

**T.C.
BURDUR MEHMET AKİF ERSOY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE
GERİLİM SEVİYESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE
D-STATCOM KULLANIMININ İNCELENMESİ**

Bilal İNCİ

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ÇİFCİ

BURDUR, 2025

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca **Yüksek Lisans** Tezi olarak sunduğum “**Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Gerilim Seviyesinin İyileştirilmesinde D-STATCOM Kullanımının İncelenmesi**” başlıklı bu tezin,

- Kendi çalışmam olduğunu,
 - Sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi,
 - Bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi,
 - Kullandığım verilerde değişiklik yapmadığımı,
 - Tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını,
 - Bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı,
 - Bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı,
- bildirir, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

13 / 08 / 2025

(İmza)
Bilal İNCİ

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve bu araştırma boyunca beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Ahmet ÇİFCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Deney, simülasyon ve araştırmalarımnda, değerli vaktini ve bilgi birikimini esirgmeden katkı sunan değerli meslektaşım, Dr. Ergin KAYAR'a teşekkür ederim.

Tez çalışması ve araştırmalarım sırasında yapmış olduğu yardımların yanında, meslek hayatımın her aşamasında teknik desteğini esirgemeyen, fikirleri ile yoluma ışık tutan, kıymetli kardeşim Elektrik-Elektronik Mühendisi Bekir GÜLER'e teşekkür ederim.

Eğitim sürecim dahil olmak üzere hayatımın her aşamasında beni destekleyen, motivasyon kaynağım, can yoldaşım, hayat arkadaşım Hatice AYDEMİR İNCİ'ye ve kıymetli evlatlarımız Eslem KIYAK KARA, Burak İNCİ ve Buğra İNCİ'ye sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ağustos, 2025

Bilal İNCİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT.....	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Taraması	2
1.2. Tezin İçeriği ve Amacı.....	8
1.3. Tezin Organizasyonu	9
2. GENEL BİLGİLER.....	11
2.1. Elektrik Dağıtım Şebekeleri.....	11
2.1.1. Enterkonnekte Şebeke.....	12
2.1.2. Dal-budak (Dallı, Radyal) Şebeke	13
2.1.3. Ring (Halka) Şebeke	15
2.1.4. Ağ (Gözlü) Şebekeler	15
2.2. Elektrik Enerjisinin Kalitesi (Güç Kalitesi).....	16
2.3. Harmonikler	17
2.4. Reaktif Güç Yönetimi ve Kompanzasyon Sistemleri	18
2.4.1. Kompanzasyon Yöntemlerinin Gelişimi ve Sınırlılıkları	19
2.4.2. Türkiye’deki Kompanzasyon Mevzuatı ve Uygulamaları.....	20
2.5. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri	20
2.5.1. Paralel (Şönt) Bağlantılı Cihazlar	22
2.5.1.1. Statik VAR kompanzatör (SVC).....	22
2.5.1.2. Statik senkron kompanzatör (STATCOM).....	23
2.5.2. Seri Bağlantılı Cihazlar.....	25
2.5.2.1. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC).....	25
2.5.2.2. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC).....	26
2.5.3. Seri-Paralel (Karma) Bağlantılı Cihazlar.....	27
2.5.3.1. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC)	27
2.5.3.2. Hatlar arası güç akışı kontrolörü (IPFC)	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM	30
3.1. İncelenen Dağıtım Şebekesi Modeli ve Bileşenleri	30
3.2. Dağıtım Statik Senkron Kompanzatoru (D-STATCOM)	32
3.2.1. Modelin D-STATCOM Kontrol Bloğu	35
3.2.2. Modelin D-STATCOM Algoritması	37
3.3. Simülasyon Ortamı: DIgSILENT PowerFactory	38
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	43
4.1. Optimal D-STATCOM Bağlantı Noktasının Belirlenmesi.....	43
4.2. Dinamik Performans Analizi: D-STATCOM’un Sistem Üzerindeki Etkileri ..	45
4.2.1. D-STATCOM’un Devrede Olduğu ve Devrede Olmadığı Durumlarda Sistemin Tepkisi	45
4.2.2. D-STATCOM’un Devrede Olduğu ve Devrede Olmadığı Durumlarda Motorların Devreye Alınması.....	50

4.2.3. D-STATCOM'un Devrede Olduğu ve Devrede Olmadığı Durumlarda	
Motorların Devreden Çıkarılması	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
EKLER	77



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemi	11
Şekil 2.2. Enterkonnekte şebeke modeli	13
Şekil 2.3. Dal-budak (dallı, radyal) şebeke modeli.....	14
Şekil 2.4. Ring (halka) şebeke modeli	15
Şekil 2.5. Ağ Gözlü şebeke modeli.....	16
Şekil 2.6. Sinüs eğrisinde oluşan harmonik etki-tepki grafikleri.....	17
Şekil 2.7. FACTS cihazlarının sınıflandırılması.....	21
Şekil 2.8. SVC bağlantı şeması.....	22
Şekil 2.9. STATCOM genel yapısı	23
Şekil 2.10. STATCOM V-I karakteristiği.....	24
Şekil 2.11. TCSC'nin genel yapısı.....	25
Şekil 2.12. SSSC'nin genel yapısı	26
Şekil 2.13. UPFC'nin genel yapısı.....	28
Şekil 2.14. IPFC'nin genel yapısı	29
Şekil 3.1. Şebeke modelinin tek hat şeması.....	30
Şekil 3.2. D-STATCOM'un genel yapısı	33
Şekil 3.3. D-STATCOM kontrol bloğu	36
Şekil 3.4. D-STATCOM blok yapısı	37
Şekil 3.5. Veri tabanı yöneticisi.....	39
Şekil 3.6. Çizim alanı ve ekipmanlar	40
Şekil 3.7. Proje dosyası oluşturma.....	41
Şekil 3.8. Proje etkinleştirme	42
Şekil 4.1. D-STATCOM'un farklı ölçüm noktalarındaki gerilim değişim grafiği	43
Şekil 4.2. D-STATCOM'un şebeke gerilimine tepki grafiği.....	46
Şekil 4.3. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda gerilim değişimi	48
Şekil 4.4. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda akım değişimi	48
Şekil 4.5. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda $\cos(\varphi)$ değişimi	49
Şekil 4.6. D-STATCOM'un devrede olmadığı durumda motorların devreye girmesi....	51

Şekil 4.7. D-STATCOM'un devrede olduğu durumda motorların devreye girmesi	52
Şekil 4.8. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda AG Pano ölçümü	54
Şekil 4.9. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Branşman-1 ölçümü	55
Şekil 4.10. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Branşman-2 ölçümü	55
Şekil 4.11. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-6 ölçümü	56
Şekil 4.12. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-9 ölçümü	56
Şekil 4.13. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-13 ölçümü	57
Şekil 4.14. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-16 ölçümü	57
Şekil 4.15. D-STATCOM devrede olmadığı durumda motorların devreden çıkması	59
Şekil 4.16. D-STATCOM devrede olduğu durumda motorların devreden çıkması	60
Şekil 4.17. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda AG Pano ölçümü	62
Şekil 4.18. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Branşman-1 ölçümü	62
Şekil 4.19. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Branşman-2 ölçümü	63
Şekil 4.20. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-6 ölçümü	63
Şekil 4.21. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-9 ölçümü	64
Şekil 4.22. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-13 ölçümü	64
Şekil 4.23. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-16 ölçümü	65
EK 1 - Şekil 3.1. Şebeke modelinin tek hat şeması	76
EK 2 - Şekil 3.2. D-STATCOM kontrol bloğu	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Paralel bağlı FACTS cihazların teknik karşılaştırması.....	25
Çizelge 2.2. Seri bağlı FACTS cihazların teknik karşılaştırması	27
Çizelge 3.1. D-STATCOM'un teknik ve dinamik özelliklerinin karşılaştırılması.....	34
Çizelge 3.2. Klasik kompanzasyon ile D-STATCOM'un teknik karşılaştırması.....	35
Çizelge 4.1. D-STATCOM'un farklı ölçüm noktalarındaki gerilim değişim tablosu	44
Çizelge 4.2. D-STATCOM'un şebeke gerilimine tepki değerleri	47



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Amper
AC	: Alternatif akım
AG	: Alçak gerilim
AI	: Yapay zekâ
ANN	: Yapay sinir ağı
AR-GE	: Araştırma Geliştirme
BESS	: Batarya enerji depolama sistemi
C	: Kapasitör
CIGRE	: Büyük Elektrik Sistemleri Uluslararası Konseyi
cosφ	: Güç faktörü
DC	: Doğru akım
D-STATCOM	: Dağıtım statik senkron kompensatörü
ENTSO-E	: Avrupa Elektrik İletim Sistemi Operatörleri Ağı
EPDK	: Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu
EÜAŞ	: Türkiye Elektrik Üretim A.Ş.
FACTS	: Esnek alternatif akım iletim sistemleri
GTO	: Kapıdan kesmeli tristör
HVDC	: Yüksek gerilimli doğru akım
Hz	: Hertz
IGBT	: İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistör
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IPFC	: Hatlararası güç akış kontrolörü
L	: Endüktans
OLTC	: Yük altında kademe değiştirici
P	: Aktif güç
PID	: Oransal integral türev
PLL	: Faz kilitlemeli döngü
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
Q	: Reaktif güç
R	: Direnç
RMS	: Ortalama karekök

SAIDI	: Ortalama sistem kesinti süresi endeksi
SAIFI	: Ortalama sistem kesinti sıklığı endeksi
SCADA	: Merkezi denetim ve veri toplama
SSSC	: Statik senkron seri kompanzatör
SVC	: Statik VAr kompanzatör
TCR	: Tristör kontrollü reaktör
TCSC	: Tristör kontrollü seri kapasitör
TEDAŞ	: Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
THD	: Toplam harmonik distorsiyon
TSC	: Tristör anahtarlama kapasitör
UPFC	: Birleştirilmiş güç akış kontrolörü
UPS	: Kesintisiz güç kaynağı
V	: Volt
VAr	: Volt amper reaktif
VSC	: Gerilim kaynaklı çevirici
W	: Watt
YG	: Yüksek gerilim

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Dağıtım Şebekelerinde Gerilim Seviyesinin İyileştirilmesinde D-STATCOM Kullanımının İncelenmesi

Bilal İNCİ

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet ÇİFCİ

Ağustos, 2025

Dal-budak (Radyal) dağıtım şebekeleri, özellikle tarımsal sulama motorları gibi yüksek endüktif yüklere sahip kırsal bölgelerde, ciddi gerilim regülasyonu ve güç kalitesi sorunlarıyla karşı karşıyadır. Bu motorların devreye alınması sırasında çektikleri yüksek demeraj akımları, hattın empedansı ile birleşerek hat sonunda standart toleransları aşan gerilim düşümlerine neden olmaktadır. Bu tez çalışmasının amacı, Gerilim Kaynaklı Çevirici (VSC) tabanlı modern bir FACTS cihazı olan Dağıtım Statik Senkron Kompanzatör'ün (D-STATCOM), bu tür zayıf şebekelerdeki gerilim profilini iyileştirme ve güç faktörünü düzeltmedeki etkinliğini araştırmaktır. Bu amaçla, DIgSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak tarımsal yüklerin yoğun olduğu tipik bir radyal dağıtım şebekesi modellenmiştir. Sistemin dinamik davranışı, motor yüklerinin kademeli olarak devreye alındığı zaman alanı simülasyonları ile incelenmiş ve şebekenin performansı D-STATCOM devredeyken ve devre dışıyken olmak üzere karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, D-STATCOM'un milisaniyeler mertebesindeki hızlı tepki süresiyle anlık reaktif güç enjeksiyonu sağlayarak, motorların yol alması sırasında oluşan gerilim sarkmalarını etkin bir şekilde bastırdığını göstermektedir. Cihazın entegrasyonu, şebekenin tüm düğüm noktalarındaki gerilim profilinin kabul edilebilir sınırlar içinde stabilize edildiği ve sistemin genel güç faktörünün belirgin bir şekilde iyileştirildiği kanıtlanmıştır. Bu çalışma, D-STATCOM'un, özellikle dinamik yük karakteristiğine sahip zayıf kırsal şebekelerde güç kalitesini artırmak ve gerilim kararlılığını sağlamak için geleneksel yöntemlere kıyasla üstün ve etkili bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır. Bu teknolojinin kullanımıyla, maliyetli altyapı yatırımlarının azaltılabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: dal-budak şebekeler, DIgSILENT PowerFactory, D-STATCOM, FACTS, gerilim regülasyonu, güç kalitesi

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

A Study on Utilizing D-STATCOM to Improve Voltage Profile in Electrical Distribution Networks

Bilal İNCİ

**Burdur Mehmet Akif Ersoy University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet ÇİFCİ

August, 2025

Radial distribution networks, particularly in rural areas with a high penetration of inductive loads such as agricultural irrigation motors, face significant voltage regulation and power quality challenges. The high inrush currents drawn by these motors during startup, combined with the high line impedance, lead to severe voltage sags at the far end of the feeders, often exceeding standard tolerance limits. The primary objective of this thesis is to investigate the effectiveness of a Distribution Static Synchronous Compensator (D-STATCOM), a modern Voltage Source Converter (VSC)-based FACTS device, in improving the voltage profile and correcting the power factor in such weak distribution networks. To achieve this objective, a typical radial distribution network representing a rural area with high agricultural loads was modeled using the DIgSILENT PowerFactory software. The dynamic behavior of the system was examined through time-domain simulations, wherein motor loads were sequentially started. The system's performance was then comparatively analyzed for two main scenarios: with the D-STATCOM connected (compensated case) and without it (uncompensated case). The simulation results demonstrate that the D-STATCOM, with its millisecond-level fast response, effectively mitigates the voltage sags caused by motor starting through instantaneous reactive power injection. It is proven that with the integration of the device, the voltage profile across all nodes of the network is stabilized within acceptable limits, and the overall system power factor is significantly improved. This study concludes that D-STATCOM presents a superior and effective solution compared to conventional methods for enhancing power quality and ensuring voltage stability, particularly in weak rural networks with dynamic load characteristics. The application of this technology is foreseen to reduce the need for costly infrastructure upgrades.

Keywords: radial networks, DIgSILENT PowerFactory, D-STATCOM, FACTS, voltage regulation, power quality

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, elektronların hareketinden doğan bir enerji türü olup günümüz modern yaşamının temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir. Aydınlatmadan iletişime, ulaşımdan endüstriyel üretime kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin üretiminden son kullanıcıya kadar olan sürecin güvenilir, verimli ve ekonomik biçimde yönetilmesi, enerji sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir.

Elektrik enerjisinin üretim noktasından tüketim noktasına kadar iletimi sırasında, iletken ve kablolar gibi iletim elemanlarında oluşan direnç nedeniyle enerji kayıpları meydana gelir (Bozgeyik, 2015). Bu kayıplar, hattın başı ile sonu arasında gerilim farkına yol açar ve bu fark “gerilim düşümü” olarak adlandırılır. Gerilim düşümü, Ohm Yasası’na göre iletkenin direnci (R) ile akımın (I) çarpımına bağlıdır ve $V = I \times R$ formülü ile ifade edilir. Yük arttıkça sistemden çekilen akım artar, bu da sabit dirençli bir iletken için gerilim düşümünün artmasına neden olur.

Elektrik iletim hatlarında meydana gelen yük, genel olarak elektrik enerjisini tüketen tüm cihazlar ve sistemlerdir. Bunlar, konutlardaki aydınlatma sistemlerinden, sanayi tesislerinde kullanılan motorlara, tarımsal sulama sistemlerinde yer alan sulama motorlarına kadar uzanır. Bu yüklerin özellikleri enerji sistemlerinde çeşitli güç kalitesi problemlerine neden olmaktadır. Özellikle endüktif karakterli yüklerin yaygın olduğu sanayi ve tarım uygulamalarında, alternatif akım sistemlerinde reaktif güç talebi ortaya çıkar. Reaktif güç, iş üretmeyen ancak manyetik alan oluşturmak için gerekli olan güç bileşenidir. Reaktif gücün kontrolsüz tüketimi, gerilim düşümü, iletim kayıpları ve harmonik distorsiyon gibi olumsuz etkilere yol açabilir. Reaktif gücün sistemdeki varlığı, güç faktörünü düşürerek sistem kararlılığını olumsuz etkiler. Bu durum hem işletme maliyetlerinin artmasına hem de enerji iletim hatlarının verimliliğinin düşmesine neden olur. Ayrıca modern elektronik sistemler, anahtarlamalı güç kaynakları ve otomasyon sistemleri gibi hassas kontrol üniteleri, reaktif güçten ve harmoniklerden doğrudan etkilenerek performans kaybına ve hatta arızalara neden olabilir.

Bu bağlamda, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik filtreleme sistemlerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu sistemler, enerji kalitesini artırmakla kalmaz, aynı zamanda sanayi ve ticari işletmelerde enerji verimliliğini artırır, faturalarda tasarruf sağlar, ekipman ömrünü uzatır ve şebeke kararlılığını destekler. İyi tasarlanmış bir kompanzasyon ve filtreleme sistemi, teknik açıdan enerji sisteminin performansını

iyileştirirken, ekonomik ve çevresel açıdan da daha sürdürülebilir bir yapı sunar. Günümüzde bu amaçlara ulaşmak için güç elektroniği tabanlı gelişmiş sistemler olan Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission Systems - FACTS) yaygın olarak kullanılmaktadır. FACTS cihazları, iletim hatlarının esnekliğini artırarak aktif ve reaktif güç akışlarının kontrolünü sağlar, sistem kararlılığını ve güvenilirliğini yükseltir. Bu cihazlar aracılığıyla gerilim seviyeleri düzenlenebilir, iletim kapasiteleri artırılabilir ve enerji kayıpları minimize edilebilir.

Bu tez çalışması kapsamında, Dağıtım Statik Senkron Kompansatörü (Distribution Static Synchronous Compensator- D-STATCOM) gibi paralel bağlı FACTS cihazlarının elektrik dağıtım sistemlerine entegrasyonu ele alınmıştır. D-STATCOM'un şebekeye entegrasyonu ile gerilim seviyesinin düzenlendiği, reaktif güç ihtiyacının karşılandığı ve bu sayede iletkenler üzerindeki enerji kayıplarının azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda, elektrik enerjisinin son kullanıcıya daha verimli, kontrollü ve ekonomik biçimde ulaştırılmasının mümkün olduğu ortaya konmuştur.

1.1. Kaynak Taraması

Elektrik dağıtım şebekeleri, üretilen elektriğin iletim sistemi üzerinden yerel dağıtım merkezlerine ve oradan da son kullanıcılara ulaştırılmasını sağlayan altyapıdır. Bu şebekelerin temel amacı, abonelere kesintisiz, güvenilir ve kaliteli elektrik enerjisi sunmaktır. Günümüz koşullarında artan elektrik talebi ve teknolojik gelişmeler, dağıtım şebekelerinin sürekli ve dengeli enerji sağlayabilmesini her zamankinden önemli hale getirmiştir. Nitekim güvenilir bir dağıtım sistemi, minimum kesintiyle sürekli güç sağlamalıdır ki bu da şebekenin performans metriklerinin, örneğin Ortalama Sistem Kesinti Süresi Endeksi (System Average Interruption Duration Index - SAIDI) ve Ortalama Sistem Kesinti Sıklığı Endeksi (System Average Interruption Frequency Index - SAIFI) gibi göstergelerin iyileştirilmesi ve bakım-yatırım planlamalarının bu hedefe göre yapılması gerektiğini gösterir (EPDK, 2020). Bu kapsamda Türkiye'de dağıtım şirketleri, artan talebi karşılamak ve enerji kalitesini stabil tutmak için her yıl şebekeye milyonlarca liralık genişleme, yenileme, bakım ve AR-GE yatırımları yapmaktadır. Amaç, teknik kısıtlar gözetilerek en az maliyetle kapasite artışı ve şebeke iyileştirmelerinin planlanmasıdır. Sonuç olarak Elektrik Dağıtım Şebekesinin sürekliliğini ve kapasitesini arttırmak, modern elektrik sektörünün önemli odak noktalarından biridir (Tör vd., 2018).

Klasik elektrik dağıtım yapıları genellikle radyal beslemeli olup, tek yönlü güç akışı ve elektromekanik kontrollere dayanıyordu. Bu yapının değişken yük taleplerine yavaş tepki vermesi, kesici/ayırıcı gibi ekipmanların mekanik olması ve izleme-otomasyon imkanlarının kısıtlılığı nedeniyle günümüz ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmaktaydı. Bu eksiklikleri gidermek ve artan talepleri kaliteli bir şekilde karşılamak için dağıtım altyapısının yeniden yapılandırılması gereği ortaya çıkmıştır. Literatürde bu dönüşüm, Akıllı Şebeke (Smart Grid) konseptiyle ele alınmaktadır. Akıllı şebekeler, üretim-iletim-dağıtım katmanlarına dijital haberleşme ve otomasyon sistemleri ile entegre edilerek enerji akışını gerçek zamanlı izleyen, hızlı tepki verebilen, verimli ve güvenilir bir sistemin bütünüdür (Dağlı ve Durmuş, 2019; Usta ve Yumak, 2012). Örneğin, akıllı dağıtım şebekelerinde Merkezi Denetim ve Veri Toplama (Supervisory Control and Data Acquisition - SCADA) tabanlı otomasyon, dağıtım yönetim sistemleri ve akıllı röleler sayesinde arızanın tespiti ve izole edilmesi çok daha hızlı gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede şebekede oluşan arıza ve kesintilere karşı kendini iyileştirme (self-healing) yeteneği kazanılarak hem teknik kayıplar azalmakta hem de tüketicilere sunulan hizmetin kalitesi artmaktadır. Nitekim yeni nesil dağıtım otomasyonu ve merkezileştirilmiş kontrol uygulamaları, geniş alanlı koordinasyon ile güvenilirlik ve güç kalitesinde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Akıllı şebeke bileşenleri (akıllı röleler, yeniden kapayıcılar, gerilim regülatörleri, kompanzasyon üniteleri vs.) merkezi bir kontrol ile entegre çalışarak voltaj profilini ve güç akışını optimum düzeyde tutabilmekte, böylece dağıtım şebekesinin kararlı çalışma sınırları genişlemektedir (Glennon vd., 2012; Karakaş ve Duran, 2021).

Güncel araştırmalar, dağıtım şebekelerinin geleceğinde fotovoltaik (photovoltaic - PV) sistemler, enerji depolama üniteleri, rüzgâr türbinleri ve elektrikli araçlar gibi dağıtık üretim kaynaklarının entegrasyonu ile çift yönlü güç akışının etkin yönetiminin önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Elektrik enerjisine yönelik küresel talebin artması, fosil yakıtların çevresel etkileri ve iklim değişikliği gibi faktörler, dağıtım şebekelerinin tasarımı, analizi ve işletimine ilişkin yaklaşımlarda önemli değişimlere neden olmuştur. Geleneksel olarak iletim ağırlıklı merkezi üretim modelinden, dağıtık enerji kaynaklarının dağıtım seviyesinde devreye girdiği daha esnek bir yapıya geçiş söz konusudur. Bu dönüşüm, dağıtım sistemlerinde gerilim kontrolü, koruma koordinasyonu ve kararlılık açısından yeni zorluklar getirmektedir. Literatürde, dağıtım şebekelerine yenilenebilir enerji üretim santrallerinin entegrasyonu ile oluşan güç kalite sorunları ve kararlılık risklerine karşı gelişmiş yöntemler önerilmektedir. Örneğin, PV ve rüzgâr gibi

kaynakların yaygınlaşması, çift yönlü güç akışı ve gerilim dalgalanmalarına yol açabilmekte, bu da gelişmiş koruma algoritmaları, reaktif güç kontrolü ve mikroşebeke yaklaşımlarını gündeme getirmiştir. Dağıtım şebekeleri alanındaki çalışmalar, mevcut şebekenin akıllı sistemlerle iyileştirilmesi, kesinti yönetiminin etkinleştirilmesi ve yenilenebilir kaynakların güvenli entegrasyonu ile şebeke kapasitesinin ve esnekliğinin artırılması üzerinde yoğunlaşmaktadır (Gallegos vd., 2024).

Elektrik enerjisinin kalitesi (güç kalitesi), bir güç sisteminde gerilim, frekans ve dalga şeklinin belirli sınırlar dahilinde olup olmadığını ifade eden bir kavramdır. İdeal koşullarda son kullanıcıya ulaşan gerilim, temel frekanslı sinüzoidal dalga şeklinde ve standart değerinde olmalıdır (Tunçalp ve Sucu, 2006). Güç kalitesinin yüksek olması, özellikle endüstride kullanılan hassas ekipmanların hatasız ve verimli çalışması için kritiktir. Geçmişte üretilen elektrikli cihazlar yapıları gereği dalga şekli bozulmalarına karşı daha toleranslıydı ancak 1950'lerden itibaren güç elektroniği elemanlarının (yarıiletkenlerin) elektrik sistemlerinde kullanılmaya başlamasıyla birlikte enerji kalitesi konusu önem kazanmaya başlamıştır. Modern tesislerde yaygınlaşan doğrusal olmayan yükler (ör. doğrusal olmayan güç elektroniği cihazları, bilgisayarlar, UPS, elektronik ev aletleri vb.), bir yandan çok kaliteli ve kararlı besleme gerilimine ihtiyaç duymakta, diğer yandan da çalışma prensipleri gereği şebekeye harmonik bozulmalar gibi istenmeyen etkiler enjekte etmektedir. Özellikle mikroişlemci tabanlı cihazların yaygın kullanımıyla birlikte, elektrik enerjisinin kalite problemleri gün geçtikçe daha önemli hale gelmiştir. Bu nedenle enerji kalitesinin izlenmesi ve iyileştirilmesi, günümüz elektrik dağıtım sektörünün temel hedeflerinden biri haline gelmiştir (Ünsal ve Tunaboylu, 2009).

Elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulmaların filtrelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu birbiriyle yakından ilişkili konulardır. Harmoniklerin giderilmesi ihtiyacı, yukarıda belirtildiği gibi modern şebekelerdeki doğrusal olmayan yüklerin kaçınılmaz bir sonucudur. Yarıiletken temelli güç elektroniği elemanları, akım ve gerilim dalga şekillerinde temel frekansın katları olan istenmeyen bileşenler (harmonikler) meydana getirir. Bu harmonikler, iletim/dağıtım ekipmanlarında ek kayıplar ve gerilim düşümleri yaratarak sistem performansını olumsuz etkiler. Dolayısıyla güç sistemlerinde harmoniklerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir (Kürker vd., 2018). Literatürde harmoniklerin azaltılmasına yönelik iki temel yaklaşım bulunduğu vurgulanmaktadır. Bunlardan ilki, harmonik oluşturan cihazların tasarım aşamasında bu etkilerin en aza indirileceği şekilde geliştirilmesini esas alır. Bu kapsamda, daha yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanılması veya uygun devre topolojilerinin tercih edilmesi

gibi yöntemler öne çıkar. Diğer yaklaşım ise, oluşan harmoniklerin şebekeye yayılmadan önce filtrelenmesini hedefler. Her ne kadar cihaz düzeyinde alınan önlemler uzun vadede ideal bir çözüm sunsa da uygulamada karşılaşılan pratik sınırlamalar nedeniyle çoğu durumda yeterli olamamaktadır. Bu nedenle, endüstride en yaygın olarak tercih edilen yöntem, harmoniklerin filtreleme yoluyla bastırılmasıdır (Grady ve Santoso, 2001).

Harmonik filtreleme ile reaktif güç kompanzasyonu çoğu uygulamada iç içe geçmiştir. Özellikle alçak gerilim (AG) seviyesinde, yüklerin güç faktörünü düzeltmek için kullanılan kondansatör bankları, şebekede harmonik varsa özel reaktörlerle donatılarak filtreli kompanzasyon haline getirilir. Bu tür panolarda kondansatörlere seri bağlı %5–14 oran aralığındaki reaktörler sayesinde hem istenmeyen rezonanslar önlenir hem de kondansatörlerin belirli yüksek harmonikleri süzmesi sağlanır. Harmonikli sistemlerde geleneksel kompanzasyon yöntemlerinin doğrudan uygulanması sakıncalı olabileceğinden, tasarımcılar ilgili baradaki toplam harmonik distorsiyon (THD) seviyesine göre uygun tipte pasif veya aktif filtre eklemeyi zorunlu görmektedir. Örneğin, bir tesiste THD belirli bir eşiğin üzerindeyse (genellikle %5), yalnız kondansatörlü kompanzasyon yerine reaktörlü kondansatör + aktif filtre kombinasyonu önerilmektedir. Erdinç tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu bir dağıtım sisteminde güç faktörü düzeltmesinin, harmonik varlığında klasik durumdan farklı olduğu vurgulanmıştır (Erdinç, 2020). Harmonikli sistemlerde kompanzasyon yapılırken öncelikle harmonik filtrasyonunun sağlanması, ardından reaktif gücün dengelenmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu gibi entegre yaklaşımlarla ilgili literatürde pek çok çalışma mevcuttur. Örneğin, Wang vd., endüstriyel bir dağıtım şebekesinde harmonik bastırma ile dinamik reaktif güç kompanzasyonunu bir arada gerçekleştiren entegre bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntem ile hem harmonik akımların azaltılıp hem de gerilim profilinin anlık olarak desteklenebildiğini göstermişlerdir (Wang vd., 2022). Güncel güç sistemlerinde harmonik filtrasyonu ve kompanzasyon sistemleri birlikte düşünülmekte, şebeke kararlılığını bozmadan harmonikleri yok eden ve aynı anda ihtiyaç duyulan reaktif gücü sağlayan akıllı cihazlar üzerine araştırmalar yoğunlaşmaktadır.

FACTS, iletim şebekelerinin kapasitesini ve kararlılığını artırmak, güç akışlarını kontrol etmek ve gerilim desteği sağlamak amacıyla kullanılan güç elektroniği tabanlı cihazlar ailesidir. Bu kavram ilk olarak Hingorani tarafından ortaya atılmış ve geleneksel yavaş tepki veren mekanik kontrol elemanlarının yerini, daha hızlı ve güvenilir yarıiletken tabanlı güç elektroniği kontrolörlerin alması fikrine dayanmaktadır (Hingorani, 2007). FACTS cihazları, iletim sistemlerinde yeni iletim hattı inşa etmeden

mevcut hatların güç transfer kapasitesini en üst düzeye çıkarmak ve güç akışlarını istenen güzergâhlara yönlendirmek için kullanılmaktadır. Temel iki amacı bulunan bu sistemleri, iletim hatlarında daha fazla güç taşıma (termal limite yaklaştırma) ve belirli hatlardaki yük akışını kontrol ederek şebekeye işletme esnekliği sağlama şeklinde özetlenebilir (Ertay ve Erdoğan, 2012). Örneğin, bir FACTS düzenlemesi sayesinde paralel hatlar arasındaki yük dağılımı denetlenerek, bazı hatların aşırı yüklenmesi engellenip güç yoğunluğu daha uygun koridorlara yönlendirilebilir. Aynı şekilde, büyük bir iletim hattının empedansını anlık değiştirebilen cihazlar ile (örneğin seri kompanzatörler) hat akımı kontrol edilerek sistem kararlılığı korunabilir. Son yıllarda, artan yenilenebilir enerji entegrasyonu ve değişken güç akışları nedeniyle FACTS teknolojilerine ilgi daha da artmıştır. Bu cihazların gerilim regülasyonu, güç salınımlarını sönümleme ve geçici hal kararlılığını iyileştirme gibi dinamik faydaları literatürde geniş biçimde incelenmiştir. Abido ve diğer araştırmacıların çalışmaları, FACTS uygulamalarının uygun kontrol stratejileriyle güç sistemi salınımlarını etkin bir şekilde sönümleyerek sistemin kararlı çalışma sınırlarını artırabildiğini ortaya koymuştur (Abido, 2009).

Statik VAr Kompanzatörler (Static VAr Compensator - SVC) 1980'lerden beri dünya genelinde gerilim kontrolü ve kararlılık desteği için yaygın olarak kullanılmıştır. Konverter tabanlı FACTS cihazları ise, Gerilim Kaynaklı Çevirici (Voltage Source Converter - VSC) teknolojisini kullanarak AC şebekeye istenilen faz ve genlikte gerilim enjekte ederler veya çekerler. Bu gruptaki en bilinen örnek Statik Senkron Kompanzatör (Static Synchronous Compensator - STATCOM) cihazıdır. STATCOM, güç elektroniği dönüştürücüsü aracılığıyla şebekeye hızlı bir şekilde kapasitif veya endüktif reaktif güç verebilen/çekebilen bir şönt kompanzasyon cihazıdır. Geleneksel SVC'ye kıyasla STATCOM'lar düşük gerilimlerde dahi tam kapasite reaktif destek sağlayabilir ve çıkışı sürekli ayarlanabilir olduğundan küçük gerilim dalgalanmalarını dahi düzeltebilir. Bu özellikleriyle STATCOM'lar, dağıtım şebekelerinde dahi voltaj dalgalanmalarını ve flicker problemlerini çözmek üzere kullanılmaya başlanmıştır. Seri FACTS cihazlarına örnek olarak Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (Thyristor-Controlled Series Capacitor - TCSC) verilebilir. Bu cihaz hat iletkenlerine seri bağlı kapasiteyi tristörlerle kısmi olarak devreye sokarak hat empedansını dinamik olarak değiştirir. TCSC, güç akışını ayarlamak ve hat akımı limitlerini kontrol etmek için kullanılır. Daha gelişmiş bir FACTS cihazı olan Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (Unified Power Flow Controller - UPFC) ise, aynı anda hem seri hem şönt konverterleri içeren ve hem gerilim kontrolü hem de güç akışı kontrolünü birlikte yapabilen bir sistemdir. UPFC, iletim sistemlerinde eşzamanlı

gerilim desteği, güç akışı yönlendirmesi ve hatta gerektiğinde aktif güç transferi sağlayabilen en esnek fakat en kompleks FACTS çözümü olarak literatürde tanımlanmaktadır (Çifci, 2015).

FACTS kullanımının elektrik şebekelerine somut katkıları hakkında hazırlanan, Fırat Enerji İletim Hattı üzerinde bir STATCOM uygulamasının incelendiği bir çalışmada, ağır yük koşullarında baranın gerilimini kararlı tutmak için STATCOM'un etkin bir çözüm olduğu sunulmuştur (Kayar ve Carlak, 2019). Benzer şekilde 400 kV'luk bir şebekede gerçekleştirilen bir TCSC uygulamasının, güç salınımlarını etkin biçimde sönümleyebildiği ve güç aktarım kapasitesini %10'un üzerinde artırabildiği gösterilmiştir (Kayar vd., 2022). Uluslararası düzeyde yapılan çalışmalar, FACTS teknolojilerinin, mevcut iletim hatlarından daha fazla güç aktarımı sağlama, sistem kararlılığını artırma ve şebeke operatörlerine esneklik kazandırma yönündeki etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle SVC, STATCOM ve TCSC gibi FACTS cihazlarının; reaktif güç desteği sağlama, voltaj regülasyonunu iyileştirme ve iletim sistemlerinde dinamik kararlılığı artırma kabiliyetleri sıklıkla vurgulanmaktadır (Carbonara vd., 2024; Rasheed vd., 2025). Literatürdeki pek çok çalışma, yeni iletim hattı yatırımı yerine bu cihazların stratejik noktalara yerleştirilmesinin hem ekonomik hem de teknik açıdan avantaj sağladığını ortaya koymaktadır (Mohit ve Pawar, 2023; Gui et al., 2024).

Elektrik dağıtım şebekelerinde gerilim profilinin iyileştirilmesi ve güç kalitesinin artırılması amacıyla FACTS cihazlarının kullanımı son yıllarda yoğun olarak araştırılmaktadır. Özellikle STATCOM ve dağıtım seviyesine uyarlanmış şekliyle D-STATCOM, dağıtım şebekelerinde gerilim kontrolü ve reaktif güç desteği için öne çıkan FACTS elemanlarıdır. Yapılan güncel çalışmalar, STATCOM ve benzeri FACTS cihazlarının dağıtım şebekelerinde anlık gerilim regülasyonunda çok etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde 2020 sonrası birçok çalışma, D-STATCOM'un dağıtım sistemlerinde farklı senaryolardaki faydalarını rapor etmiştir. Örneğin, 33 kV'luk bir dağıtım sisteminde en düşük gerilimli bara tespit edilip oraya D-STATCOM yerleştirildiğinde, tüm düğüm gerilimlerinin kabul edilebilir aralığa çekildiği vurgulanmıştır (Iwuogu vd., 2022). D-STATCOM'un konum ve boyut optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalar, cihazın doğru yerde ve yeterli kapasitede kullanılmasının şebekede gerilim ihlallerini ortadan kaldırdığını ve güç kayıplarını en aza indirdiğini göstermektedir (Bolaños vd., 2025). Isha ve Jagatheeswari ise yapay zekâ tabanlı bir yöntemle D-STATCOM ve PV üretim birimlerinin optimal yerleşimini yaparak dağıtım

şebekesinde gerilim profilini iyileştirme, güç kayıplarını azaltma ve sistem kararlılığını artırma hedeflerine başarıyla ulaşıldığını bildirmiştir (Isha ve Jagatheeswari, 2021).

D-STATCOM cihazları, dağıtım şebekelerinde gerilim dengesizliğini düzeltmek, harmonik bozulmaları azaltmak ve reaktif güç kompanzasyonu sağlamak amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. Hingorani ve Gyugyi, FACTS cihazları üzerine yaptıkları çalışmada, D-STATCOM'un temel prensiplerini açıklamış ve dağıtım sistemlerinde sunduğu avantajlara dikkat çekmiştir (Hingorani ve Gyugyi, 2000). Bununla birlikte, El-Moursi ve Sharaf gibi araştırmacılar, D-STATCOM'un kontrol stratejilerini geliştirerek cihazın dinamik performansını artırmaya yönelik çeşitli algoritmalar önermiştir (El-Moursi ve Sharaf, 2005). Ayrıca, Hatziargyriou vd., D-STATCOM'un çeşitli kontrol topolojilerine göre güç kalitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı bir analizle değerlendirmiştir (Hatziargyriou vd., 2008). Bu ve benzeri çalışmalar, D-STATCOM'un dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu ve güç kalitesi için vazgeçilmez bir teknoloji haline geldiğini ortaya koymaktadır. D-STATCOM, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim regülasyonu ve harmonik filtreleme gibi birden fazla işlevi aynı anda gerçekleştirebilmesi sayesinde, dağıtım şebekelerinde dinamik reaktif güç desteği alanında öncü bir teknoloji olarak değerlendirilmektedir (Wang vd., 2022). Ayrıca, D-STATCOM'un gelişmiş kontrol yetenekleri sayesinde dağıtım sistemlerinde güç kalitesi problemlerini çözmenin yanı sıra yenilenebilir enerji entegrasyonundan kaynaklanan gerilim dalgalanmalarını da etkin bir şekilde yönettiği rapor edilmektedir.

1.2. Tezin İçeriği ve Amacı

Elektrik dağıtım şebekeleri, özellikle uzun ve dallanmış yapıya sahip dal-budak (radyal) konfigürasyonlar, tarımsal sulama gibi endüktif karakteri baskın motor yüklerinin yoğun olduğu kırsal bölgelerde ciddi güç kalitesi sorunları ile karşı karşıyadır. Bu şebekelerde, hat empedansının yüksekliği ve motorların kalkış anında çektiği demeraj (kalkınma) akımları gibi faktörler, standart toleransları aşan gerilim düşümlerine, düşük güç faktörüne ve sistem kararlılığının zayıflamasına neden olmaktadır. Geleneksel kompanzasyon yöntemleri ise yavaş tepki süreleri nedeniyle bu tür dinamik ve ani yük değişimlerine karşı etkili bir çözüm sunmakta yetersiz kalmaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, D-STATCOM olarak bilinen modern bir FACTS cihazının, bu tip zorlu koşullara sahip dağıtım şebekelerindeki gerilim profilini iyileştirme ve güç faktörünü düzeltmedeki etkinliğini simülasyon tabanlı bir yaklaşımla kapsamlı bir şekilde analiz etmektir. Çalışma, D-STATCOM'un milisaniyeler

mertebesindeki hızlı reaktif güç kontrol kabiliyeti sayesinde, ani ve büyük yük değişimlerinin neden olduğu gerilim dalgalanmalarını etkin bir şekilde sönümleyebildiğini ve sistem kararlılığını geleneksel yöntemlere kıyasla üstün bir performansla sağlayabildiğini göstermeyi hedeflemektedir.

Bu amaç doğrultusunda, tez kapsamında DIgSILENT PowerFactory (DIgSILENT GmbH, 2024) simülasyon yazılımı kullanılarak, tarımsal sulama faaliyetlerinin yoğun olduğu tipik bir kırsal dağıtım şebekesi modellenmiştir. Tezin içeriği, bu model üzerinde gerçekleştirilen karşılaştırmalı dinamik simülasyonları kapsamaktadır. Bu simülasyonlarda, motorların kademeli olarak devreye alınması (yol alma) ve devreden çıkarılması (yük reddi) gibi geçici rejim olayları incelenmiş ve sistemin D-STATCOM devredeyken ve devre dışıyken sergilediği davranışlar karşılaştırılarak cihazın performansı nicel olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, D-STATCOM'un şebeke üzerindeki optimal yerleşim noktasının belirlenmesine yönelik bir duyarlılık analizi de gerçekleştirilerek, cihazdan maksimum faydanın nasıl elde edilebileceği araştırılmıştır.

1.3. Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması, Giriş, Genel Bilgiler, Materyal ve Yöntem, Araştırma Bulguları ve Tartışma ile Sonuç ve Öneriler bölümlerinden oluşmaktadır.

Giriş bölümünde, elektrik dağıtım şebekelerinde, özellikle radyal hatlarda karşılaşılan güç kalitesi sorunları ve gerilim düşümü problemi tanımlanmakta; bu bağlamda reaktif güç kompanzasyonunun önemi vurgulanmaktadır. Ayrıca D-STATCOM modern bir çözüm olarak sunulmakta, kapsamlı literatür taraması ile çalışmanın mevcut bilgi birikimi içindeki yeri belirlenmekte ve tezin amacı ile kapsamı net bir biçimde ortaya konulmaktadır.

Genel Bilgiler bölümünde, tezin teorik altyapısı sunulmaktadır. Bu kapsamda dağıtım şebekesi topolojileri, özellikle dal-budak yapılar, güç kalitesi parametreleri, harmonikler ve reaktif güç kompanzasyonunun temel prensipleri ayrıntılı olarak ele alınmaktadır. Bölümün devamında, FACTS teknolojisinin temelleri ile STATCOM gibi paralel bağlı cihazların genel prensipleri incelenmekte ve çalışmanın teorik çerçevesi oluşturulmaktadır.

Materyal ve Yöntem bölümünde, çalışmanın metodolojik çerçevesi detaylandırılmaktadır. Bu bölümde DIgSILENT PowerFactory yazılımında modellenen dal-budak dağıtım şebekesinin yapısı, bileşenleri ve parametreleri sunulmaktadır. Ardından, çalışmanın odak noktasını oluşturan D-STATCOM'un çalışma prensibi,

avantajları, literatürdeki yeri, modellemesi ve kontrol bloğu algoritması açıklanmaktadır. Ayrıca sistemin dinamik davranışını incelemek için oluşturulan simülasyon senaryoları ve metodolojik adımlar tanımlanmaktadır.

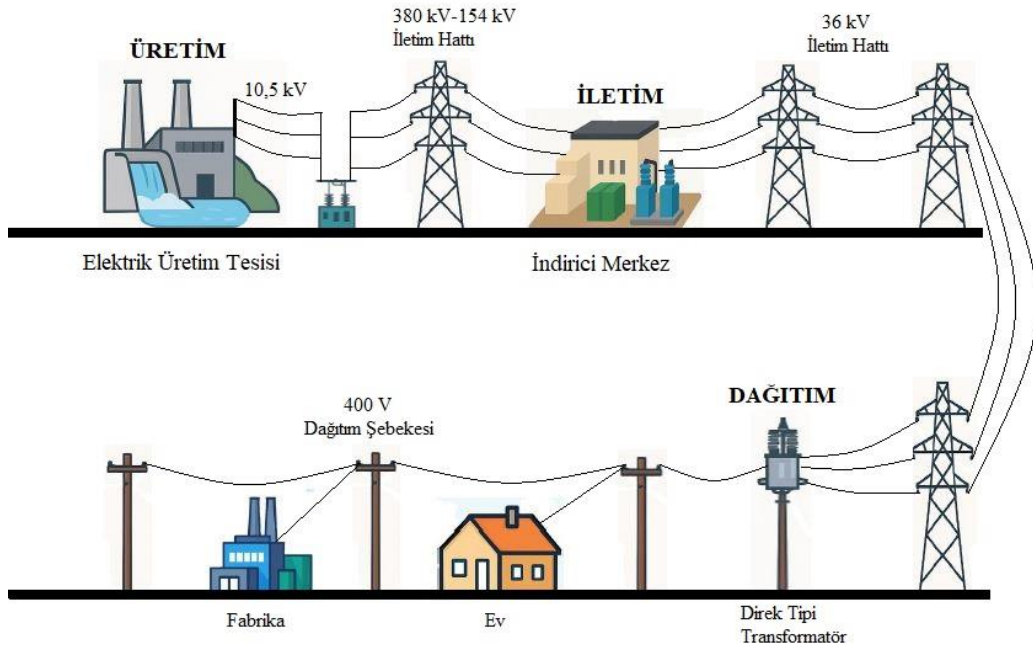
Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde, tezin özgün katkıları ortaya konulmaktadır. İlk olarak D-STATCOM'un optimum bağlantı noktasının belirlenmesine yönelik duyarlılık analizi sonuçları sunulmaktadır. Daha sonra D-STATCOM'un devrede olduğu ve olmadığı durumlara ilişkin karşılaştırmalı dinamik simülasyon sonuçları, grafikler ve tablolarla desteklenerek açıklanmaktadır. Motorların devreye alınması ve devreden çıkarılması gibi geçici rejim olayları sırasında sistemin gerilim profili, akım ve güç faktörü üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmekte ve bulgular literatürdeki çalışmalarla ilişkilendirilerek tartışılmaktadır.

Sonuç ve Öneriler bölümünde ise, araştırma bulguları özetlenmekte; tezin başlangıcında ortaya konulan amaçlar doğrultusunda genel bir değerlendirme yapılmaktadır. D-STATCOM uygulamasının etkinliğine dair ulaşılan sonuçlar vurgulanmakta ve bu alanda gelecekte gerçekleştirilebilecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Elektrik Dağıtım Şebekeleri

Modern toplumların temel altyapısını oluşturan elektrik güç sistemleri, enerjinin üretildiği santrallerden nihai tüketim noktalarına ulaştırılmasına kadar uzanan karmaşık ve bütünsel bir yapıya sahiptir. Bu süreç, temel olarak üç ana fonksiyonel aşamada gerçekleşir: Üretim, iletim ve dağıtım. Enerji, genellikle yerleşim merkezlerinden uzakta konumlandırılmış olan, Türkiye Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) veya gerçek/tüzel kişiliklere ait hidroelektrik, termik veya yenilenebilir enerji santrallerinde üretilir. Üretilen bu enerjinin, uzun mesafeler boyunca minimum kayıpla taşınabilmesi amacıyla yüksek gerilim (YG) seviyelerine çıkartılarak, Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından işletilen YG hatları (380 kV-154 kV) ile enterkonnekte şebekeye iletilir ve Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) ile senkronize çalışan Elektrik Dağıtım Şirketleri aracılığı ile (34,5 kV-0,4 kV) YG seviyesinden AG seviyelerine düşürülerek nihai tüketicilere sunulur. Bu sürecin tamamı, Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim sistemi

Dağıtım şebekeleri, bu sürecin son ve en kritik halkasını oluşturur. İletim sisteminden gelen yüksek gerilimli enerjiyi, dağıtım transformatörleri vasıtasıyla orta

(OG) ve AG seviyelerine indirgeyerek konut, ticari ve endüstriyel tüketicilere güvenli bir şekilde ulaştırır. Türkiye’de 21. yüzyılın başlarından itibaren yaşanan özelleştirme süreci ve teknolojik gelişmelerle birlikte, dağıtım şebekeleri salt bir enerji taşıma altyapısı olmanın ötesinde, dinamik ve akıllı sistemlere evrilmektedir. Günümüzde bu şebekelerin modernizasyonu; enerji kalitesinin ve verimliliğinin artırılması, SCADA ve otomasyon sistemleri gibi teknolojik altyapıların entegrasyonu, yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme dahil edilmesi ve harmonik bozulmaların önlenmesi gibi çok disiplinli çalışmaları kapsamaktadır. Özellikle bu tez çalışmasının da odaklandığı gibi, tarımsal sulama faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerde, endüktif karakterli motor yüklerinden kaynaklanan gerilim düşümleri ve reaktif güç yönetimi gibi güç kalitesi sorunları, öncelikli araştırma ve geliştirme konuları arasında yer almaktadır.

