Voltage Control in Smart Distribution Network with High Integration of DERs.
- Wang, J., Fu, C., & Zhang, Y. (2008). SVC control system based on instantaneous reactive power theory and fuzzy PID. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(4), 1658-1665.
- Wang, L., Liang, D. H., Crossland, A. F., Taylor, P. C., Jones, D., & Wade, N. S. (2015). Coordination of multiple energy storage units in a low-voltage distribution network. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6), 2906-2918.
- Wang, L., Yan, R., & Saha, T. K. (2019). Voltage regulation challenges with unbalanced PV integration in low voltage distribution systems and the corresponding solution. *Applied Energy*, 256, 113927.
- Wang, P., Lu, X., Yang, X., Wang, W., & Xu, D. (2015). An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(9), 6658-6673.
- Xavier, R. (2022). *The Coordination and control of smart inverters utilizing Volt-VAr and Volt-Watt in low voltage networks, and opportunities for South Africa* (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).

- Yu, P., Wan, C., Song, Y., & Jiang, Y. (2020). Distributed control of multi-energy storage systems for voltage regulation in distribution networks: A back-and-forth communication framework. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(3), 1964-1977.
- Zhang, X. P. (Ed.). (2010). *Restructured electric power systems: analysis of electricity markets with equilibrium models*. John Wiley & Sons.
- Zhang, X. P. (2010). Fundamentals of electric power systems. *Restructured Electric Power Systems: Analysis of Electricity Markets with Equilibrium Models*, 1-52.
- Zhao, C., Topcu, U., & Low, S. (2012, November). Swing dynamics as primal-dual algorithm for optimal load control. In *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)* (pp. 570-575). IEEE.
- Zhao, C., Topcu, U., Li, N., & Low, S. (2014). Design and stability of load-side primary frequency control in power systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 59(5), 1177-1189.
- Zheng, F., Su, M., Liu, B., & Liu, W. (2023). Adaptive Virtual Inertia Control Strategy for a Grid-Connected Converter of DC Microgrid Based on an Improved Model Prediction. *Symmetry*, 15(11), 2072.
- Zhou, Y. (2022). [Retracted] A Summary of PID Control Algorithms Based on AI-Enabled Embedded Systems. *Security and Communication Networks*, 2022(1), 7156713.

EKLER

EK-1

```
import matplotlib.pyplot as plt
import networkx as nx

# Sulama fiderlerinin elektriksel modellemesi için bir şema çizimi

# Graf oluşturma
G = nx.DiGraph()

# Düğümler ve özellikleri
nodes = {
    "Gerilim Kaynağı (33kV)": (0, 3),
    "Hat İmpedansı": (2, 3),
    "Kompanzasyon Cihazları": (4, 4),
    "Sulama Yüğü": (6, 3),
    "Kontrol Sistemi": (4, 2),
    "Frekans Ölçümü": (6, 2)
}

# Düğümleri ekleme
for node, pos in nodes.items():
    G.add_node(node, pos=pos)

# Kenarları tanımlama
edges = [
    ("Gerilim Kaynağı (33kV)", "Hat İmpedansı"),
    ("Hat İmpedansı", "Kompanzasyon Cihazları"),
    ("Kompanzasyon Cihazları", "Sulama Yüğü"),
    ("Kompanzasyon Cihazları", "Kontrol Sistemi"),
    ("Kontrol Sistemi", "Frekans Ölçümü"),
    ("Sulama Yüğü", "Frekans Ölçümü")
]

# Kenarları ekleme
G.add_edges_from(edges)

# Düğüm pozisyonlarını alma
pos = nx.get_node_attributes(G, 'pos')

# Çizim
plt.figure(figsize=(10, 6))
nx.draw(G, pos, with_labels=True, node_size=3000, node_color="lightblue",
font_size=10, font_weight="bold", edge_color="gray")
plt.title("Sulama Fiderlerinin Elektriksel Modellemesi", fontsize=14)
plt.show()
```

EK-2

% MATLAB Koduyla Güç Sistemi Modelleme

% Şebeke Parametreleri

V_mv = 33e3; % Orta Gerilim (33 kV)

V_lv = 400; % Düşük Gerilim (400 V)

Z_line_per_km = 0.1 + 1i*0.05; % Hat Empedansı (Ω/km)

line_length = 5; % Hat Uzunluğu (km)

Z_line_total = Z_line_per_km * line_length; % Toplam Hat Empedansı

% Yük Parametreleri

P_load = 200e3; % Aktif Güç (Watt)

Q_load = 200e3; % Reaktif Güç (VAR)

pf_before = 0.7; % Güç Faktörü (Kompanzasyon Öncesi)

pf_after = 0.95; % Güç Faktörü (Kompanzasyon Sonrası)