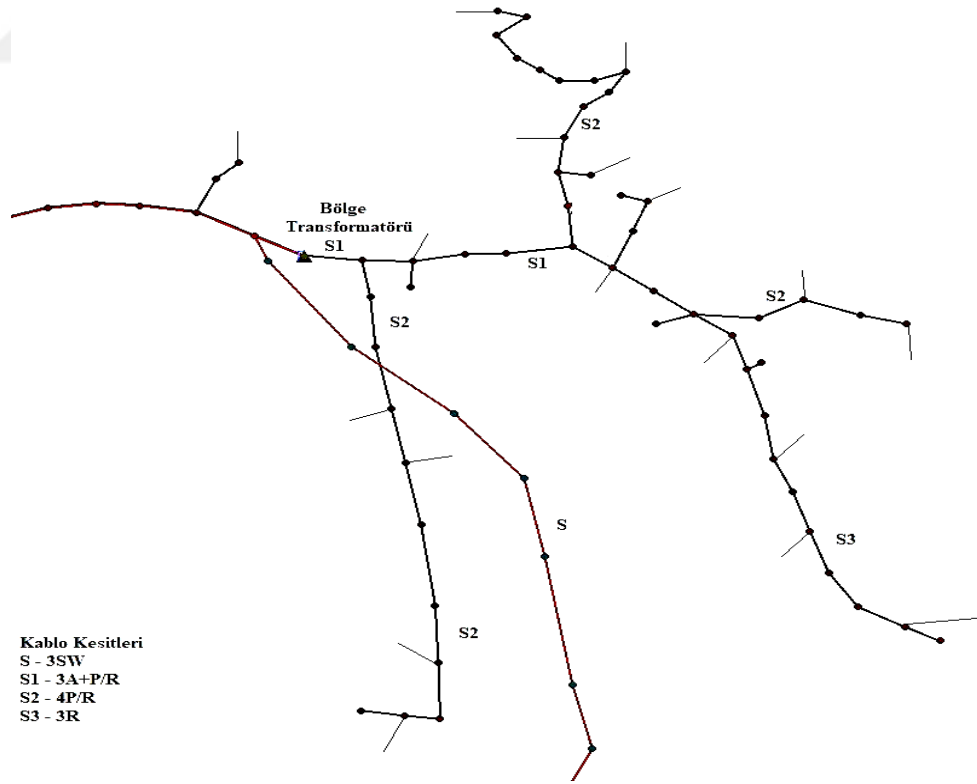
Enerjinin son kullanıcıya verimli, güvenli ve sürdürülebilir bir biçimde ulaştırılması, büyük ölçüde dağıtım sisteminin topolojik tasarımına bağlıdır. Şebeke konfigürasyonu; hizmet verilecek bölgenin yük yoğunluğu, coğrafi yapısı, talep edilen güvenilirlik seviyesi ve ekonomik faktörler göz önünde bulundurularak belirlenir. Bu bağlamda, dağıtım sistemleri temel olarak dört ana topolojik yapı altında incelenmektedir:

- Enterkonnekte şebeke
- Dal-budak (Dallı, Radyal) şebeke
- Ring şebeke
- Ağ gözlü şebeke

2.1.1. Enterkonnekte Şebeke

Enterkonnekte sistem, bir ülkenin veya bölgenin tüm üretim santrallerini, iletim hatlarını ve dağıtım ağlarını birbirine bağlayan büyük ölçekli bir elektrik şebekesidir. Bu sistemin genel yapısı Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmektedir. Temel amacı, farklı bölgeler arasında güç transferi sağlayarak enerji arz güvenliğini artırmak, kesintileri en aza indirmek ve kaynakları verimli kullanmaktır. Türkiye’nin TEİAŞ tarafından yönetilen ulusal şebekesi de bu yapıdadır ve Avrupa (ENTSO-E) ile komşu ülkelere entegredir. Bu sistemler, arz-talep dengesini sağlamanın yanı sıra, yenilenebilir kaynakların entegrasyonunu kolaylaştırır ve elektrik ticaretine olanak tanır. Bununla birlikte, karmaşık yapısı, yüksek yatırım maliyetleri ve geniş çaplı arıza (blackout) riski gibi dezavantajları da bulunur.

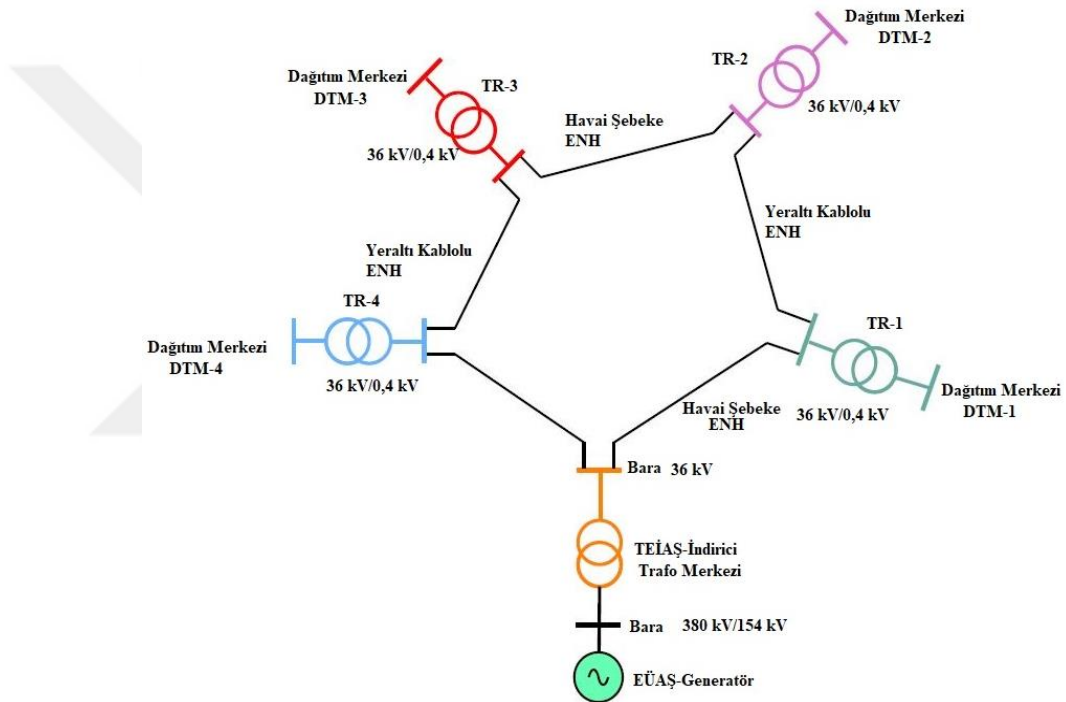
Güvenilirlik sorunlarının yanı sıra, dal-budak şebekelerin en karakteristik problemlerinden bir diğeri de güç kalitesi, özellikle de gerilim regülasyonudur. Besleme noktasından uzaklaştıkça, hattın kümülatif empedansı ve üzerinden geçen yük akımının artması nedeniyle gerilim düşümü belirginleşir. Hattın sonundaki tüketiciler, kaynaktaki nominal gerilim değerinin oldukça altında bir gerilime maruz kalabilirler. Özellikle bu tez çalışmasının da odaklandığı gibi, tarımsal sulama gibi yüksek kalkış akımı ve endüktif reaktif güç çeken motorların yoğun olduğu uzun kırsal hatlarda, bu gerilim düşümü standart toleransların ($\pm 5\%$) dışına çıkarak kritik seviyelere ulaşabilir. Bu durum, hassas elektronik cihazların arızalanmasına, motorların verimsiz çalışmasına ve hatta hasar görmesine yol açabilir. Son olarak, dal-budak şebekeler sınırlı esneklik ve ölçeklenebilirlik sunar. Artan enerji talebi veya bölgeye yeni abonelerin eklenmesi, mevcut hatların ve transformatörlerin aşırı yüklenmesine neden olabilir. Şebekenin kapasitesini artırmak, genellikle mevcut hatların kesitini artırmayı veya yeni bir fider inşa etmeyi gerektirir ki bu da maliyetli ve zaman alıcı bir süreçtir. Bu kısıtlar, dal-budak şebekelerde gerilim kararlılığını ve güç kalitesini sağlamak için modern ve dinamik kompanzasyon çözümlerinin önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.3. Dal-budak (dallı, radyal) şebeke modeli

2.1.3. Ring (Halka) Şebeke

Ring şebeke, özellikle enerji kesintisinin tolere edilemediği büyük şehirler, sanayi bölgeleri ve hastaneler gibi kritik alanlarda kullanılan bir dağıtım sistemi tipidir. Bu yapıda, birden fazla besleme noktası (transformatör) kapalı bir halka oluşturacak şekilde birbirine bağlanır (Şekil 2.4). Bu çift yönlü besleme imkânı sayesinde, hattın bir noktasında arıza meydana geldiğinde enerjinin diğer yönden sağlanması mümkün olur, böylece kesinti riski minimize edilir ve hizmet sürekliliği artar. Ayrıca, dal-budak şebekelere kıyasla daha dengeli bir gerilim profili sunar. Ancak, gerektirdiği ek iletken ve ekipmanlar nedeniyle kurulum maliyeti dal-budak şebekelere göre oldukça yüksektir.

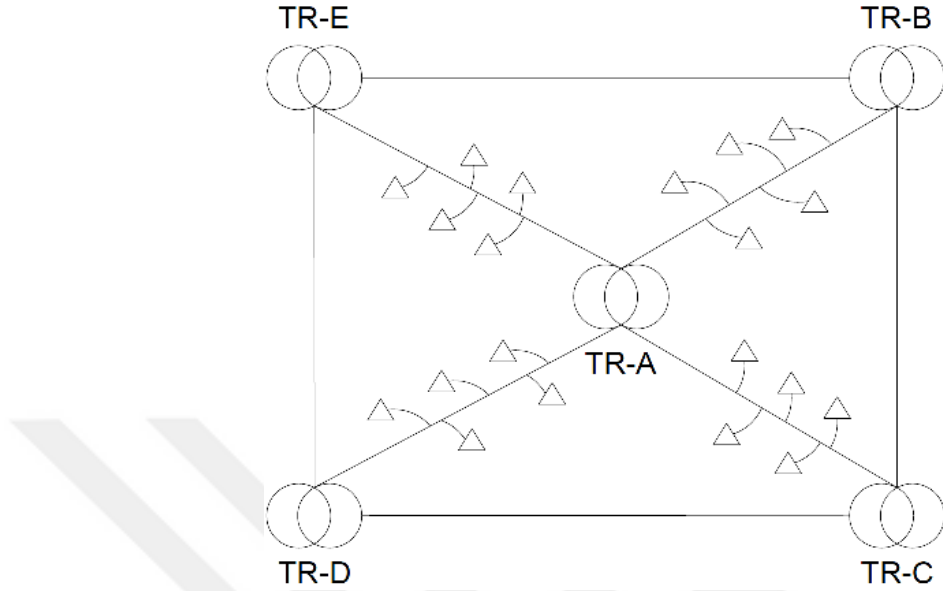


Şekil 2.4. Ring (halka) şebeke modeli

2.1.4. Ağ (Gözlü) Şebekeler

Ağ (gözlü) şebekeler, çok sayıda besleme noktasının ve hattın birbirine birden fazla yoldan bağlandığı en karmaşık ve en güvenilir dağıtım topolojisidir (Şekil 2.5). Bu yapı sayesinde, herhangi bir hat veya transformatör arızalandığında enerji, sistemdeki alternatif yollar üzerinden yüklere kesintisiz olarak iletilebilir. Ayrıca, yüklerin birden fazla kaynak arasında dengelenmesi, gerilim düşümlerini ve aşırı yüklenme riskini minimize eder. Ancak, bu üst düzey güvenilirlik ve esnekliğin bedeli oldukça yüksektir. Yüksek kurulum maliyetleri, işletim için gelişmiş otomasyon (SCADA) sistemlerine

duyulan ihtiyaç ve yüksek kısa devre akımlarının yönetilmesindeki zorluklar, bu şebekelerin genellikle sadece metropoller ve kritik endüstriyel bölgeler gibi yoğun ve stratejik alanlarla sınırlı kalmasına neden olur.



Şekil 2.5. Ağ Gözlü şebeke modeli

2.2. Elektrik Enerjisinin Kalitesi (Güç Kalitesi)

Güç kalitesi, bir elektrik şebekesinde gerilim, frekans ve dalga şeklinin nominal değerlerden sapma derecesini ifade eden kritik bir performans parametresidir. İdeal sinüzoidal formdan uzaklaşan veya genliği ve frekansı kararsız olan bir enerji, özellikle hassas endüstriyel ekipmanlar, tıbbi cihazlar ve modern elektronik sistemler için ciddi riskler teşkil eder. Düşük güç kalitesi; üretim süreçlerinde verimsizliğe, makine arızalarına ve doğrudan finansal kayıplara yol açarak hem işletmeler hem de ulusal ekonomi için stratejik bir sorun haline gelmektedir (Eroğlu, 2009). Nitekim, enerji kalitesi problemlerinin endüstriyel alandaki ekonomik etkisinin, bu sorunları giderme maliyetinden katbekat yüksek olduğu rapor edilmektedir (Chapman, 2001).

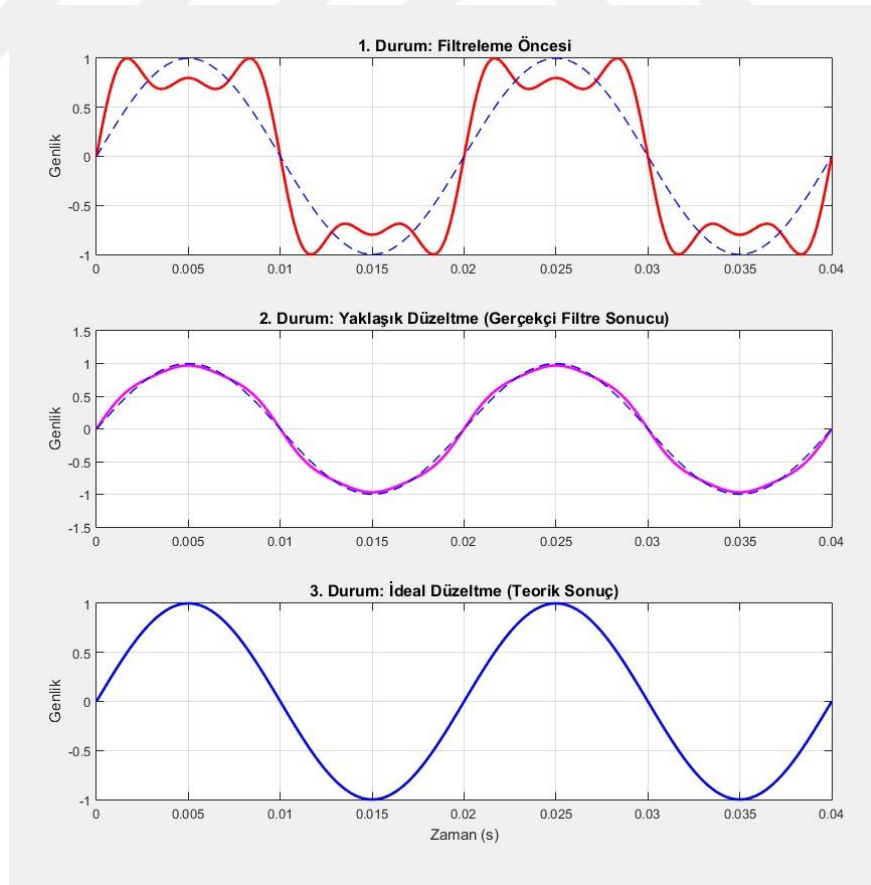
Güç kalitesindeki bozulmalar, enerjinin üretim noktasından tüketim noktasına kadar katettiği uzun iletim ve dağıtım yolları boyunca maruz kaldığı çeşitli etkenlerden kaynaklanır. Bu etkenler arasında; ani yük değişimlerinin neden olduğu gerilim dalgalanmaları (voltaj sarkmaları/yükselmeleri), voltaj dengesizlikleri, frekans sapmaları ve doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik bozulmalar gibi temel sorunlar bulunmaktadır (Borhan, 2006). Her ne kadar şebeke modernizasyonu ve akıllı şebeke uygulamaları ile kentsel alanlarda önemli iyileştirmeler sağlansa da (Uyanık, 2020),

özellikle uzun dağıtım hatlarına sahip kırsal ve tarımsal bölgelerde bu problemler varlığını sürdürmektedir.

Bu bağlamda, güç kalitesinin kabul edilebilir sınırlar içinde tutulması, şebekenin sürekli izlenmesini, gerilim regülasyonunu ve bu tez çalışmasının da odaklandığı reaktif güç kompanzasyonu gibi ileri mühendislik çözümlerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu yöntemlerin etkin bir şekilde uygulanması, yalnızca ekipman arızalarını önlemekle kalmaz, aynı zamanda enerji verimliliğini artırarak sistemin genel performansını ve güvenilirliğini de iyileştirir.

2.3. Harmonikler

Güç kalitesinin en önemli göstergelerinden biri olan gerilim ve akım dalga şeklinin ideal sinüzoidal formdan sapması, harmonik bozulma (distorsiyon) olarak tanımlanır. Harmonikler, şebekenin 50 Hz olan temel frekansının tam katlarındaki frekanslarda (örneğin, 3. harmonik 150 Hz, 5. harmonik 250 Hz) ortaya çıkan istenmeyen sinüzoidal bileşenlerdir. Bu bileşenler, temel dalga formuna eklenerek dalga şeklini bozar ve güç kalitesini önemli ölçüde düşürür (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Sinüs eğrisinde oluşan harmonik etki-tepki grafikleri

Harmoniklerin temel kaynağı, akım-gerilim ilişkisi doğrusal olmayan yüklerdir. Özellikle güç elektroniği tabanlı sistemlerin (doğrultucular, değişken frekanslı motor sürücüler, kesintisiz güç kaynakları), LED aydınlatmaların ve ark fırınlarının modern güç sistemlerinde yaygınlaşması, harmonik bozulma sorununu günümüzün en önemli güç kalitesi zorluklarından biri haline getirmiştir (Eroğlu, 2009). Bu sistemlerin oluşturduğu harmonikler, iletim ve dağıtım ağlarında ısı artışı, rezonans koşulları ve gerilim dalga formunun bozulmasına neden olarak ekipmanların ömrünü kısaltmakta ve enerji verimliliğini azaltmaktadır (Bouzid et al., 2015; Rönnberg et al., 2017)

Harmoniklerin güç sistemleri üzerindeki etkileri çok yönlü ve yıkıcıdır. Bu etkiler arasında iletkenlerde ve transformatörlerde aşırı ısınmaya yol açan ek kayıplar, kompanzasyon sistemlerinde rezonans riski, koruma rölelerinin hatalı çalışması, ölçüm cihazlarında yanlış okumalar ve hassas elektronik cihazlarda arızalar bulunmaktadır. Bu periyodik ancak sinüzoidal olmayan dalga formlarının analizi, Fourier serisi tekniği ile gerçekleştirilir. Bu matematiksel yöntem, bozulmuş bir dalga şeklini, temel bileşen ile onun tam katı frekanslarındaki sinüzoidal harmonik bileşenlerin toplamı olarak ifade etmeye olanak tanır (Baş, 2014). Pratikte harmonik analizi, her bir harmonik bileşenin genliğini ve faz açısını belirleyerek, harmonik filtre tasarımı ve güç kalitesi standartlarına uygunluğun denetlenmesi için temel bir araç olarak kullanılır. Bu sorunların çözümü için tasarlanan harmonik filtreler, sistem güvenilirliğini ve kararlılığını artırmada kritik bir rol oynar.

2.4. Reaktif Güç Yönetimi ve Kompanzasyon Sistemleri

Elektrik güç sistemleri, temelde iki tür güç bileşeni taşır: İşe dönüşen aktif güç (P) ve manyetik alanların oluşumu için gerekli olan reaktif güç (Q). Asenkron motorlar ve transformatörler gibi endüktif yükler, çalışmaları için şebekeden reaktif güç talep ederler (Soydal, 1986). Bu reaktif güç, aktif gücün aksine faydalı işe dönüştürülmez ancak sistemde dolaşarak iletim ve dağıtım hatlarında ek akım yükü oluşturur. Bu durum, sistemin görünen gücünü (S) artırarak güç faktörünü ($\cos\phi$) düşürür, bu da hat kayıplarının artmasına, gerilim düşümlerinin belirginleşmesine ve genel sistem verimliliğinin azalmasına neden olur (Vural, 2003; Atmaca, 2020). Güç sistemlerinin verimli ve kararlı çalışabilmesi için reaktif gücün etkin bir şekilde yönetilmesi ve dengelenmesi zorunludur.

Bu yönetim, reaktif güç kompanzasyonu olarak bilinen mühendislik uygulamalarıyla sağlanır. Kompanzasyonun temel prensibi, endüktif yüklerin ihtiyaç

duyduğu reaktif gücü şebekeden çekmek yerine, yüke en yakın noktada kapasitif kompanzasyon elemanları aracılığıyla yerel olarak üretmektir (Engin, 2008). Başarılı bir kompanzasyon uygulaması, güç faktörünü ideale (1'e) yaklaştırarak şebeke kapasitesini artırır, enerji kayıplarını minimize eder ve gerilim profilini iyileştirir.

2.4.1. Kompanzasyon Yöntemlerinin Gelişimi ve Sınırlılıkları

Kompanzasyon sistemleri, teknolojik gelişimlerine paralel olarak statik ve dinamik çözümler olarak iki ana kategoride incelenebilir: Geleneksel (Statik) Yöntemler ve Modern (Dinamik) Yöntemler.

Geleneksel (statik) yöntemler, genellikle sabit veya mekanik anahtarlama (kademeli kontrollü) kondansatör gruplarına dayanır. Sabit kompanzasyon, sürekli çalışan yükler için ekonomik bir çözüm sunarken (Kocabaş, 2006), otomatik kompanzasyon sistemleri, yük profilindeki yavaş değişimlere bir reaktif güç rölesi aracılığıyla kademeli olarak yanıt verir (Balaman, 2012). Ancak bu geleneksel sistemlerin en temel zafiyeti, kontaktörlerin mekanik yapısından kaynaklanan yavaş tepki süreleridir. Ark fırınları, kaynak makineleri veya bu tezde incelenen büyük motorların kalkış anları gibi hızlı ve dinamik yük değişimlerine anlık cevap veremezler. Bu durum, geçici gerilim düşüşlerine ve güç kalitesi sorunlarına yol açar. Ayrıca, sistemde doğrusal olmayan yüklerin varlığında, bu kondansatör bankları şebeke empedansı ile rezonansa girerek harmonik bozulmaları şiddetlendirebilir (Şerbetçi, 2019).

Geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı dinamik koşullar için güç elektroniği tabanlı modern (dinamik) çözümler geliştirilmiştir. Genel olarak FACTS cihazları olarak bilinen bu teknolojiler, milisaniyeler mertebesinde tepki süreleri sunar (Ersamut, 2009). Bu ailedeki SVC ve daha gelişmiş bir teknoloji olan STATCOM, reaktif gücü anlık olarak kontrol ederek hem gerilim regülasyonu hem de güç faktörü düzeltmesi sağlar (Kara ve Yalçınöz, 2005). Özellikle STATCOM, IGBT gibi modern yarı iletkenler sayesinde SVC'ye kıyasla daha hızlı tepki, daha geniş bir operasyon aralığı ve düşük gerilim seviyelerinde dahi üstün performans sunar. Aynı zamanda, modern kontrol algoritmalarıyla harmonik filtreleme gibi ek fonksiyonları da yerine getirebilir (Koyuncu, 2012). Bu tez çalışmasının konusunu oluşturan D-STATCOM, STATCOM teknolojisinin dağıtım şebekelerine uyarlanmış versiyonudur.

2.4.2. Türkiye’deki Kompanzasyon Mevzuatı ve Uygulamaları

Türkiye’deki elektrik şebekelerinin verimli işletilmesi, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan yönetmeliklerle yasal bir zorunluluk haline getirilmiştir. EPDK yönetmelikleri, belirli bir kurulu gücün üzerindeki tüm tüketicilerin çektikleri reaktif enerjiyi belirlenmiş sınırlar içinde tutmasını zorunlu kılar. Kurulu güce bağlı olarak endüktif reaktif enerjinin aktif enerjiye oranı %20 veya %33’ü, kapasitif reaktif enerjinin ise %15 veya %20’yi aşması durumunda, tüketiciler “reaktif enerji bedeli” adı altında cezai yaptırımla karşılaşır (EPDK, 2022).

Bu yasal çerçeve, sanayi ve ticari işletmeler için etkin bir reaktif güç kompanzasyonu sisteminin kurulmasını ve işletilmesini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu mevzuat, bir yandan işletmeleri ceza maliyetlerinden korurken, diğer yandan ulusal enerji altyapısının gereksiz yere yüklenmesini önleyerek ülke genelinde enerji verimliliğine katkıda bulunur. Akıllı şebekelerin ve dağıtık enerji kaynaklarının yaygınlaşmasıyla, reaktif güç yönetimi artık sadece ceza önleme amacı gütmekten çıkıp, şebeke destek hizmeti sağlayan daha dinamik bir optimizasyon problemine dönüşmektedir (Akcanca ve Taşkın, 2014).

2.5. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri

Modern elektrik güç sistemleri; artan enerji talebi, değişken yük profilleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye artan entegrasyonu gibi faktörler nedeniyle giderek daha karmaşık ve yönetilmesi zor bir yapıya bürünmüştür. Bu dinamik yapı, geleneksel kontrol yöntemlerinin yetersiz kalmasına ve sonuç olarak gerilim kararsızlığı, düşük güç kalitesi, iletim koridorlarının yetersizliği ve sistem güvenilirliğinde azalma gibi ciddi operasyonel problemlere yol açmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, mevcut güç sistemlerinin performansını, kapasitesini ve kontrol edilebilirliğini artırmak için güç elektroniği tabanlı statik kontrolörleri kullanan FACTS teknolojisi geliştirilmiştir. FACTS sistemlerinin temel amacı, yeni iletim hatları inşa etmek gibi yüksek maliyetli ve zaman alıcı yatırımlar yapmadan, mevcut AC iletim altyapısının kontrol edilebilirliğini ve güç transfer kapasitesini artırarak sisteme esneklik kazandırmaktır (Hingorani, 2007).

FACTS kavramı, ilk olarak 1980’lerin sonunda Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute – EPRI) tarafından, yavaş tepki veren mekanik kontrolörlerin yerini hızlı ve güvenilir güç elektroniği elemanlarının alması fikriyle ortaya

atılmıştır. Teknolojinin ilk nesli, tristör tabanlı SVC ve TCSC gibi cihazlarla sınırlı bir kontrol kabiliyeti sunarken, 1990’lardan itibaren IGBT ve GTO gibi tam kontrollü yarı iletkenlerin gelişimiyle STATCOM ve Statik Senkron Seri Kompanzatör (Static Synchronous Series Compensator – SSSC) gibi ikinci nesil cihazlar devreye girmiştir. Bu modern cihazlar, çok daha hızlı ve hassas kontrol imkânı sunarak sistem performansını önemli ölçüde artırmıştır.

FACTS cihazlarının temel çalışma prensibi, güç akışını belirleyen temel sistem parametrelerinin—hat gerilimi (V), baralar arası faz açısı (δ) ve hat empedansı (X)—dinamik olarak kontrol edilmesine dayanır. Yüksek hızlı yarı iletkenler ve geri beslemeli kontrol döngüleri aracılığıyla bu değişkenleri anlık olarak manipüle ederek, aktif ve reaktif güç akışını istenen şekilde düzenlerler. Bu sayede gerilim regülasyonu, güç salınımlarının sönümlenmesi ve sistem kararlılığının artırılması gibi kritik fonksiyonları yerine getirirler.

Bu fonksiyonel çeşitlilik nedeniyle FACTS cihazları, şebekeye olan elektriksel bağlantı konfigürasyonlarına göre sınıflandırılır. IEEE ve CIGRE standartlarına göre bu sınıflandırma; şebekeye paralel (şönt), seri ve bu ikisinin kombinasyonundan oluşan karma (seri-paralel) yapılar olarak üç ana kategoride yapılır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. FACTS cihazlarının sınıflandırılması

Paralel bağlı cihazlar öncelikli olarak gerilim kontrolü ve reaktif güç desteği sağlarken, seri cihazlar güç akışını ve hat empedansını yönetir. Bir güç sisteminde

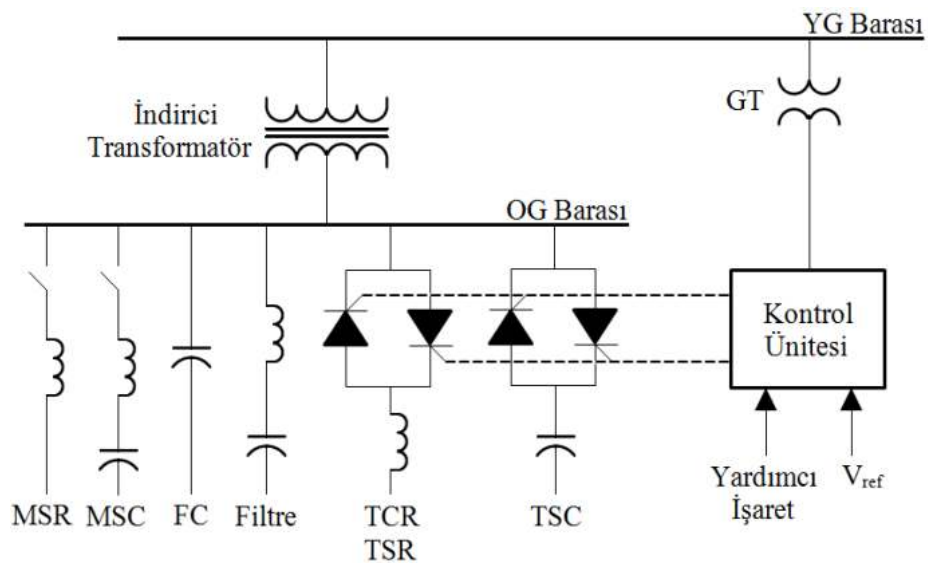
karşılaşılan spesifik bir probleme en uygun çözümü sunmak üzere, bu kategoriler arasından doğru FACTS cihazının seçilmesi kritik önem taşımaktadır.

2.5.1. Paralel (Şönt) Bağlantılı Cihazlar

Paralel bağlı FACTS cihazları, şebekeye bir düğüm noktasından şönt olarak bağlanarak, temel olarak dinamik gerilim regülasyonu ve reaktif güç desteği sağlamak amacıyla kullanılır. Bu cihazların temel işlevi, bağlandıkları baranın gerilimini sürekli izleyerek, gerilim düşmesi durumunda sisteme kapasitif reaktif güç enjekte etmek (gerilimi yükseltmek) veya gerilim yükselmesi durumunda sistemden endüktif reaktif güç çekmektir (gerilimi düşürmek). Bu sayede, güç sisteminin gerilim kararlılığını artırır, güç faktörünü düzeltir ve güç salınımlarını sönmüleyerek sistemin genel performansını iyileştirirler. Bu kategorideki en temel iki cihaz, teknolojik olarak birinci ve ikinci nesil çözümleri temsil eden SVC ve STATCOM'dur.

2.5.1.1. Statik VAR kompanzator (SVC)

SVC, güç elektroniği tabanlı paralel kompanzasyonun birinci nesil temsilcisidir. Temel olarak, tristörler aracılığıyla anahtarlanan pasif reaktör ve kapasitör gruplarından oluşur. Teknolojisi, Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ile endüktif akımı sürekli olarak ayarlamaya ve Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) ile kapasitör bankalarını kademeli olarak devreye alıp çıkarmaya dayanır (Koyuncu, 2012). Tipik bir SVC konfigürasyonu, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi bir bağlantı transformatörü, tristör valf grupları, reaktörler, kapasitör bankaları ve harmonik filtrelerden oluşur (Çifci, 2015).

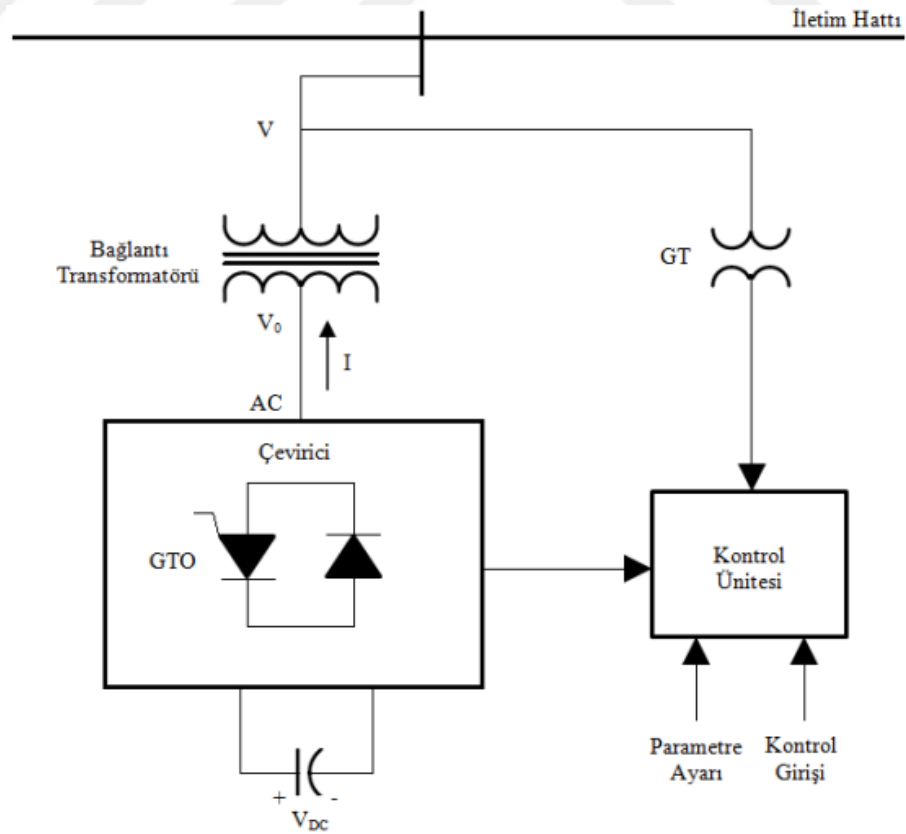


Şekil 2.8. SVC bağlantı şeması (Çifci, 2015)

SVC, statik yapısı ve hızlı tepki süresi sayesinde mekanik kompanzasyon sistemlerine göre üstünlük sağlasa da performansı üzerinde önemli kısıtlar barındırır. Tristör tabanlı yapısı nedeniyle tepki süresi birkaç şebeke çevrimi ile sınırlıdır ve anahtarlama sırasında harmonik üretimi kaçınılmazdır (Öztürk vd., 2016). Ancak en temel zafiyeti, sağlayabildiği reaktif güç kapasitesinin, terminal geriliminin karesiyle orantılı olmasıdır. Bu durum, özellikle ciddi bir arıza sonrası yaşanan derin gerilim düşümlerinde, SVC'nin reaktif güç desteğinin en çok ihtiyaç duyulduğu anda önemli ölçüde azalmasına neden olur.

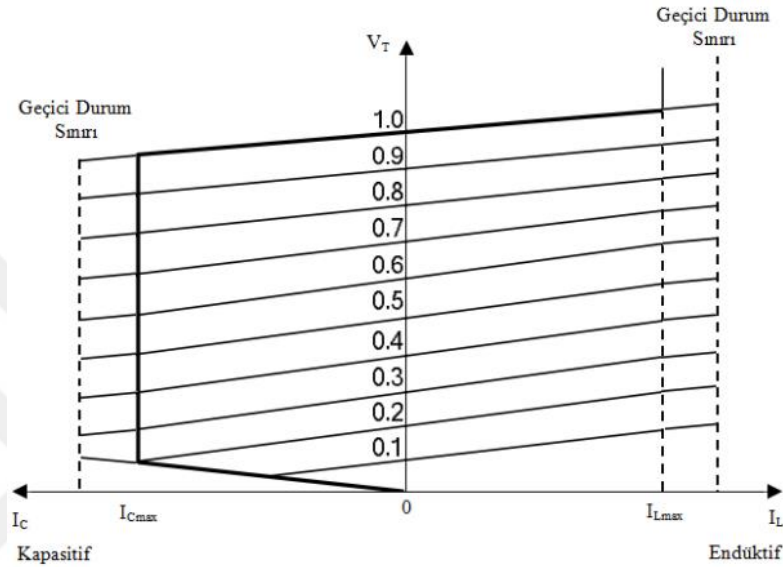
2.5.1.2. Statik senkron kompanzatör (STATCOM)

STATCOM, SVC'nin getirdiği sınırlamaları aşmak üzere geliştirilmiş, VSC tabanlı ikinci nesil, modern bir paralel kompanzatördür. Temelinde, IGBT gibi tam kontrollü yarı iletken elemanlar kullanan bir VSC, bir DC enerji depolama elemanı (genellikle bir kapasitör) ve bir bağlantı transformatörü bulunur (Şekil 2.9). STATCOM, bir senkron jeneratör gibi davranarak, çıkışında genliği ve fazı ayarlanabilir bir AC gerilim üretir. Bu gerilimi şebeke gerilimiyle karşılaştırarak, aradaki farka göre sisteme kapasitif veya endüktif reaktif akım enjekte eder (Andersen ve Nilsson, 2020).



Şekil 2.9. STATCOM genel yapısı (Çifci, 2015)

STATCOM, SVC'ye kıyasla birçok teknolojik üstünlük sunar. VSC tabanlı yapısı sayesinde tepki süresi SVC'den daha hızlı olup, tipik olarak 1-2 şebeke çevrimi mertebesinde (Çifci, 2015). En kritik avantajı, reaktif akım kapasitesinin geniş bir gerilim aralığında nominal değerini korumasıdır. Bu özellik, SVC'nin aksine, ciddi gerilim düşümleri sırasında dahi tam kapasite reaktif güç desteği sunabilmesini sağlar (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. STATCOM V-I karakteristiği (Çifci, 2015)

STATCOM, modern kontrol algoritmalarıyla güç salınımlarını sönümleme, faz dengeleme ve hatta DC tarafına bir enerji depolama sistemi eklenerek aktif güç desteği sağlama gibi ek fonksiyonları da yerine getirebilir (Balıkçı, 2014). Ayrıca, büyük pasif elemanlara (kapasitör bankaları) ihtiyaç duymadığı için SVC'ye göre daha kompakt bir yapıya sahiptir.

Paralel FACTS cihazları, modern güç sistemlerinin kararlılığını ve güvenilirliğini artırmada merkezi bir rol oynar. Bu cihazlar, bağlandıkları düğüm noktasındaki gerilimi sürekli regüle ederek voltaj çökmelerini önler, güç salınımlarını etkin bir şekilde sönümleyerek geçici rejim kararlılığını iyileştirir ve güç faktörünü düzelterek sistem kayıplarını azaltır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu ve akıllı şebeke uygulamalarının yaygınlaşmasıyla, bu cihazların sunduğu hızlı ve dinamik destek, sistemin kararlı çalışması için vazgeçilmez hale gelmiştir (Tosun vd., 2011).

SVC ve STATCOM arasındaki temel teknolojik ve performans farklılıkları, belirli bir uygulama için en uygun cihazın seçiminde belirleyici rol oynar. Bu iki cihazın teknik karşılaştırması Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Paralel bağlı FACTS cihazların teknik karşılaştırması

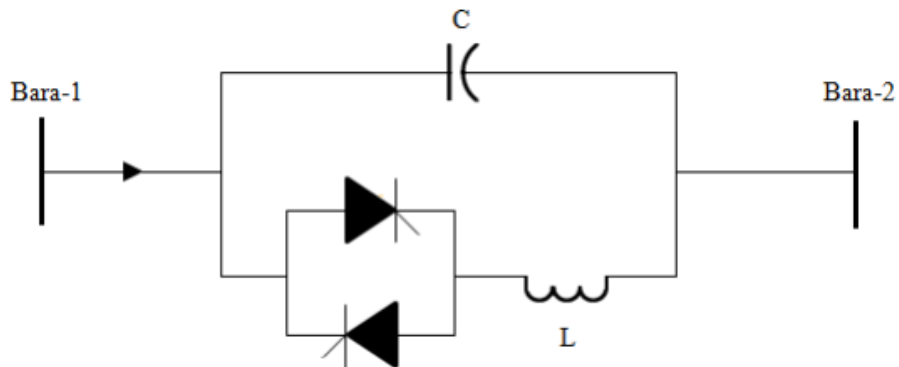
Özellik	SVC	STATCOM
Anahtarlama Elemanı	Tristör (SCR)	IGBT/GTO
Reaktif Güç Kapasitesi	Gerilime bağlı	Geniş aralıkta sabit
Gerilim Desteği	Sınırlı (düşük voltajda yetersiz)	Yüksek (düşük voltajda da etkilidir)
Dinamik Performans	Orta	Yüksek
Harmonik Üretimi	Fazla	Az
Maliyet	Görece düşük	Yüksek

2.5.2. Seri Bağlantılı Cihazlar

Paralel bağlı cihazların aksine, seri bağlı FACTS cihazları iletim hattı ile seri olarak entegre edilir ve temel fonksiyonları, hattın empedansını dinamik olarak modüle ederek aktif güç akışını kontrol etmek ve yönlendirmektir. Geleneksel olarak sabit seri kapasitör bankaları ile sağlanan bu fonksiyon, FACTS teknolojisi sayesinde güç elektroniği tabanlı kontrolörler ile dinamik, hızlı ve sürekli ayarlanabilir bir nitelik kazanmıştır. Bu cihazlar, iletim hattına seri olarak bir gerilim enjekte ederek hattın toplam empedansını anlık olarak artırır veya azaltır. Bu yetenekleri sayesinde, paralel hatlar arasındaki güç akışını dengeleyerek şebeke tıkanıklıklarını giderir, sistemin geçici ve dinamik kararlılığını artırır ve mevcut iletim altyapısının transfer kapasitesini daha verimli kullanmayı sağlarlar (Singh vd., 2011). Bu kategorideki en temel iki teknoloji TCSC ve SSSC'dir.

2.5.2.1. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC)

TCSC, birinci nesil seri FACTS cihazlarının en bilinen örneğidir. Temel yapısı, bir sabit seri kapasitör bankasına paralel bağlanmış bir TCR'den oluşur (Şekil 2.11).



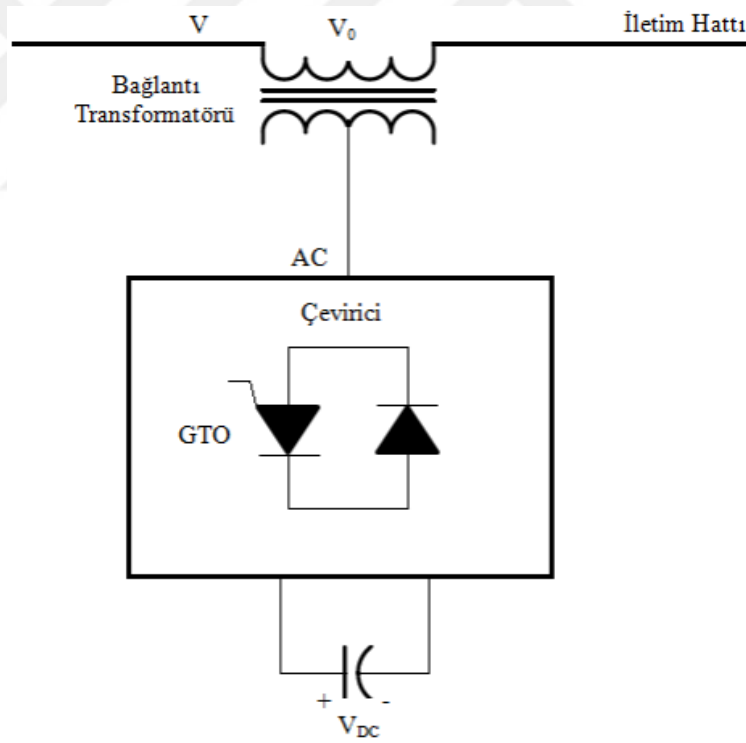
Şekil 2.11. TCSC'nin genel yapısı (Çifci, 2015)

TCSC'nin çalışma prensibi, tristör valflerinin ateşleme açısını kontrol ederek TCR üzerinden akan akımı ayarlamaya dayanır. Bu sayede reaktörün etkin endüktansı

değiştirilir ve bu da tüm TCSC ünitesinin net empedansını (kapasitif veya endüktif) sürekli bir aralıkta modüle etme imkânı tanır. Bu dinamik empedans kontrolü, TCSC'yi güç akışı yönetimi, güç salınımlarının sönümlenmesi ve geçici kararlılığın iyileştirilmesi gibi uygulamalar için etkili bir araç haline getirir. Göreceli olarak basit teknolojisi, TCSC'yi özellikle mevcut seri kompanzasyon sistemlerinin modernizasyonu için uygun bir çözüm yapar.

2.5.2.2. Statik senkron seri kompanzatör (SSSC)

SSSC, VSC teknolojisine dayanan modern, ikinci nesil bir seri FACTS cihazıdır. TCSC gibi değişken bir empedans olarak davranmak yerine, SSSC temelde şebekeye seri bağlı bir AC gerilim kaynağı olarak çalışır (Şekil 2.12). Bir bağlantı transformatörü aracılığıyla hatta seri olarak, genliği ve faz açısı tam olarak kontrol edilebilen bir gerilim enjekte eder. Bu gerilimi hat akımına dik (quadrature) fazda enjekte ederek, hattın empedansını kapasitif veya endüktif yönde saf olarak değiştirebilir.



Şekil 2.12. SSSC'nin genel yapısı (Çifci, 2015)

SSSC'nin TCSC'ye göre en temel üstünlükleri; daha hızlı tepki süresi, sürekli ve daha geniş bir kontrol aralığı sunması ve bir gerilim kaynağı gibi davrandığı için hat akımının düşük olduğu durumlarda dahi etkinliğini korumasıdır. Ayrıca, DC tarafına bir enerji depolama ünitesi entegre edildiğinde, SSSC sadece reaktif güç değil, aynı zamanda

aktif güç de enjekte etme veya çekme kabiliyeti kazanır. Bu özellik, onu güç akışı kontrolünün ötesinde, sistem kararlılığını desteklemek için çok daha esnek ve güçlü bir araç haline getirir.

Seri FACTS denetleyicileri, modern elektrik şebekelerinin verimliliğini, esnekliğini ve güvenilirliğini artıran vazgeçilmez teknolojilerdir. Güç akışını optimize ederek hat kayıplarını azaltır, sistem kararlılığını güçlendirerek geniş çaplı kesinti risklerini düşürür ve arıza anında kısa devre akımlarını sınırlayarak ekipman güvenliğine katkıda bulunurlar. TCSC ve SSSC'nin farklı teknolojik altyapıları, performans, maliyet ve kontrol kabiliyetleri açısından önemli farklılıklar doğurur. Bu iki cihaz arasındaki temel teknik karşılaştırma Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2. Seri bağlı FACTS cihazların teknik karşılaştırması

Özellik	TCSC	SSSC
Teknoloji Temeli	Tristör (SCR)	VSC
Kontrol Yeteneği	Sınırlı	Geniş (faz ve genlik ayarı)
Harmonik Üretimi	Fazla	Az
Dinamik Performans	Orta	Yüksek
Aktif Güç Katkısı	Dolaylı	Doğrudan (ek enerji kaynağı ile)
Reaktif Güç Kontrolü	Sınırlı	Hassas ve geniş aralıklı

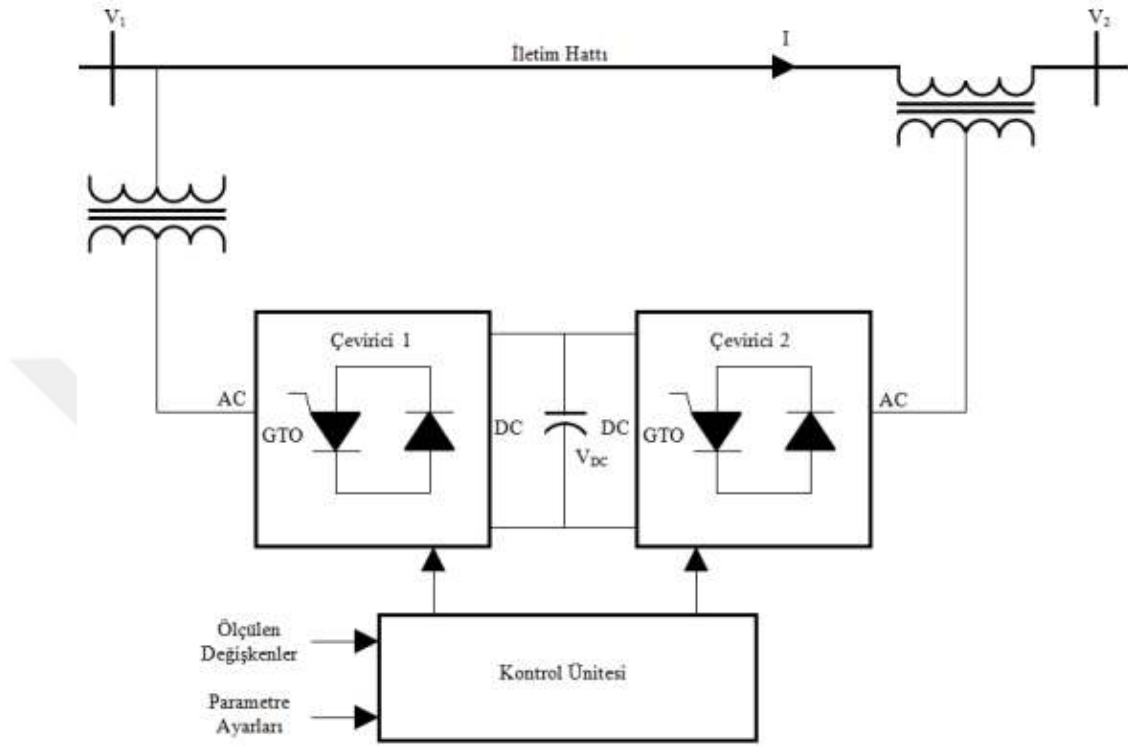
2.5.3. Seri-Paralel (Karma) Bağlantılı Cihazlar

Seri-paralel bağlı FACTS cihazları hem seri hem de paralel kompanzasyonun avantajlarını tek bir entegre sistemde birleştirerek, güç sistemleri üzerinde en kapsamlı kontrol yeteneğini sunan en gelişmiş teknoloji sınıfını temsil eder. Bu cihazlar, temel olarak ortak bir DC bağlantısı üzerinden haberleşen bir seri ve bir paralel VSC ünitesinden oluşur. Paralel ünite, bağlandığı düğüm noktasında gerilim kontrolü ve reaktif güç desteği sağlarken; seri ünite, hat empedansını modüle ederek aktif ve reaktif güç akışını doğrudan kontrol eder. İki ünite arasındaki DC bağlantısı, sistemin bir tarafından çekilen aktif gücün diğer tarafa transfer edilmesine olanak tanıyarak bu cihazlara benzersiz bir esneklik kazandırır.