% Kompanzasyon Cihazları

Q_STATCOM = 200e3; % STATCOM Kapasitesi (VAR)

Q_capacitor = 50e3; % Kapasitör Bankı (VAR)

% Hat Gerilim Düşümü Hesaplama

I_line = (P_load + 1i*Q_load) / V_mv; % Hat Akımı

V_drop = I_line * Z_line_total; % Gerilim Düşümü

% Şebeke Gerilimleri

V_send = V_mv; % Gönderim Gerilimi

V_receive = V_send - V_drop; % Alıcı Tarafındaki Gerilim

% Şematik Çizim

figure;

graph = digraph();

graph = addnode(graph, {'33kV Source', 'Transmission Line', 'Load', 'STATCOM', 'Capacitor Bank'});

graph = addedge(graph, 1, 2, {'Z_line'});

graph = addedge(graph, 2, 3, {'Load'});

graph = addedge(graph, 3, 4, {'STATCOM'});

graph = addedge(graph, 3, 5, {'Capacitor'});

h = plot(graph, 'Layout', 'layered', 'EdgeLabel', graph.Edges.Weight);

set(h, 'LineWidth', 1.5);

title('Güç Sistemi Şeması');

% Gerilim ve Güç Faktörü İyileştirmesi

fprintf('Gönderim Gerilimi: %.2f kV\n', abs(V_send)/1e3);

fprintf('Alıcı Gerilimi: %.2f kV\n', abs(V_receive)/1e3);

fprintf('Güç Faktörü (Öncesi): %.2f\n', pf_before);

fprintf('Güç Faktörü (Sonrası): %.2f\n', pf_after);

% MATLAB Koduyla Güç Sistemi Modelleme ve Optimizasyon

% Şebeke Parametreleri

V_mv = 33e3; % Orta Gerilim (33 kV)

V_lv = 400; % Düşük Gerilim (400 V)

Z_line_per_km = 0.1 + 1i*0.05; % Hat Empedansı (Ω/km)

line_length = 5; % Hat Uzunluğu (km)

Z_line_total = Z_line_per_km * line_length; % Toplam Hat Empedansı

% Yük Parametreleri

P_load = 200e3; % Aktif Güç (Watt)

Q_load = 200e3; % Reaktif Güç (VAR)

pf_before = 0.7; % Güç Faktörü (Kompanzasyon Öncesi)

pf_target = 0.95; % Hedef Güç Faktörü

% Kompanzasyon Cihazları (Optimizasyon İçin Başlangıç)

Q_STATCOM = 200e3; % STATCOM Kapasitesi (VAR)

Q_capacitor = 50e3; % Kapasitör Bankı (VAR)

% Hat Gerilim Düşümü Hesaplama

I_line = (P_load + 1i*Q_load) / V_mv; % Hat Akımı

V_drop = I_line * Z_line_total; % Gerilim Düşümü

V_receive = V_mv - V_drop; % Alıcı Tarafındaki Gerilim

% Optimizasyon Problemi

options = optimset('Display', 'iter', 'TolFun', 1e-6);

objective = @(Q_stat) abs(cos(atan((Q_load - Q_stat) / P_load)) - pf_target); % Güç Faktörü Hatası

Q_stat_opt = fminbnd(objective, 0, 300e3, options); % STATCOM Kapasitesini

Optimize Et

% Optimize Edilmiş Güç Faktörü ve Akım Hesabı

Q_load_new = Q_load - Q_stat_opt; % Yeni Reaktif Güç

pf_optimized = cos(atan(Q_load_new / P_load)); % Optimize Edilmiş Güç Faktörü

I_line_new = (P_load + 1i*Q_load_new) / V_mv; % Yeni Hat Akımı

% Sonuçların Görselleştirilmesi

figure;

categories = {'Başlangıç PF', 'Hedef PF', 'Optimize PF'};

values = [pf_before, pf_target, pf_optimized];

bar(values, 'FaceColor', 'cyan');

title('Güç Faktörü Optimizasyonu');

ylabel('Güç Faktörü');

xticks(1:length(categories));

xticklabels(categories);

grid on;

% Optimizasyon Sonuçları

fprintf('Optimize Edilmiş STATCOM Kapasitesi: %.2f kVAR\n', Q_stat_opt / 1e3);

fprintf('Yeni Güç Faktörü: %.2f\n', pf_optimized);

fprintf('Yeni Hat Akımı: %.2f A\n', abs(I_line_new));

% TARIMSAL SULAMA FİDERLERİNDE OTOMATİK REAKTİF GÜÇ DENGESİNİN MATLAB SİMULİNK İLE MODELLEMESİ VE UYGULANMASI

% Şebeke Parametreleri

V_mv = 33e3; % Orta Gerilim (33 kV)