2.5.3.1. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC)

UPFC, bu kategorinin en bilinen ve en güçlü üyesidir. Teknik olarak, bir STATCOM (paralel ünite) ile bir SSSC'nin (seri ünite) ortak bir DC bara üzerinden birleştirilmesiyle oluşur (Şekil 2.13). Bu entegre yapı sayesinde UPFC, bir iletim hattının üç temel güç akışı parametresini de (terminal gerilimi, hat empedansı ve faz açısı) eş

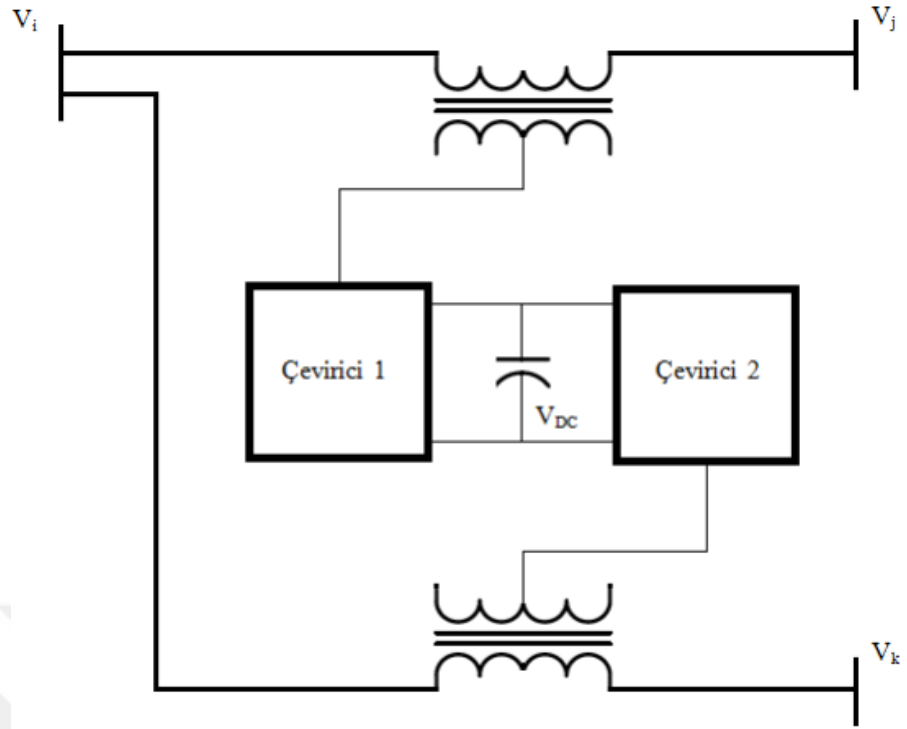
zamanlı ve bağımsız olarak kontrol edebilir. Bu “hepsi-bir-arada” yeteneği, UPFC’yi güç akışını hassas bir şekilde yönlendirmek, sistem salınımlarını sönümlemek ve geçici rejim kararlılığını en üst düzeyde iyileştirmek için en etkili FACTS cihazı yapar. Ancak, bu üstün kontrol kabiliyeti, yüksek karmaşıklık ve maliyetle birlikte gelir.



Şekil 2.13. UPFC’nin genel yapısı (Çifci, 2015)

2.5.3.2. Hatlar arası güç akışı kontrolörü (IPFC)

IPFC, UPFC konseptinin birden fazla iletim hattını kapsayacak şekilde genişletilmiş bir versiyonudur. IPFC, birden fazla seri VSC ünitesinin ortak bir DC bağlantısı üzerinden birleştirilmesiyle, komşu hatlar arasında aktif güç transferi yapma ve her bir hattın güç akışını bağımsız olarak kontrol etme yeteneğine sahiptir (Şekil 2.14). Bu özellik, özellikle aşırı yüklenmiş bir hattan güç alıp daha az yüklü bir hatta yönlendirerek şebeke tıkanıklıklarını gidermek ve sistemin toplam transfer kapasitesini optimize etmek için kullanılır.



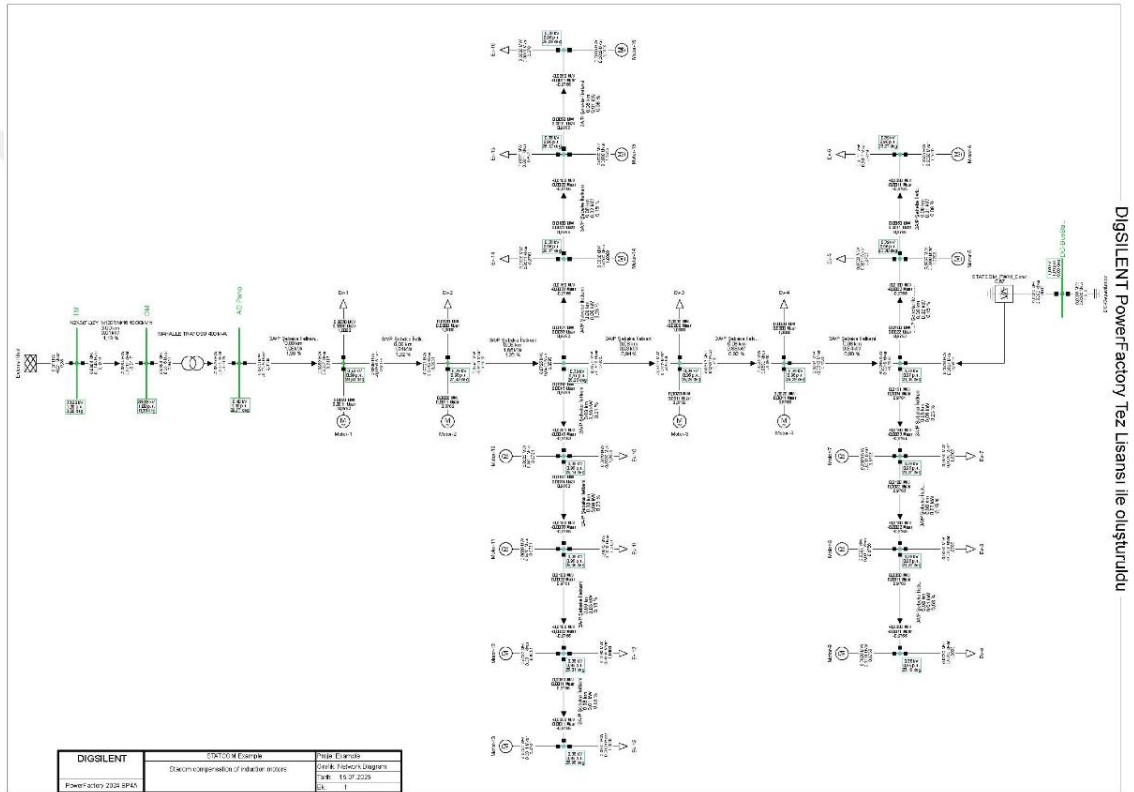
Şekil 2.14. IPFC'nin genel yapısı (Çifci, 2015)

Seri-paralel (karma) bağlı FACTS cihazları, güç sistemleri üzerinde en üst düzeyde kontrol ve esneklik sunar. Mevcut altyapının kapasitesini maksimize ederek ve sistem kararlılığını artırarak yeni hat yatırımlarına olan ihtiyacı erteleyebilirler. Yüksek maliyet ve karmaşıklıkları nedeniyle sadece stratejik öneme sahip kritik şebeke noktalarında kullanılmalarına rağmen, modern güç sistemlerinin verimli ve güvenli işletilmesinde kritik bir rol oynamaktadırlar.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. İncelenen Dağıtım Şebekesi Modeli ve Bileşenleri

DIgSILENT PowerFactory ortamında oluşturulan alçak gerilim dağıtım sistemi modeli, ağırlıklı olarak tarımsal sulama alanlarında kullanılan yüklerin bulunduğu bir bölgedeki tipik bir dal-budak (radyal) şebeke yapısını temsil etmektedir. Modelin tek hat şeması Şekil 3.1’de sunulmaktadır. Modelin ayrıntılı tek hat şeması EK 1 - Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Şebeke modelinin tek hat şeması

Sistem, yüksek güçlü bir iletim hattına (sonsuz bara) bağlı olup enerjisini buradan temin etmektedir. Ana besleme noktası 33 kV seviyesindedir ve enerji uygun kesitli yeraltı kablosu ile mahalle transformatörüne aktarılmaktadır. Mahalle transformatörü 33 kV/0,4 kV, 400 kVA gücünde olup OG / AG gerilim dönüşümünü sağlamaktadır. Transformator çıkışındaki alçak gerilim panosundan itibaren yaklaşık 0,4 kV gerilim seviyesinde bir dağıtım hattı uzanmaktadır. Şebekede toplam 18 adet direk (2 adet branşman, 16 adet bağlantı noktası) bulunmakta, direkler arasındaki ortalama mesafe 70 m olup hattın yaklaşık toplam uzunluğu 1,3 km’dir. Havai hat iletken tertibi 3 adet faz

iletkeni, 1 adet nötr iletkeni ve 1 adet sokak fazı olacak şekilde (3 Aster+2 Pancy) dizayn edilmiştir. Dağıtım şebekesi boyunca her direkte olacak şekilde mesken ve motor yükleri dağıtılmış, dengeli yük oluşturması için mesken ve motor yükleri eşit seçilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen simülasyon modelini oluşturan temel bileşenler ve bu bileşenlerin karakteristik özellikleri aşağıda ayrıntılandırılmıştır:

- **Besleme Kaynağı:** Sonsuz kaynak olarak modellenen, 33 kV gerilim seviyesinde, 900 kVA, 900 kVAR güç sağlayabilen (yüksek kısa devre gücüne sahip, gerilim dalgalanması göstermeyen) ideal kaynak.
- **Dağıtım Transformatörü:** 33 kV/0,4 kV, 50 Hz, 400 kVA'lık hermetik tip dağıtım transformatörü
- **Alçak Gerilim Hattı:** 0,4 kV gerilim seviyesine sahip dağıtım şebekesi, 18 direkli dal-budak şebeke modeli radyal beslenen bir havai hattır. Direkler arası uzaklık 70 m olup iletken konfigürasyonu 3 faz + 1 nötr/aydınlatma iletkeni şeklindedir (3 Aster+2 Pancy). Hattın toplam uzunluğu ve yüksek hat empedansı sayesinde yük akışı sırasında gerilim düşümünün meydana geleceği varsayılmaktadır.
- **Meskenler:** Şebekede 16 adet ev bağlantısı modellenmiştir. Her bir konut için ortalama 3 kW aktif güç tüketimi tanımlanmıştır. (Evsel yüklerin güç faktörünün yaklaşık 1'e yakın olduğu varsayılmıştır; modelde reaktif güç tüketimleri ihmal edilebilir düzeydedir.)
- **Motorlar:** Şebekeye 16 adet motor yükü bağlanmıştır. Bu motorlar özellikle tarımsal sulama pompaları veya benzeri endüksiyon motorlarını temsil etmektedir. Her bir motorun aktif gücü 2 kW ve reaktif güç ihtiyacı 1,1 kVAr olacak şekilde modellenmiştir. Modeldeki her bir motor yükünün reaktif güç talebi olan 1,1 kVAr değerinin belirlenmesi, standart bir güç faktörü düzeltme hesabına dayanmaktadır. Bu hesaplama, şebekeye bağlı tipik bir asenkron motorun, güç faktörünün endüstriyel standartlara uygun bir seviyeye yükseltilmesi için gereken kompanzasyon ihtiyacını göstermek amacıyla aşağıda sunulmuştur. Hesaplama, motorun temel parametreleri aşağıdaki gibi kabul edilmiştir:
 - Aktif Güç (P): 2 kW
 - Başlangıç Güç Faktörü ($\cos\phi_1$): 0,80 (tipik bir asenkron motor için etiket değeri aralığında)
 - Hedef Güç Faktörü ($\cos\phi_2$): 0,98 (yüksek verimlilik ve kompanzasyon yönetmeliklerine uyum için hedeflenen değer)

Gerekli kompanzasyon gücü (Q_c), aşağıdaki denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Q_c = P \times (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3.1)$$

Q_c : Gerekli kapasitif reaktif güç (kVAr)

P : Motorun aktif gücü (kW)

φ_1 : Başlangıç güç faktörüne karşılık gelen faz açısı

φ_2 : Hedef güç faktörüne karşılık gelen faz açısı

Bu doğrultuda, başlangıç güç faktörü ($\cos \varphi_1$) olan 0,80 için faz açısı (φ_1) $36,87^\circ$, hedeflenen güç faktörü ($\cos \varphi_2$) olan 0,98 için ise faz açısı (φ_2) $11,47^\circ$ olarak bulunur. Bu açıların tanjant değerleri formülde yerine konulduğunda:

$$Q_c = 2 \times (\tan(36,87^\circ) - \tan(11,47^\circ)) = 2 \times (0,75 - 0,20) = 1,1 \text{ kVAr olarak hesaplanmıştır.}$$

- **Dağıtım Statik Kompanzatör (D-STATCOM):** Şebekeye 1 adet inverter tabanlı D-STATCOM cihazı bağlanmıştır. Bu cihaz, dağıtım şebekelerinde gerilimi desteklemek ve dinamik reaktif güç dengelemesi yapmak amacıyla kullanılan bir güç elektroniği tabanlı kompanzasyon ünitesidir. Modeldeki D-STATCOM'un anma gücü 40 kVA, anma gerilimi 0,4 kV olup şebekeye paralel bağlanmıştır. Cihaz, 30 kVAr reaktif güç çıkışı referansına göre ayarlanmıştır ve DC barası üzerinden gerilim kontrolü yapmaktadır. Kontrol sistemi, D-STATCOM'un bağlı olduğu baradaki gerilimi yaklaşık 1,0 p.u. değerinde tutmak üzere tasarlanmıştır (1,0 p.u. ~ 1 kV DC). Bu amaçla STATCOM kontrolünde gerilim referans bandı 0,95 – 1,05 p.u. aralığında belirlenmiştir (yani gerilim bu aralığın altına inerse cihaz kapasitif reaktif güç enjekte ederek yükseltir, üstüne çıkarsa endüktif yük gibi davranarak gerilimi sınırlar).

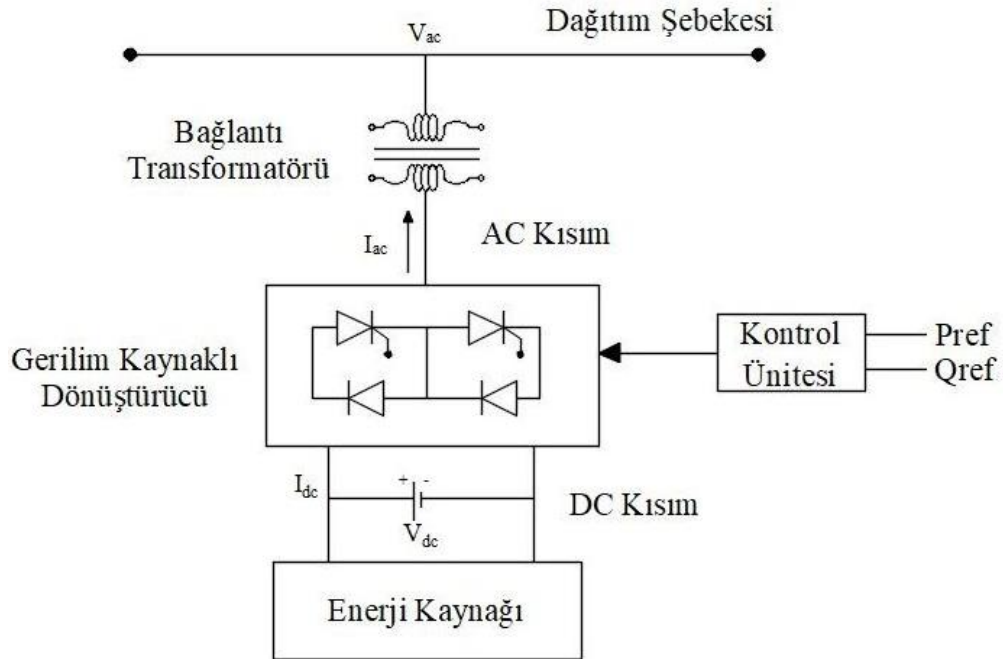
3.2. Dağıtım Statik Senkron Kompansatörü (D-STATCOM)

Dağıtım seviyesindeki güç sistemleri; yüklerin dinamik doğası, endüstriyel ekipmanların yarattığı harmonik bozulmalar ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu gibi nedenlerle gerilim dalgalanmaları, gerilim düşümleri ve reaktif güç dengesizlikleri gibi güç kalitesi sorunlarıyla sıkça karşılaşmaktadır. Geleneksel çözümler olan sabit veya mekanik anahtarlama kompanzasyon sistemleri, yavaş tepki süreleri nedeniyle bu dinamik problemlere etkin bir çözüm sunamamaktadır. Bu noktada, iletim sistemleri için geliştirilen FACTS teknolojisinin bir üyesi olan ve dağıtım şebekelerinin

özel ihtiyaçları için uyarlanmış D-STATCOM, etkin bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Ertay vd., 2016).

D-STATCOM, temel olarak iletim seviyesindeki STATCOM teknolojisinin bir türevidir. Şebekeye şönt olarak bağlanan, merkezinde IGBT veya MOSFET gibi tam kontrollü yarı iletken elemanlar barındıran bir VSC bulunur. Bu VSC, bir DC kondansatörden beslenerek, çıkışında genliği ve fazı hassas bir şekilde kontrol edilebilen bir AC gerilim üretir. Bu gerilim, bir bağlantı empedansı (genellikle bir transformatörün kaçak reaktansı) üzerinden şebekeye uygulanır (Mokhtari vd., 2014). Cihazın temel çalışma prensibi, kendi ürettiği gerilim (V_{out}) ile şebeke gerilimi (V_s) arasındaki vektörel farkı kontrol ederek reaktif güç akışını yönetmektir. $V_{out} > V_s$ olduğunda sisteme kapasitif reaktif güç enjekte ederek (kapasitif mod) gerilimi yükseltir; $V_{out} < V_s$ olduğunda ise sistemden endüktif reaktif güç çekerek (endüktif mod) gerilimi düşürür. Bu milisaniyeler mertebesindeki hızlı tepki yeteneği, D-STATCOM'u ani yük değişimlerinin ve gerilim sarkmalarının anında kompanze edilmesi için ideal bir çözüm haline getirir (Gupta vd., 2017).

Bir D-STATCOM'un temel donanım yapısı (Şekil 3.2), VSC ve DC bağlantı birimine ek olarak, VSC'nin anahtarlama etkilerinden kaynaklanan yüksek frekanslı bileşenleri bastırmak için LC filtreler, izolasyon ve gerilim uyumu sağlayan bir bağlantı transformatörü ve tüm sistemi yöneten gelişmiş bir ölçüm ve kontrol sisteminden oluşur.



Şekil 3.2. D-STATCOM'un genel yapısı

Bu kontrol sistemi, şebekeden anlık olarak ölçülen gerilim ve akım değerlerine göre VSC'nin darbe genişlik modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) sinyallerini üretir. Bu hassas kontrol, yalnızca reaktif güç kompanzasyonu değil, aynı zamanda gerilim regülasyonu, harmonik bastırma ve flicker sönümlleme gibi çoklu güç kalitesi problemlerinin eş zamanlı olarak çözülmesine olanak tanır (Kabalcı ve Taşdemir, 2021; Ku vd., 2023). Kontrol stratejisi, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak basit PI/PID denetleyicilerden, d-q eksenli vektör kontrol yöntemlerine ve hatta yapay zekâ tabanlı adaptif algoritmalara kadar geniş bir yelpazeyi kapsayabilir (Rathore vd., 2015).

D-STATCOM'un en önemli avantajları, hızlı dinamik tepkisi, sürekli ve hassas kontrol kabiliyeti ve çok yönlü işlevselliğidir. Bu yetenekleri sayesinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının neden olduğu gerilim kararsızlıklarını bastırmaktan, uzun kırsal hatlardaki gerilim düşümlerini telafi etmeye kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Teknik açıdan D-STATCOM, kendisiyle benzer görevleri yerine getiren diğer kompanzasyon cihazlarıyla karşılaştırıldığında belirgin üstünlüklere sahiptir. Örneğin, tristör tabanlı SVC'ye kıyasla D-STATCOM, daha hızlı tepki süresi sunar, düşük gerilim koşullarında reaktif güç sağlama yeteneğini kaybetmez ve daha az harmonik üretir. Bu teknik ve dinamik özelliklerin karşılaştırması Çizelge 3.1'de özetlenmektedir.

Çizelge 3.1. D-STATCOM'un teknik ve dinamik özelliklerinin karşılaştırılması

Özellik	SVC	STATCOM	D-STATCOM
Teknoloji	TCR ve sabit kondansatör	Yarıiletken anahtarlamalı VSC	STATCOM'un dağıtım ölçeğine uyarlanmış versiyonu
Anahtar Elemanlar	Tristör (TCR kontrol cihazı)	IGBT/MOSFET (yüksek frekanslı anahtarlama)	IGBT/MOSFET (VSC)
Reaktif Güç Sağlama	Düşük gerilimde sınırlı (sabit kapasitör)	Düşük gerilimde bile maksimum kapasitif akım verebilir	STATCOM gibi reaktif güç sağlar, gerilim dalgalanmalarını engeller
Dinamik Tepki	Göreceli yavaş (ms mertebesinde)	Çok hızlı (alt ms düzeyinde)	Çok hızlı (STATCOM ile benzer şekilde)
Harmonik /Gürültü	6. ve 7. harmonikler, pasif filtre gerekir	PWM kaynaklı, çıkışta L filtre veya aktif filtre gerekir	PWM kaynaklı, çıkışta L filtre veya aktif filtre gerekir
Avantajlar	Basit teknoloji, güvenilir, nispeten düşük harmonik üretir	Hızlı tepki, düşük gerilimde reaktif güç verebilme yeteneği	Gerilim regülasyonu, güç faktörü düzeltmesi, flicker/harmonik bastırma sağlar
Dezavantajlar	Yavaş dinamik tepki, düşük gerilimde reaktif yardımı yok	DC kapasitör gerektirir, yüksek teknoloji maliyeti	Karmaşık kontrol gereksinimi, inverter kayıpları nispeten yüksek

Benzer şekilde, geleneksel mekanik anahtarlamalı kondansatör bankalarıyla kıyaslandığında, D-STATCOM'un milisaniyeler mertebesindeki tepki süresi, sürekli

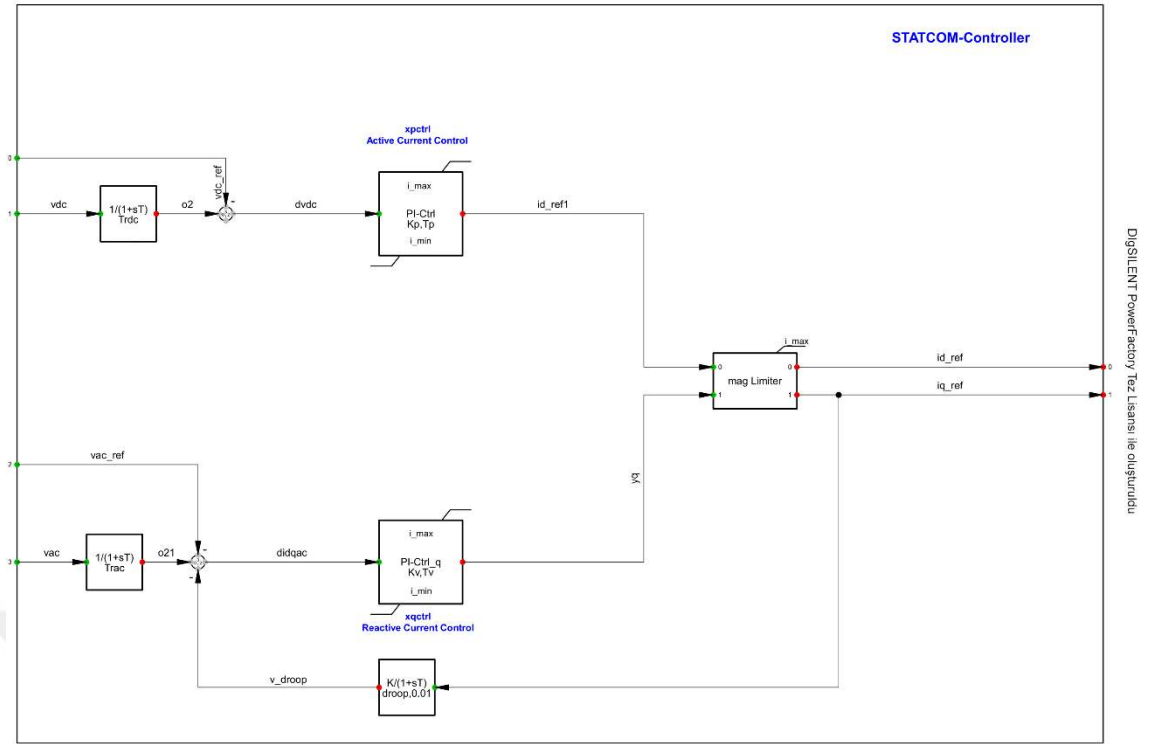
kontrol imkânı ve ek fonksiyonları (örneğin harmonik filtreleme), onu özellikle dinamik yüklerin bulunduğu modern şebekeler için çok daha üstün bir teknoloji haline getirmektedir (Nassif ve Teshome, 2020). Bu karşılaştırma ise Çizelge 3.2’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 3.2. Klasik kompanzasyon ile D-STATCOM’un teknik karşılaştırması

Karşılaştırma Kriteri	Klasik Kompanzasyon (Kondansatör Bankları, OLTC vb.)	D-STATCOM
Tepki Süresi	Ani değişimlere geç tepki verir. (Yavaş)	Ani değişimleri anında kompanze eder. (Milisaniyeler)
Reaktif Güç Yönü	Genelde sadece kapasitif güç sağlar (veya reaktif çeker), dolayısıyla gerilim yükseltebilir fakat düşüremez (ya da tersi).	Hem kapasitif hem endüktif reaktif güç verebilir veya çekebilir; gerilim düşümünde destek, yükselmesinde tüketim yapabilir.
Kontrol Biçimi	Belirli adımlar halinde devreye girer, sürekli ayar imkânı kısıtlıdır.	Geniş bantta lineer ayar yapabilir, hassas gerilim regülasyonu mümkündür.
İşletme ve Bakım	Aşınma, bakım ihtiyacı ve sınırlı anahtarlama sayısı (özellikle OLTC) söz konusudur.	Aşınma yok, bakım ihtiyacı düşük; anahtarlama sınırı olmadan sürekli çalışabilir.
Ek Fonksiyonlar	Pasif elemanlar olduğu için harmoniklerle etkileşim problemi olabilir (rezonans).	Aktif filtreleme ile harmonik ve dengesizlik düzeltme kabiliyetleri mevcut.
Maliyet	Düşük ilk yatırım maliyeti, basit uygulamalarda yeterli çözüm sunar.	Daha yüksek ilk maliyet, ancak gelişmiş kontrolü sayesinde kritik uygulamalarda etkin çözüm ve uzun vadede fayda.

3.2.1. Modelin D-STATCOM Kontrol Bloğu

D-STATCOM kontrol bloğu, bir D-STATCOM cihazının aktif ve reaktif akım bileşenlerinin referanslarını oluşturmak için kullanılan çift döngülü bir kontrol sistemidir. Bu kontrol algoritması, cihazın sistem gerilimlerini ve DC bağlantı gerilimini düzenlemesine olanak tanır. Tezde modellenen D-STATCOM’un şebekeye dinamik reaktif güç desteği sağlama fonksiyonu, gelişmiş bir kontrol stratejisi ile yönetilmektedir. Bu stratejinin temel yapısını oluşturan D-STATCOM kontrol bloğu, Şekil 3.3’te şematik olarak sunulmaktadır. Ayrıntılı D-STATCOM kontrol bloğu EK 2 - Şekil 3.2’de verilmektedir.



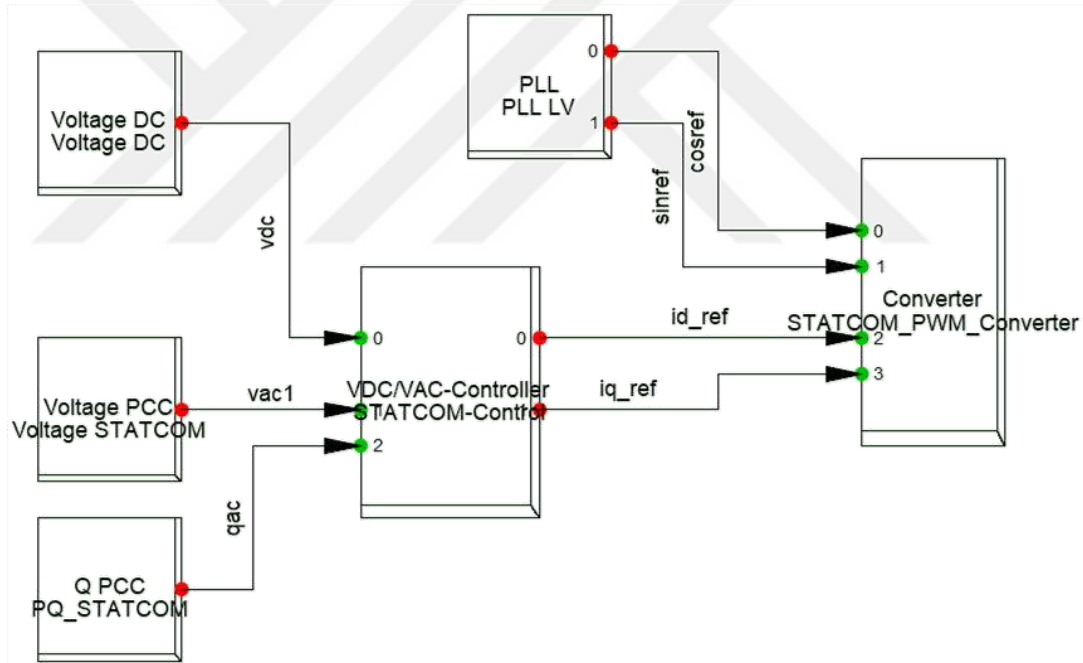
Şekil 3.3. D-STATCOM kontrol bloğu

Kontrol sistemi, aktif güç kontrol döngüsü ve reaktif güç kontrol döngüsü olmak üzere iki ana kontrol döngüsünden oluşur. İlk olarak, üst kısımda bulunan aktif güç kontrol yolunda sistemin DC bağlantı gerilimi v_{dc} birinci dereceden bir düşük geçiren filtre ($1/(1+sT)$) ile filtrelenir. Bu filtreleme, ölçüm gürültüsünü bastırmak ve sinyal kararlılığını artırmak amacıyla gerçekleştirilir. Ardından, filtrelenmiş DC gerilimi ile referans değeri v_{dc_ref} karşılaştırılarak hata sinyali dv_{dc} oluşturulur. Bu hata sinyali, PI denetleyici (PL-Ctrl, parametreleri K_p ve T_p) tarafından işlenerek, sistemin aktif güç kontrolü için gereken d-eksenli akım referansı i_{d_ref1} elde edilir. Alt kısımda ise reaktif güç kontrol döngüsü yer alır. Burada, sistemdeki AC gerilimi v_{ac} , benzer şekilde birinci dereceden bir düşük geçiren filtre ($1/(1+sT)$) ile filtrelenir ve ardından istenen AC gerilim referansı v_{ac_ref} ile karşılaştırılır. Bu fark $didqac$, reaktif güç ihtiyacını temsil eder. Reaktif akım kontrolü için kullanılan PI denetleyici (PL-Ctrl_q, parametreleri K_v ve T_v), hata sinyalini işleyerek q-eksenli akım referansını i_{q_ref1} 'i oluşturur. Bu kontrol döngüsünde ayrıca, droop kontrol mekanizması bulunur. Droop kontrolü, sistem gerilimi yükseldikçe reaktif akım çıkışını düşürerek voltaj dengelemesi sağlar. Burada kullanılan blok, v_{droop} girişine uygulanan bir zaman sabitli filtre ile gerçekleştirilir ve yük paylaşımlı sistemlerde istikrarı artırmak için tasarlanmıştır. Her iki kontrol döngüsünün ürettiği i_{d_ref1} ve i_{q_ref1} sinyalleri bir büyüklük sınırlayıcı bloğa (mag limiter) girer. Bu

blok, oluşturulan akım referanslarının toplam genliğini kontrol ederek sistemin termal veya elektronik sınırlarını aşmasını engeller. Sınırlayıcıdan geçen nihai değerler i_{d_ref} ve i_{q_ref} olarak invertere gönderilir. Bu referans akımlar, inverterin üreteceği çıkış akımlarının senkron çerçevede hedeflenen bileşenlerini temsil eder. D-STATCOM cihazının şebekeye bağlandığı noktada (PCC) gerilim regülasyonu, reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik azaltımı gibi görevleri hassas ve dinamik bir şekilde yerine getirmesini sağlar. Ayrıca, sistemin anlık koşullarına göre hızlı yanıt verebilmesi, bu yapının dağıtım sistemlerindeki etkinliğini artıran önemli bir avantajdır.

3.2.2. Modelin D-STATCOM Algoritması

D-STATCOM blok yapısı, D-STATCOM'un kontrol ve güç elektroniği bileşenlerinin birbirine nasıl bağlandığını ve sistemin nasıl etkileşime girdiğini tanımlamaktadır. Bu yapı Şekil 3.4'te verilmektedir.



Şekil 3.4. D-STATCOM blok yapısı

Bu kontrol yapısı, sistem gerilimlerinin ve reaktif güç durumunun sürekli olarak izlenmesi ve bu parametrelere göre D-STATCOM'un doğru referans akımlarını üretmesini sağlamaya dayanır. Yapının girişinde, şebekeye bağlanan D-STATCOM'un DC bağlantı gerilimi (v_{dc}), PCC noktasından alınan AC gerilim (v_{ac1}) ve PCC noktasından alınan reaktif güç (q_{ac}), ilgili ölçüm blokları (Voltage DC, Voltage PCC, Q PCC) aracılığıyla izlenir.

Bu üç ölçüm, merkezi kontrol ünitesi olan VDC/VAC Controller (STATCOM-Control) bloğuna giriş olarak verilir. Bu kontrol bloğu algoritmasındaki gibi, iki ayrı PI kontrol döngüsünden oluşur. Biri DC bağlantı gerilimini sabit tutarak aktif akım referansı olan i_{d_ref} 'i üretir, diğeri ise AC gerilim seviyesini regüle ederek reaktif akım referansı olan i_{q_ref} 'i oluşturur. Bu referanslar, STATCOM'un inverterine yönlendirilerek sistemin ihtiyaç duyduğu aktif ve reaktif güçlerin doğru şekilde karşılanmasını sağlar. Paralel olarak sistemin senkronizasyonunu sağlamak amacıyla PLL (Phase-Locked Loop) bloğu kullanılır. Bu blok, şebekedeki AC sinyalin faz açısını belirleyerek sinüs ve kosinüs referanslarını üretir. Bu referanslar, STATCOM'un üç fazlı akımlarının dq0 dönüşüm matrisleri ile senkron çerçeveye çevrilmesini sağlar. Tüm bu sinyaller son olarak D-STATCOM_PWM_Converter adlı güç elektroniği modülüne aktarılır. Bu evirici verilen referans akım bileşenlerine göre PWM sinyalleri üretir ve bu sinyalleri kullanarak IGBT ya da MOSFET gibi anahtarlayıcılar aracılığıyla şebekeye aktif ve reaktif güç enjekte eder. PWM dönüştürücü, aynı zamanda harmonik içeriğin düşük tutulmasına ve gerilim kalitesinin artırılmasına da katkı sağlar (Jyothi vd., 2021).

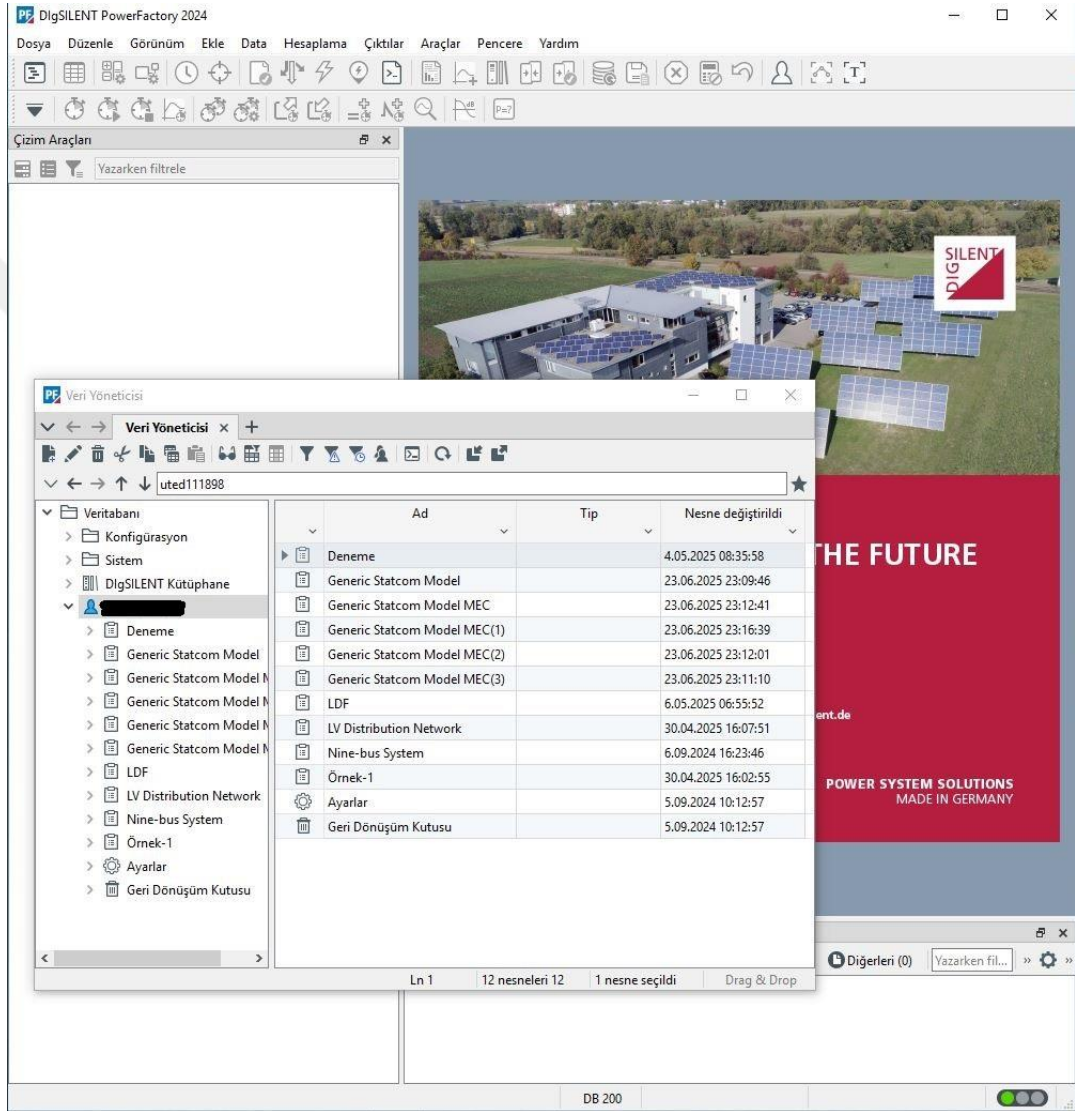
Bu çerçeve yapısı, ölçüm – kontrol – senkronizasyon – dönüştürme adımlarının bir araya getirildiği kompakt ve modüler bir yapıdır. D-STATCOM'un dağıtım sistemlerinde gerilim desteği, reaktif güç kompanzasyonu, gerilim çökmesine karşı koruma ve harmonik bastırma görevlerini yerine getirmesini sağlayan bütünsel bir kontrol mimarisi sunar.

3.3. Simülasyon Ortamı: DIgSILENT PowerFactory

Bu tez çalışmasındaki modelleme ve simülasyonlar, elektrik güç sistemlerinin analizi için endüstri standardı olarak kabul edilen DIgSILENT PowerFactory (DIgSILENT GmbH, 2024) mühendislik yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. “DIgital SImuLation and Electrical NeTwork” ifadelerinin kısaltmasından adını alan bu yazılım, iletim ve dağıtım şebekelerinin planlanması, işletilmesi ve optimizasyonu için bütünleşik ve güçlü bir platform sunmaktadır. PowerFactory'nin tercih edilmesinin temel nedeni, kararlı durum analizlerinden (yük akışı, kısa devre) zaman alanlı dinamik simülasyonlara, harmonik analizlerden koruma koordinasyonuna kadar geniş bir yelpazedeki karmaşık analizleri tek bir çatı altında, yüksek doğrulukla yapabilme kabiliyetidir. Özellikle, bu tezin odak noktasını oluşturan FACTS cihazlarının (D-STATCOM) modellenmesi, dağıtık üretim kaynaklarının entegrasyonu ve güç sistemi

dengeleyicileri (PSS) gibi dinamik bileşenlerin davranışlarının incelenmesi konularında sunduğu gelişmiş yetenekler, onu bu çalışma için ideal bir araç haline getirmiştir.

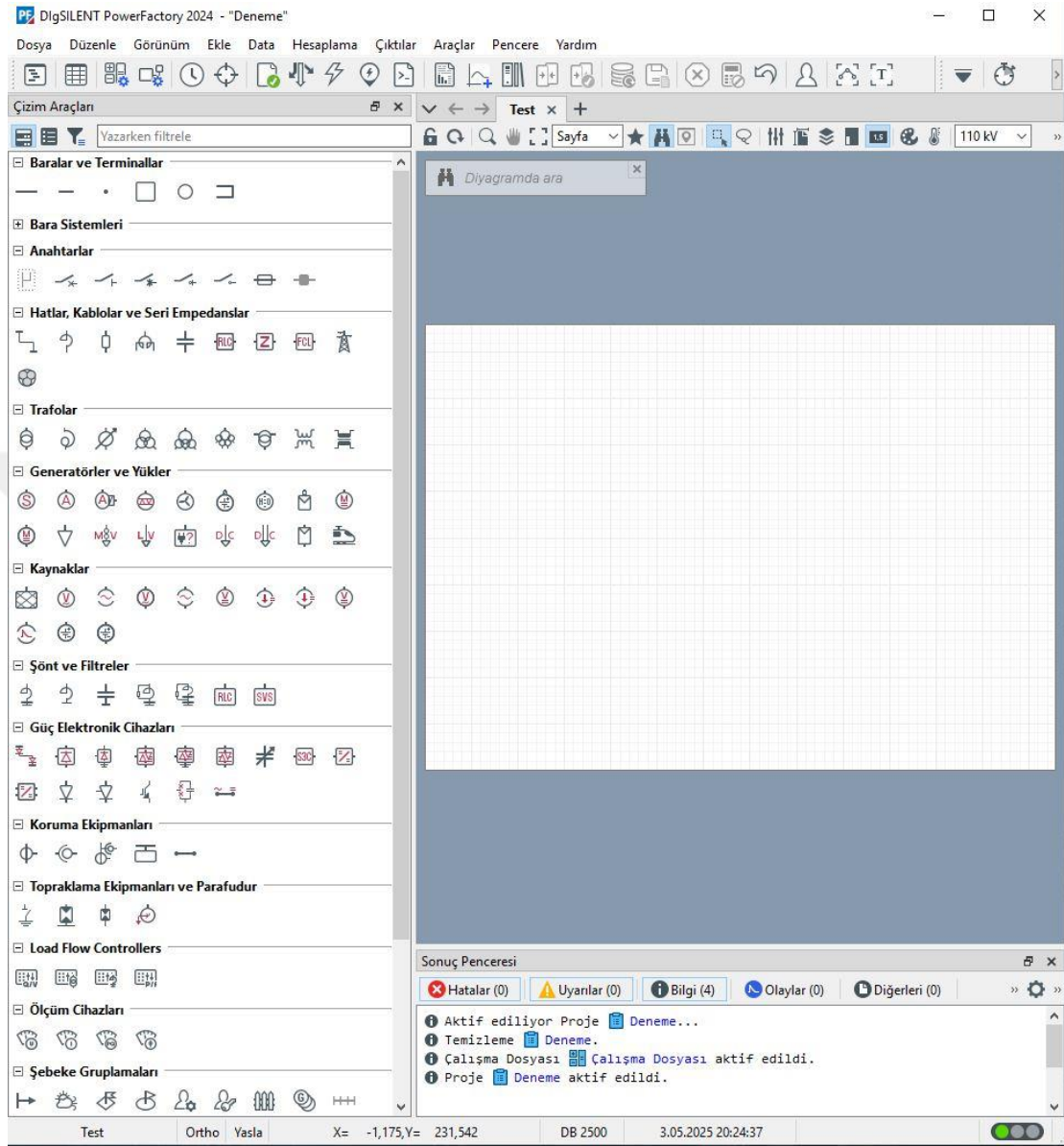
PowerFactory, temel olarak entegre bir veri tabanı konsepti üzerine kurulmuştur. Bu yapı, tüm şebeke elemanlarının, topolojilerin, varyasyonların ve çalışma senaryolarının hiyerarşik bir düzende ve tutarlı bir şekilde yönetilmesini sağlar (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Veri tabanı yöneticisi

Yazılımın grafiksel kullanıcı arayüzü, kullanıcıların şebeke modellerini Tek Hat Şeması (Single-Line Diagram) üzerinde interaktif olarak oluşturmasına olanak tanır (Şekil 3.6). Çizim araç paleti kullanılarak eklenen her bir grafiksel nesne (bara, hat, transformatör vb.), arka planda veri tabanına otomatik olarak işlenir ve topolojik

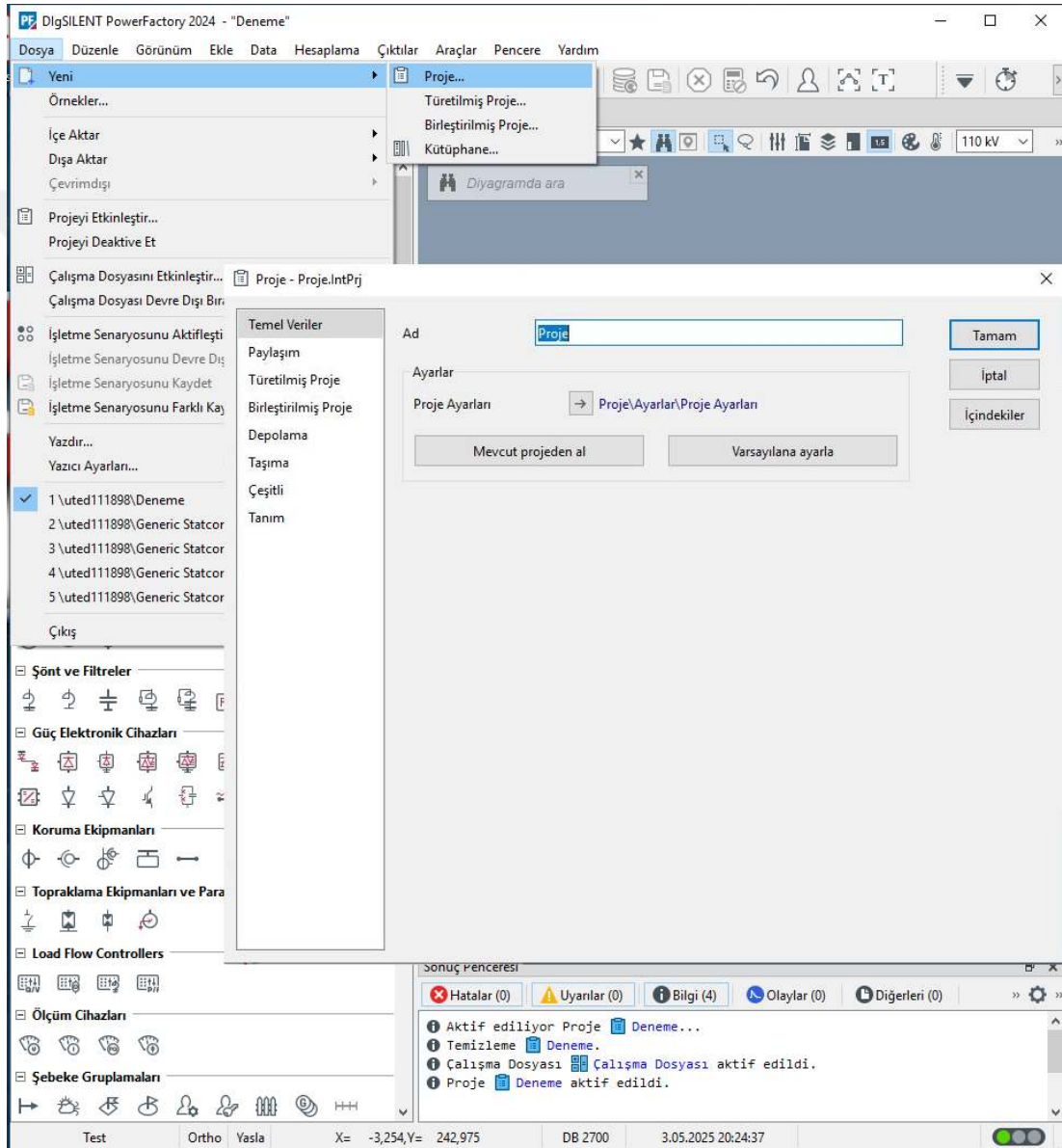
bağlantılar kurulur. Bu entegre yaklaşım hem model oluşturma sürecini hızlandırır hem de veri tutarlılığını garanti altına alır.