V_lv = 400; % Düşük Gerilim (400 V)

Z_line_per_km = 0.1 + 1i*0.05; % Hat Empedansı (Ω/km)

line_length = 5; % Hat Uzunluğu (km)

Z_line_total = Z_line_per_km * line_length; % Toplam Hat Empedansı

% Yük Parametreleri (Tarımsal Sulama Fiderleri için)

P_load = 200e3; % Aktif Güç (Watt)

Q_load = 200e3; % Reaktif Güç (VAR)

pf_before = 0.7; % Güç Faktörü (Kompanzasyon Öncesi)

pf_target = 0.95; % Hedef Güç Faktörü

% Kompanzasyon Cihazları (Optimizasyon İçin Başlangıç)

Q_STATCOM = 200e3; % STATCOM Kapasitesi (VAR)

Q_capacitor = 50e3; % Kapasitör Bankı (VAR)

% Hat Gerilim Düşümü Hesaplama

I_line = (P_load + 1i*Q_load) / V_mv; % Hat Akımı

V_drop = I_line * Z_line_total; % Gerilim Düşümü

V_receive = V_mv - V_drop; % Alıcı Tarafındaki Gerilim

% Simulink Modeli için Devre Elemanlarının Tanımlanması

open_system(new_system('TarımsalSulamaFiderleriModeli'));

add_block('powerlib/Elements/Three-Phase Source',

'TarımsalSulamaFiderleriModeli/Three-Phase Source');

add_block('powerlib/Elements/Three-Phase Transformer (Two Windings)',

'TarımsalSulamaFiderleriModeli/Transformer');

add_block('powerlib/Elements/Three-Phase Series RLC Load',

'TarımsalSulamaFiderleriModeli/Load');

add_block('powerlib/Elements/Three-Phase Dynamic Var Generator (Phasor Type)',

'TarımsalSulamaFiderleriModeli/STATCOM');

add_block('powerlib/Elements/Three-Phase Capacitor',

'TarımsalSulamaFiderleriModeli/Capacitor');

% Elemanların Bağlantıları

add_line('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 'Three-Phase Source/1', 'Transformer/1');

add_line('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 'Transformer/2', 'Load/1');

add_line('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 'Load/1', 'STATCOM/1');

add_line('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 'Load/1', 'Capacitor/1');

% Parametrelerin Ayarlanması

set_param('TarımsalSulamaFiderleriModeli/Three-Phase Source', 'Vrms', '33e3');

set_param('TarımsalSulamaFiderleriModeli/Transformer', 'NominalPower', '250e3',

'PrimaryVoltage', '33e3', 'SecondaryVoltage', '400');

set_param('TarımsalSulamaFiderleriModeli/Load', 'P', num2str(P_load), 'Q',

num2str(Q_load));

```

set_param('TarımsalSulamaFiderleriModeli/STATCOM', 'Qmax',
num2str(Q_STATCOM));
set_param('TarımsalSulamaFiderleriModeli/Capacitor', 'Capacitance', '50e-6');

% Tarımsal Sulama İçin Otomatik Reaktif Güç Yönetimi
add_block('simulink/Signal Routing/Switch',
'TarımsalSulamaFiderleriModeli/ReaktifGucKontrolu');
add_block('simulink/Commonly Used Blocks/Scope',
'TarımsalSulamaFiderleriModeli/Scope');
add_line('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 'STATCOM/1', 'ReaktifGucKontrolu/1');
add_line('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 'Capacitor/1', 'ReaktifGucKontrolu/2');
add_line('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 'ReaktifGucKontrolu/1', 'Scope/1');

% Simülasyon Sonuçlarının Görselleştirilmesi
figure;
categories = {'Başlangıç PF', 'Hedef PF', 'Optimize PF'};
values = [pf_before, pf_target, 0.95]; % Optimize edilen PF örnek değeri
bar(values, 'FaceColor', 'cyan');
title('Güç Faktörü Optimizasyonu');
ylabel('Güç Faktörü');
xticks(1:length(categories));
xticklabels(categories);
grid on;

figure;
x = categorical({'Hat Akımı (A)', 'Gerilim Düşümü (kV)', 'STATCOM Kapasitesi (kVAR)'});
x = reordercats(x, {'Hat Akımı (A)', 'Gerilim Düşümü (kV)', 'STATCOM Kapasitesi (kVAR)'});
y = [abs(I_line), abs(V_drop)/1e3, Q_STATCOM/1e3];
bar(x, y, 'FaceColor', 'lightblue');
title('Optimizasyon Sonuçları');
ylabel('Değerler');
grid on;

% Modelin Kaydedilmesi ve Simülasyon
save_system('TarımsalSulamaFiderleriModeli');
close_system('TarımsalSulamaFiderleriModeli', 0);

```