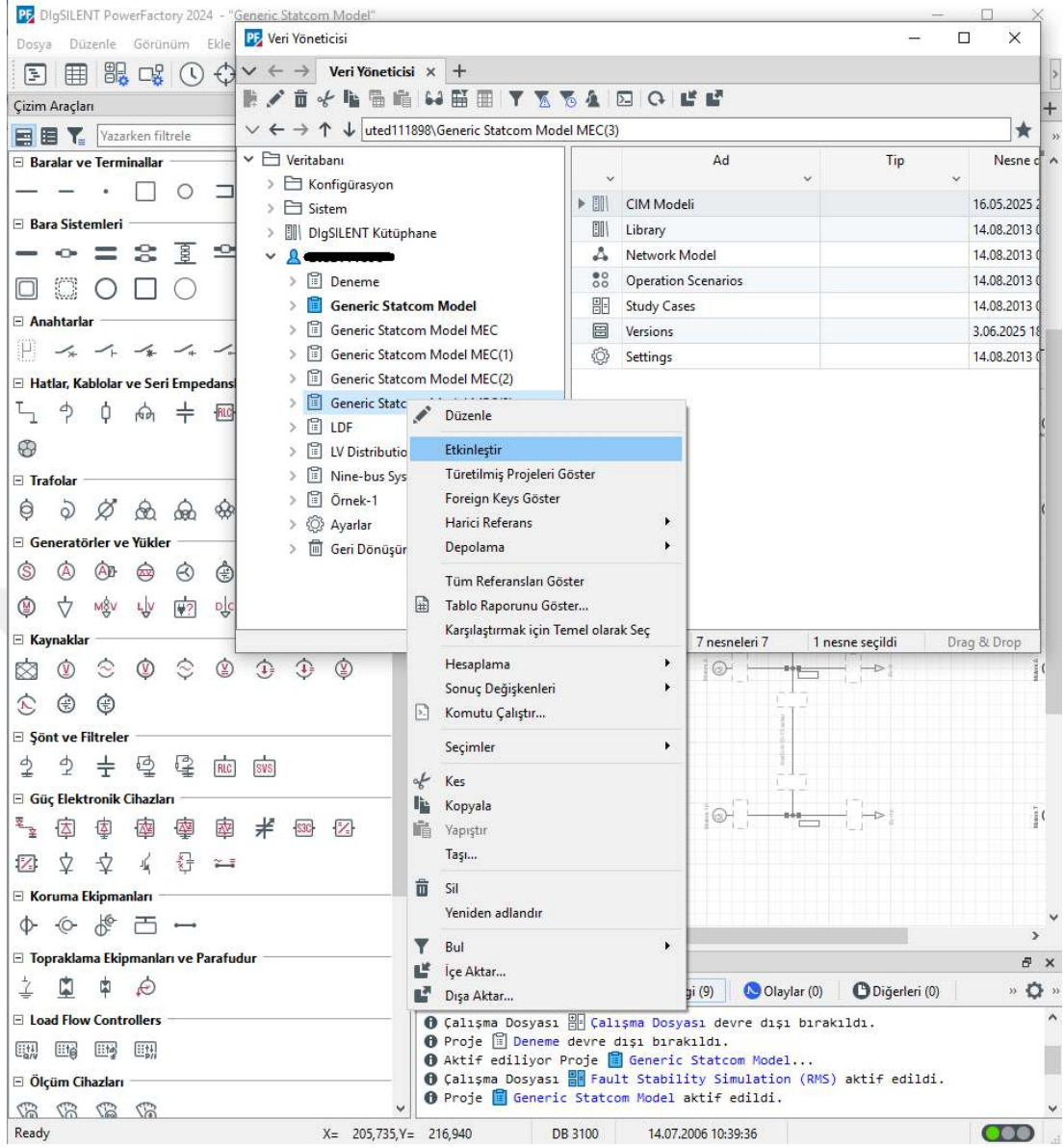
Şekil 3.6. Çizim alanı ve ekipmanlar

Çalışmanın metodolojisi gereği, teze konu olan dağıtım şebekesi modeli PowerFactory ortamında adım adım oluşturulmuştur. Öncelikle yeni bir proje ve bu projeye ait bir çalışma senaryosu (Study Case) tanımlanmıştır (Şekil 3.7, Şekil 3.8). Ardından, şebekeyi oluşturan tüm bileşenler (sonsuz bara, transformatör, hatlar, motor ve mesken yükleri) ve bu tezin ana unsuru olan D-STATCOM cihazı, yazılımın zengin kütüphanesinden seçilerek veya kullanıcı tanımlı olarak modele eklenmiştir. Model tamamlandıktan sonra, sistemin kararlı durumdaki davranışını analiz etmek için temel bir

araç olan Yük Akışı Analizi gerçekleştirilmiştir. Newton-Raphson tabanlı gelişmiş çözüm algoritması sayesinde, şebekenin herhangi bir işletme noktasındaki gerilim profilleri, hat akımları, güç akışları ve sistem kayıpları hassas bir şekilde hesaplanmıştır. Bu analiz, özellikle tezin ilerleyen bölümlerinde incelenen dinamik simülasyonlar için gerekli olan kararlı başlangıç koşullarının belirlenmesinde kritik bir rol oynamıştır. PowerFactory'nin sunduğu esnek raporlama ve grafiksel sonuç gösterim araçları, analiz sonuçlarının etkin bir şekilde değerlendirilmesini sağlamıştır.



Şekil 3.7. Proje dosyası oluşturma

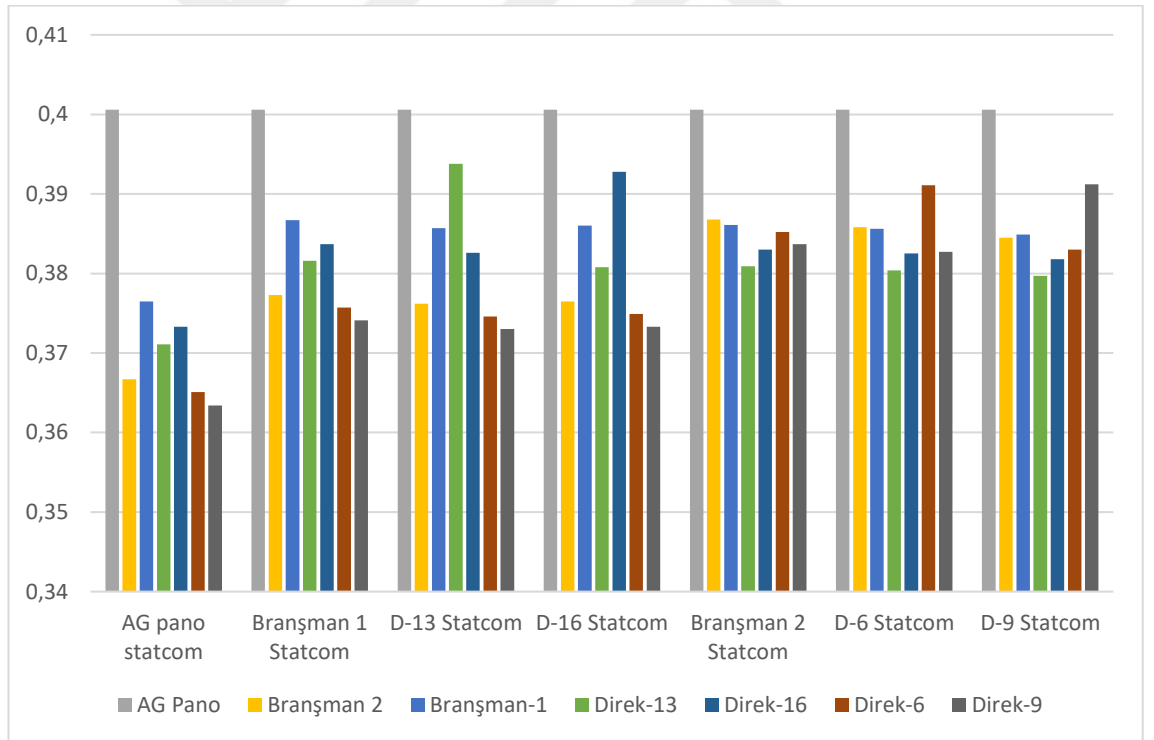


Şekil 3.8. Proje etkinleştirme

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Optimal D-STATCOM Bağlantı Noktasının Belirlenmesi

Bir D-STATCOM cihazının dağıtım şebekesindeki performansı, sadece anma gücü ve kontrol stratejisine değil, aynı zamanda şebekeye bağlandığı konuma da büyük ölçüde bağlıdır. Cihazın gerilim regülasyonu üzerindeki etkisi, özellikle uzun ve dallanmış yapıya sahip radyal hatlarda, bağlantı noktasına göre önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Bu nedenle, D-STATCOM'dan maksimum faydanın sağlanabileceği en etkin bağlantı noktasını belirlemek amacıyla bir yerleşim yeri duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında, D-STATCOM şebeke modeli üzerinde kritik olduğu değerlendirilen 7 farklı noktaya bağlanarak devreye alınmış ve her bir senaryo için şebeke genelindeki gerilim profili yeniden ölçülmüştür. Tüm senaryolardan elde edilen sonuçlar, karşılaştırmalı bir değerlendirme sunmak amacıyla Şekil 4.1'deki grafikte görselleştirilmiştir.



Şekil 4.1. D-STATCOM'un farklı ölçüm noktalarındaki gerilim değişim grafiği

Her bir senaryoda D-STATCOM devredeyken, belirlenen AG Pano, Branşman-1, Direk-13, Direk-16, Branşman-2, Direk-6, Direk-9 gibi toplam 7 farklı noktada fazlar arası gerilim değerleri kaydedilmiştir. Bu ölçüm sonuçları, tüm senaryoları karşılaştırmalı

olarak gösterebilmek için bir grafik halinde özetlenmiştir. Her bir renkli sütun grubu, D-STATCOM'un bağlandığı konuma göre tüm ölçüm noktalarındaki gerilim seviyelerini göstermektedir. Dikey ekseninde ise 0,34–0,41 kV aralığında faz-faz gerilim değerleri yer almaktadır. Gerilim Değişim Grafiğine göre D-STATCOM'un şebeke üzerinde konumlandığı noktaya göre gerilim profilinin belirgin şekilde değiştiği görülmektedir. Transformatöre yakın noktadan (AG Pano veya Branşman-1) uzaklaşırken farklı parametrelere bağlı olarak gerilim düşümünün artarak devam ettiği dikkat çekmektedir. Bu senaryolara ait sayısal gerilim değerleri ve değişim oranları ise Çizelge 4.1'de detaylı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. D-STATCOM'un farklı ölçüm noktalarındaki gerilim değişim tablosu

		Birimi	AG Pano	Branşman 1	Direk-13	Direk-16	Branşman 2	Direk-6	Direk-9
STATCOM Bağlanan Ölçüm Noktaları	İlk Durum	kV	0,3996	0,3687	0,3775	0,3726	0,3745	0,3572	0,3657
	AG Pano	kV	0,4006	0,3667	0,3765	0,3711	0,3733	0,3651	0,3634
		%ΔV	0,25	-0,54	-0,26	-0,4	-0,32	-0,57	-0,63
	Branşman 1	kV	0,4006	0,3773	0,3867	0,3816	0,3837	0,3757	0,3741
		%ΔV	0,25	2,33	2,44	2,42	2,46	2,31	2,3
	Direk-13	kV	0,4006	0,3762	0,3857	0,3938	0,3826	0,3746	0,373
		%ΔV	0,25	1,99	2,13	5,38	2,12	1,98	1,96
	Direk-16	kV	0,4006	0,3765	0,386	0,3808	0,3928	0,3749	0,3733
		%ΔV	0,25	2,07	2,2	2,15	4,66	2,05	2,04
	Branşman 2	kV	0,4006	0,3868	0,3861	0,3809	0,383	0,3852	0,3837
		%ΔV	0,25	4,68	2,23	2,18	2,22	4,67	4,69
	Direk-6	kV	0,4006	0,3858	0,3856	0,3804	0,3825	0,3911	0,3827
		%ΔV	0,25	4,43	2,1	2,05	2,09	6,11	0,3827
	Direk-9	kV	0,4006	0,3845	0,3849	0,3797	0,3818	0,383	0,3912
%ΔV		0,25	4,11	1,92	1,87	1,91	4,13	6,52	

Yapılan karşılaştırmalı analiz sonucunda, D-STATCOM'un şebeke boyunca en verimli çalıştığı yerleşim noktası Branşman-2 noktası olarak belirlenmiştir. Branşman-2 noktası, ana hattın son kısımlarında yer alan ve doğal olarak gerilimin en düşük olduğu noktaların tam ortasında kalmaktadır. D-STATCOM bu noktaya bağlandığında, sistemdeki en zayıf gerilimli bölgeye doğrudan reaktif güç desteği sağlayacağı düşünülmüştür. Grafik bize cihazın Branşman-2 noktasına bağlandığı zaman şebekedeki tüm noktaların gerilimlerinin 0,38 kV civarı ve üzerinde olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle gerilim, hiçbir kritik noktada nominal değer %5 altına düşmemiştir. Bu durum, uzak uçlardaki gerilim düşümünün büyük ölçüde kompanze edildiğini ve tüm hat boyunca gerilim profilinin en dengeli halde olduğunu ortaya koymaktadır.

33 kV dağıtım şebekesi üzerinde yapılan bir çalışmada, gerilimi limit değerleri dışında kalan uç noktaların aday baralar olarak belirlendiği ve en zayıf gerilimli baraya D-STATCOM yerleştirmenin en etkin çözüm olduğu vurgulanmıştır. En düşük gerilimin

görüldüğü Bara 13'ün D-STATCOM için optimum yer olarak seçildiği bildirilmiştir. Bu sayede şebekenin hiçbir noktasında gerilim ihlali kalmamış, tüm düşüm gerilimleri kabul edilebilir aralığa çekilmiştir (Iwuogu vd., 2022).

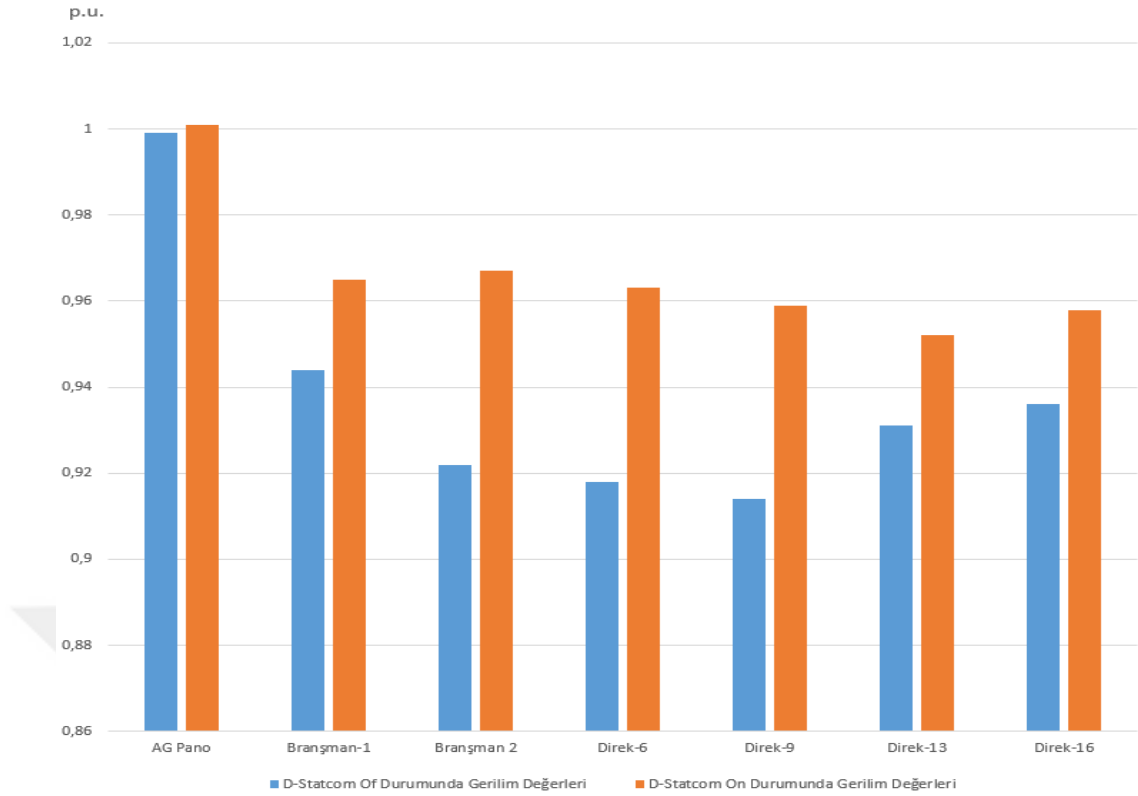
33/0,4 kV'luk örnek dağıtım şebekesinde D-STATCOM'un yeri, gerilim regülasyonu performansı üzerinde kritik bir etkiye sahiptir. Gerilim düşümünü en iyi şekilde regüle etmek için cihazın gerilimin en çok düştüğü uç noktalara yakın konumlandırılması gerektiği ortaya konmuştur. Özellikle Branşman-2 noktasına yerleştirilen 40 kVA'lık D-STATCOM, hat sonundaki gerilimi ~0,38 kV seviyesine çekerek sistem genelinde gerilim profilini düzeltmiştir. Bu yerleşimde, şebekede hiçbir noktada gerilim %95 sınırının altına düşmemiş ve tüm tüketicilere kabul edilebilir kalitede gerilim sunulabilmiştir.

4.2. Dinamik Performans Analizi: D-STATCOM'un Sistem Üzerindeki Etkileri

4.2.1.D-STATCOM'un Devrede Olduğu ve Devrede Olmadığı Durumlarda Sistemin Tepkisi

Bu çalışma senaryosunda, şebeket tek hat şemasından uç noktalarda bulunan toplam beş adet asenkron motor yükü (Motor-1, Motor-6, Motor-9, Motor-13 ve Motor-16) dağıtım şebekesine 20'şer saniyelik aralıklarla devreye alınmakta ve çıkartılmaktadır (motorların devreye giriş-çıkış anları: 20. s, 40. s, 60. s, 80. s ve 100. s). Şebekenin AG Pano, Branşman-1, Branşman-2, Direk-6, Direk-9, Direk-13 ve Direk-16 noktalarındaki faz-faz gerilim değişimleri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Bu ölçüm noktalarında, D-STATCOM devrede değilken (kompanzasyon olmadığında) ve D-STATCOM devredeyken (aktif gerilim desteği sağlandığında) oluşan gerilim profilleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Analiz edilen gerilim değerleri kV cinsinden verilmiş olup zaman eksenini saniye cinsindendir.

Şekil 4.2'de, D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda, AG pano, branşman-1 ve branşman-2 noktası ile Direk-6, Direk-9, Direk-13 ve Direk-16 noktalarında ölçülen gerilimler gösterilmiştir.



Şekil 4.2. D-STATCOM'un şebeke gerilimine tepki grafiği

D-STATCOM'un devrede olmadığı durumda gerilim profilinin, transformatörden uzaklaştıkça belirgin biçimde düştüğü görülmektedir. AG panodaki gerilim $\sim 1,0$ p.u. civarındayken en uzak noktalarda (örneğin Direk-9'da) $\sim 0,91$ p.u. seviyelerine kadar gerilediği görülmektedir. Bu durum, bir dağıtım şebekesinde meydana gelen gerilim düşümünün, hattın uzunluğu ile alakalı olduğunun tipik bir göstergesidir. D-STATCOM devreye alındığında ise uç noktalardaki gerilim değerlerinin yaklaşık olarak 0,95 p.u. düzeyine yükseldiği görülmektedir. D-STATCOM'un uç noktalardaki gerilimleri destekleyerek gerilim çökmesini engellediği ve tüketicilere sunulan enerji kalitesinin iyileştiğinin bir kanıtı olarak değerlendirilmektedir. Mevcut senaryoda da D-STATCOM'un devreye girmesiyle en uzak noktadaki gerilim, nominale çok daha yakın bir seviyeye yükselmiştir. Bu durum kaynağa uzak olan cihazların kararlı ve verimli çalışmasına imkân tanıyacaktır. D-STATCOM devredeyken ve devrede değilken ölçülen gerilim değerleri ile bu değerlerin yüzde olarak değişim oranları ise Çizelge 4.2'de detaylı olarak sunulmaktadır.

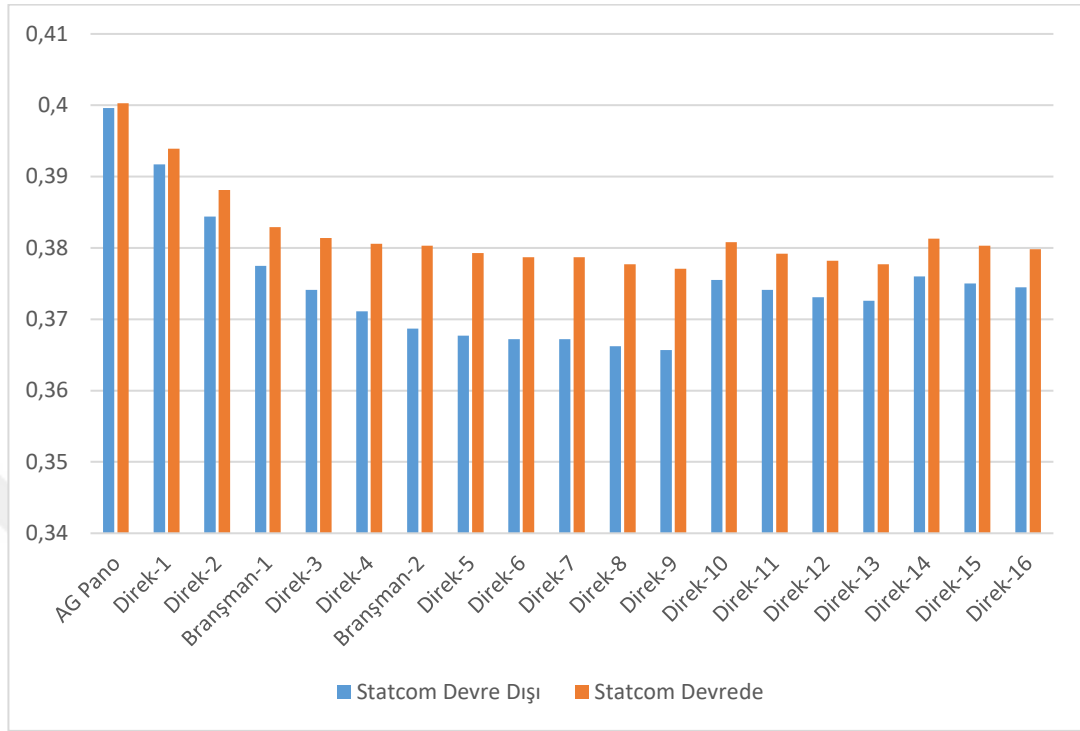
Çizelge 4.2. D-STATCOM'un şebeke gerilimine tepki değerleri

Ölçüm Noktası	D-STATCOM Devrede Değil Gerilim Değerleri (p.u)	D-STATCOM Devrede Gerilim Değerleri (p.u)	Gerilim Değişim Oranı (%ΔV)
AG Pano	0,999	1,001	0,2
Branşman 1	0,944	0,965	2,18
Branşman 2	0,922	0,967	4,65
Direk 6	0,918	0,963	4,67
Direk 9	0,914	0,959	4,69
Direk 13	0,931	0,952	2,21
Direk 16	0,936	0,958	2,3

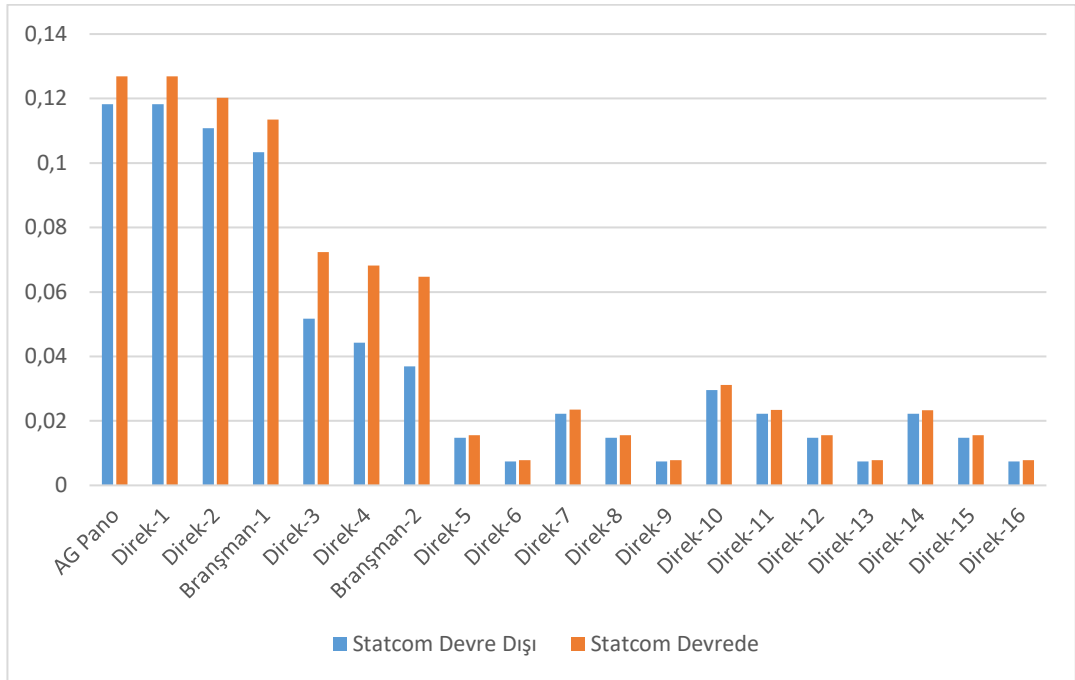
D-STATCOM'un kontrol sistemi, gerilim regülasyonunda belirli limitler dahilinde çalışarak şebeke gerilimini $\pm\%5$ 'lik bir bant içinde (yaklaşık 0,95–1,05 p.u.) tutmayı hedeflemektedir. Bu bant genişliği dağıtım şebekelerinde kabul edilebilir gerilim sınırlarını temsil etmekle birlikte D-STATCOM'un referans değerlerini bu aralıkta ayarlamak, cihazın çalışma performansı açısından önem arz etmektedir. D-STATCOM'un anlık reaktif güç enjeksiyonu, kendi nominal kapasitesi ile sınırlıdır. Dolayısıyla aşırı yük veya çok düşük gerilim durumlarında dahi cihaz tam kapasite çalışsa bile hedeflenen voltaj seviyesine ancak kapasitesi ölçüsünde yaklaşabilmektedir. Bu durum dağıtım şebekesine entegre edilecek D-STATCOM cihazının seçimi yapılırken şebeke analizinin doğru yapılmasının önemini bir kez daha ortaya koymaktadır. D-STATCOM devredeyken sadece son direklerdeki gerilimler değil, şebeke genelindeki gerilim dağılımı da daha dengeli hale gelmektedir. D-STATCOM öncesinde AG pano ile en uzak direk arasında gözlenen gerilim farkı, cihaz devreye girdikten sonra azalmıştır. AG pano (besleme noktası) ile en düşük gerilimli direk arasında yaklaşık 0,09 p.u. fark varken, D-STATCOM devredeyken bu fark yaklaşık 0,04–0,05 p.u.'ya düşmüştür. Bu bize gerilim profilinin düzeldiğini ve dağıtım şebekesinin her köşesine birbirine yakın gerilim değerlerinin ulaştığını göstermektedir.

Gerilimin dengeli dağılımı sayesinde, şebekenin hiçbir noktasında gerilim standartların altına düşmezken (örneğin $\%5$ 'lik düşüş limiti olan $\sim 0,95$ p.u. altına), aynı zamanda yüksek gerilimli herhangi bir bölgede oluşmamıştır. Yani D-STATCOM'un gerilim sapmalarını azaltıp şebekedeki gerilimleri dar bir bant içinde tutarak tüm tüketiciler için daha tutarlı bir gerilim seviyesi sağladığı gözlemlenmiştir. D-STATCOM'un sistem genelindeki etkisini noktasal bazda ve kapsamlı bir şekilde analiz etmek amacıyla, dağıtım hattı üzerindeki her bir direkte yapılan ölçümler, sistemin iki temel senaryosu (D-STATCOM devredeyken ve devre dışıyken) için karşılaştırılmıştır. Şebeke genelindeki gerilim (kV) değişimi Şekil 4.3'te buna bağlı olarak gelişen akım

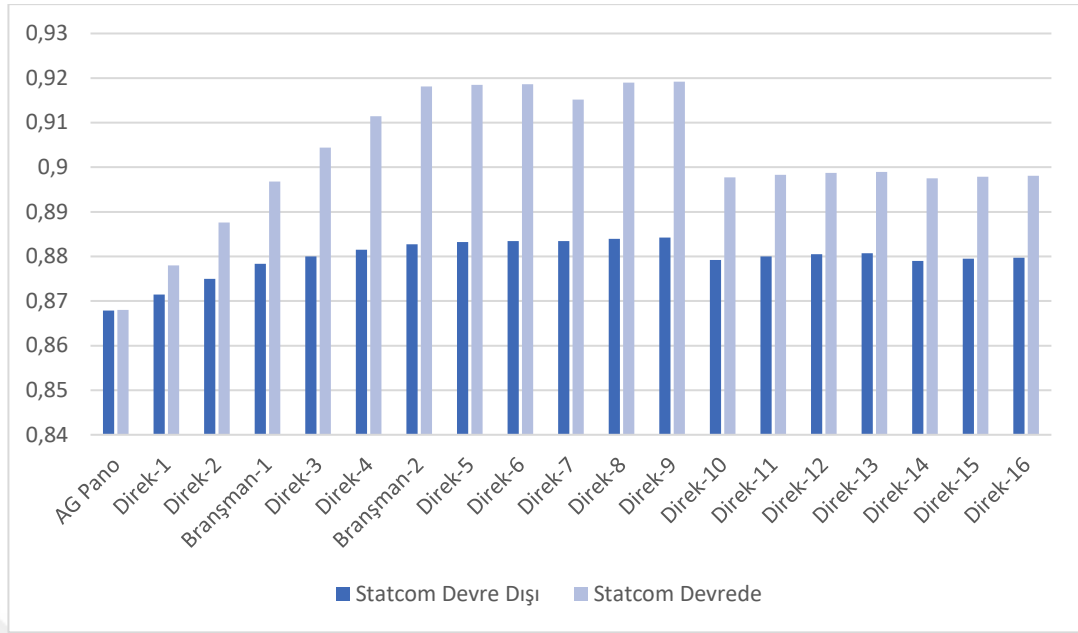
(kA) değişimi Şekil 4.4'te ve son olarak güç faktöründeki ($\cos\phi$) değişim ise Şekil 4.5'te görselleştirilmiştir.



Şekil 4.3. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda gerilim değişimi



Şekil 4.4. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda akım değişimi



Şekil 4.5. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda $\cos(\varphi)$ değişimi

Simülasyon sonuçları, D-STATCOM devre dışı olduğunda sistemde daha belirgin gerilim düşümleri yaşandığını, devreye alındığında ise gerilim profilinin daha kararlı ve yüksek olduğunu göstermektedir. D-STATCOM'un doğru konumlandırılıp çalıştırılması, gerilim profilini düzeltmekte ve güç faktörünü iyileştirmek suretiyle dağıtım şebekesinin performansını artırmaktadır. Örneğin STATCOM devre dışı durumda dağıtım hattının en uzak noktasındaki (Branşman-2) gerilim $\sim 0,3687$ kV seviyesine kadar düşerken, STATCOM devrede iken aynı noktada gerilim $\sim 0,3803$ kV'a yükselmiştir. Bu yaklaşık olarak $0,0116$ kV (yaklaşık %3)'lük artışı ifade etmekte ve D-STATCOM'un reaktif güç enjeksiyonu yaparak hatta kaybolan gerilimi geri kazandığını göstermektedir. Böylece gerilim değeri $0,35$ kV gibi kritik bir seviyenin altına inmeyerek yaklaşık $0,37$ – $0,40$ kV bandında korunmuştur. Nitekim literatürde de benzer şekilde, D-STATCOM olmadan gerilim $0,93$ p.u. düzeyine düşerken STATCOM ile $1,0$ p.u. seviyesinde sabit tutulabildiği rapor edilmiştir (Pandya ve Chudasama, 2013). Bu bulgu, D-STATCOM'un dinamik koşullarda gerilim sarkmalarını önleyip nominal değere yakın bir seviyede stabilize ettiğini teyit etmektedir.

Akım değerleri incelendiğinde ise D-STATCOM devreye girdiğinde hattın bazı noktalarında akan akımın arttığı görülmüştür. Örneğin ana dağıtım panosundaki (AG Pano) hat akımı STATCOM devre dışı iken $\sim 0,1182$ kA, D-STATCOM devrede iken $0,1269$ kA olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde uç noktadaki branşmanda (Branşman-2)

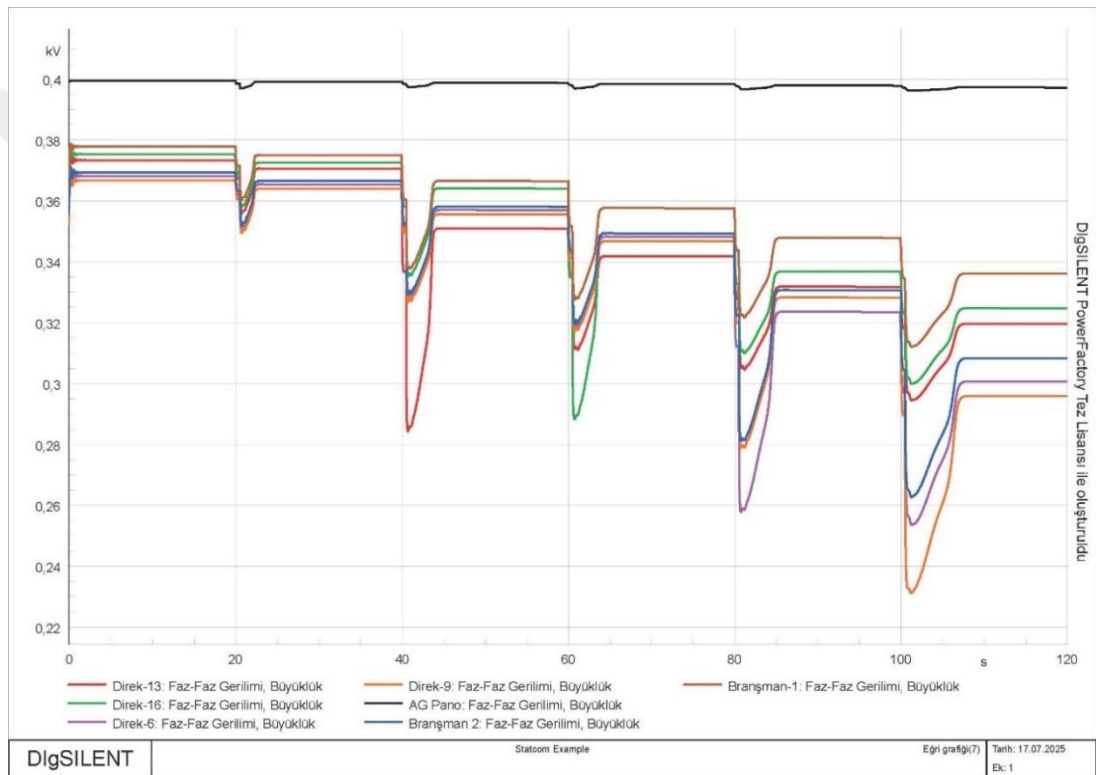
akım değeri 0,0369 kA'dan 0,0647 kA'e (%75 artış) yükselmiştir. Bu artışlar, D-STATCOM'un devrede olduğu durumda gerilim düşümünün azalması sayesinde yüklerin daha fazla akım çekebilmesiyle açıklanmaktadır. Buna karşın şebekenin beslediği reaktif akım bileşeni azalmakta, dolayısıyla kaynak tarafındaki akımın güç faktörü iyileşmektedir. D-STATCOM hat akım profiline stabilite kazandırmış, AG panoda akımı değiştirmeden uzak noktalarda voltaj desteği sağlarken, motorun çektiği ani akımları şebeke yerine kendi üzerinden karşılama eğilimi göstermiştir. Güç faktörü ($\cos\phi$) verileri de bu kompanzasyon etkisini nicel olarak teyit etmekte ve sistemin genel verimliliğindeki artışı kanıtlamaktadır. Branşman-2 noktasında D-STATCOM devrede olmadığına $\cos\phi \sim 0,883$ seviyesinde iken D-STATCOM devreye girdiğinde ise $\cos\phi \sim 0,918$ 'e yükselmiştir. Bu sayede sistemin genel güç katsayısı, ağır endüktif yük koşullarında $\sim 0,80$ seviyelerine düşebilecekken, D-STATCOM ile $\sim 0,93$ düzeyine çıkarılarak hedeflenen $\cos\phi=1$ değerine oldukça yaklaşmıştır. Zaten D-STATCOM, dağıtım şebekelerinde güç faktörünü düzeltmek ve gerilimi sabit tutmak amacıyla kullanılan etkili bir şönt cihazdır (Kabalcı ve Taşdemir, 2021). D-STATCOM'un sisteme entegrasyonu, reaktif gücün azaltılması ve güç faktörünün iyileştirilmesi açısından etkin bir çözüm sağlamış, şebekenin genel verimliliğini artırmıştır. D-STATCOM devreye alındığında gerilim sarkmalarının büyük ölçüde giderildiği, hat kayıplarının azaldığı ve sistem kararlılığının arttığı literatürde de belirtilmektedir (Bhattacharya, 2012). Bu da incelenen sistemde D-STATCOM'un dinamik tepkilerinin, güç kalitesini artırma ve kararlı bir işletim sağlama yönünde kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

4.2.2. D-STATCOM'un Devrede Olduğu ve Devrede Olmadığı Durumlarda Motorların Devreye Alınması

Bu bölümde, D-STATCOM'un sistemin dinamik davranışına olan etkisini, kademeli motor yüklerinin devreye alınması senaryosu altında incelemek amacıyla bir zaman alanı simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Senaryo kapsamında, şebekenin farklı noktalarına dağıtılmış olan Motor-1, Motor-6, Motor-9, Motor-13 ve Motor-16 yükleri, sırasıyla 20, 40, 60, 80 ve 100. saniyelerde sisteme dahil edilmiştir. Bu geçici rejim olayları sırasında sistemin gerilim tepkisini gözlemlemek amacıyla, AG Pano, Branşman-1, Branşman-2 ve hat üzerindeki diğer kritik düğüm noktalarında faz-faz gerilim değerleri kaydedilmiştir. Analizin temelini, D-STATCOM'un etkinliğini doğrudan ortaya koymak üzere tasarlanmış iki ana senaryonun karşılaştırılması oluşturmaktadır: (1) D-STATCOM'un devrede olmadığı durum ve (2) D-STATCOM'un devrede olduğu durum.

Karşılaştırmanın geçerliliği için her iki senaryoda da motorlar eş zamanlı olarak devreye alınmıştır.

Şekil 4.6, D-STATCOM'un devrede olmadığı temel senaryoda, sisteme kademeli olarak motor yüklerinin dahil edilmesine şebekenin verdiği dinamik gerilim tepkisini göstermektedir. Grafikte, her bir motorun devreye alındığı 20 saniyelik periyotlarda (20s, 40s, 60s vb.) tüm ölçüm noktalarında ani gerilim düşüşleri meydana geldiği açıkça görülmektedir. Bu sarkmaların temel nedeni, asenkron motorların kalkış anında şebekeden çektiği yüksek demeraj akımıdır. Bu sarkmaların genliği, ölçüm noktasının şebeke içindeki konumuna göre değişmektedir (Yılmaz vd., 2002).

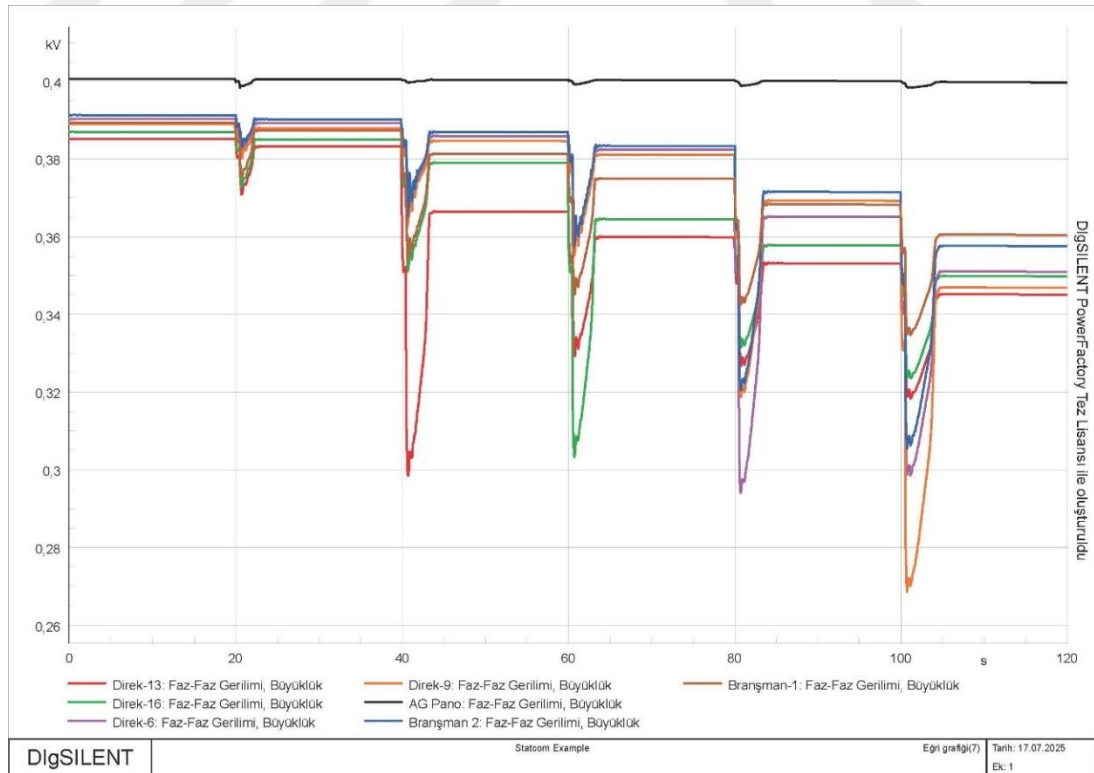


Şekil 4.6. D-STATCOM'un devrede olmadığı durumda motorların devreye girmesi

Özellikle şebekenin uç noktalarında (örneğin Direk-13, Direk-16 ve Direk-9 noktalarında) gerilim düşüşlerinin daha derin olduğu dikkat çekmektedir. 5. motor da devreye alındığında, gerilim değerinin en düşük seviyesine yani 0,34 kV civarına (nominal gerilimin %85'i seviyesine) kadar düştüğü görülmektedir. Buna karşın, kaynak ucuna yakın AG Pano gerilimi aynı olaylar sırasında daha hafif düşüşler göstermiştir (AG panoda gerilim minimum ~0,38-0,39 kV dolaylarında kalarak nominalin ~%100'üne yakın seyretmiştir). Bu durum, şebekede yük akımının yol açtığı gerilim düşüşlerinin hat empedansı boyunca mesafe ile arttığını, yani kaynaktan uzaklaştıkça gerilim profilinin

ciddi şekilde azaldığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, D-STATCOM devrede olmadığı durumda gerilimin toparlanması daha yavaş olmuş, her bir motora yol verilmesi sonrası gerilimde kısa süreli dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar, motorların kalkınma sürecinde çektiği değişken akımların şebekede oluşturduğu geçici rejimler olarak yorumlanabilir. D-STATCOM devrede değilken sistem gerilimi kararsız bir profil sergilemiş, ardışık motor bağlantılarıyla kümülatif olarak gerilim seviyesi düşerek özellikle uç noktalarda kabul edilebilir sınırların altına gerilemiştir. Literatürde benzer şekilde büyük motor yüklerinin doğrudan devreye alınmasının ciddi gerilim sarkmalarına yol açtığı, bu sarkmaların elektrikli ekipmanlarda aşırı tork darbesi ve koruyucu röle tetiklemeleri gibi sorunlara neden olabildiği vurgulanmaktadır. Örneğin, %10 gibi nispeten küçük bir RMS gerilim azalışı dahi hassas cihazların yanlış çalışmasına veya motorlarda büyük geçici rejim torklarına sebep olabilmektedir (Mohammadi ve Akbari Nasab, 2011). Dolayısıyla, D-STATCOM'un devre dışı olduğu bu senaryoda gözlemlenen %15'e varan gerilim düşümlerinin, dağıtım şebekesinde meydana gelecek güç kalitesi problemlerini de tetikleyebileceği düşünülmektedir.

D-STATCOM'un sisteme entegre edildiği ikinci senaryonun sonuçları, sistemin dinamik davranışında gözlemlenen belirgin iyileşmeyi Şekil 4.7'de ortaya koymaktadır.



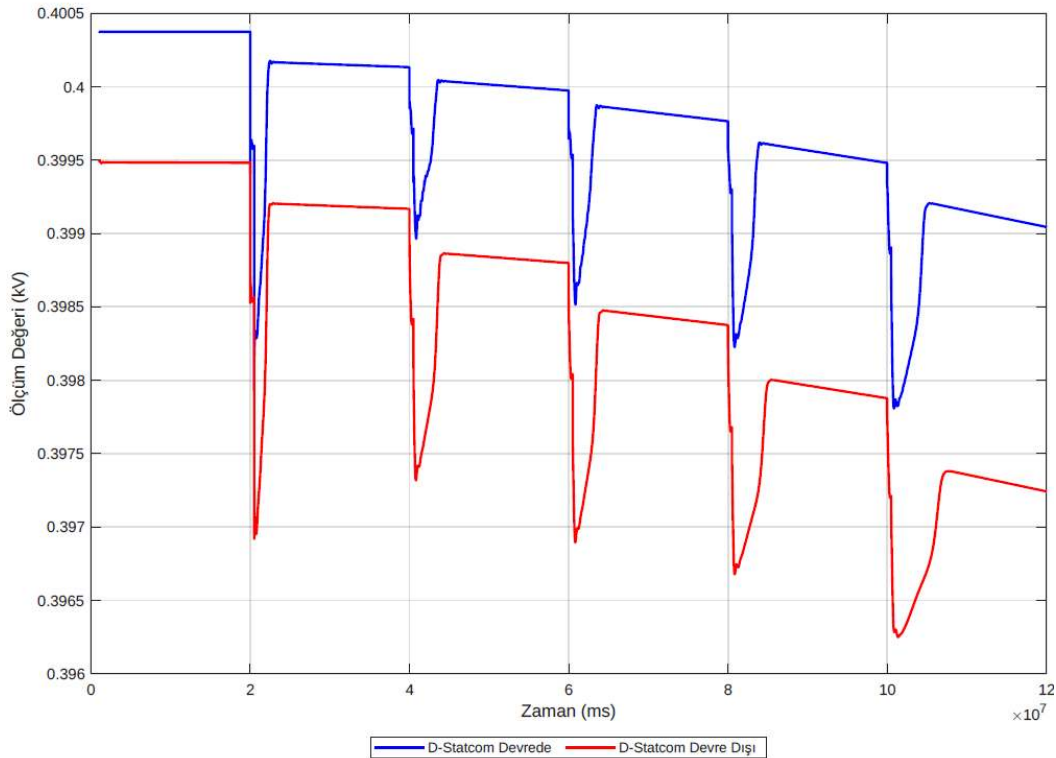
Şekil 4.7. D-STATCOM'un devrede olduğu durumda motorların devreye girmesi

Kompanzasyonsuz duruma kıyasla (Şekil 4.6), motorların devreye alındığı anlarda yaşanan gerilim düşümlerinin genliğinin önemli ölçüde sınırlandırıldığı ve sistemin çok daha kararlı bir profil sergilediği açıkça görülmektedir. Her bir motorun devreye giriş anında yalnızca hafif bir gerilim çökmesi meydana gelmekte ve gerilim değeri kısa sürede tekrar kararlı seviyesine dönmektedir. Özellikle önceki senaryoda en ciddi sarkmaların yaşandığı uç noktalarda dahi gerilimin nominal değere çok yakın kaldığı görülmektedir (en düşük gerilim değerinin $\sim 0,37-0,38$ kV civarında, yani nominalin %97-100 aralığında gerçekleştiği görülmektedir). Bu durum D-STATCOM'un hızlı tepki özelliği sayesinde, motorlara yol verme anında meydana gelen demeraj akımlarının yol açtığı ani voltaj düşüşlerinin anında kompanze edildiğini göstermektedir. Nitekim yapılan literatür taramalarından da D-STATCOM'un dağıtım sistemlerinde gerilim regülasyonunu iyileştirdiği ve voltaj dalgalanmalarını hızla sönümleyebildiği tespit edilmiştir. Ayrıca simülasyon sonuçlarımız da bu genel eğilimi desteklemektedir. D-STATCOM devrede iken sistem gerilimi büyük ölçüde kararlı kalmış, sadece çok küçük geçici sapmalar oluşmuştur. Örneğin, benzer bir çalışma sonuçlarına göre D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlar MATLAB Simulink programında simüle edilmiş, cihaz devrede olmadığı durumunda büyük bir motora yol verme anında gerilim sarkmasının yaklaşık %22 derinliğe kadar ulaştığı ancak cihaz devreye alındıktan sonra gerilim sarkmasının yalnızca %4'e kadar düştüğü raporlanmıştır (Bhakkad ve Deshmukh, 2020). Bu senaryoda da D-STATCOM sayesinde gerilim düşümünün boyutu minimal düzeyde kalmış ve gerilim değeri hızla toparlanarak neredeyse başlangıç seviyesine geri gelmiştir. D-STATCOM'un devrede olduğu durumda geçici rejimlerin süresi kısalmış, dolayısıyla gerilim dalgalanmaları hızlıca sönümlenmiştir.

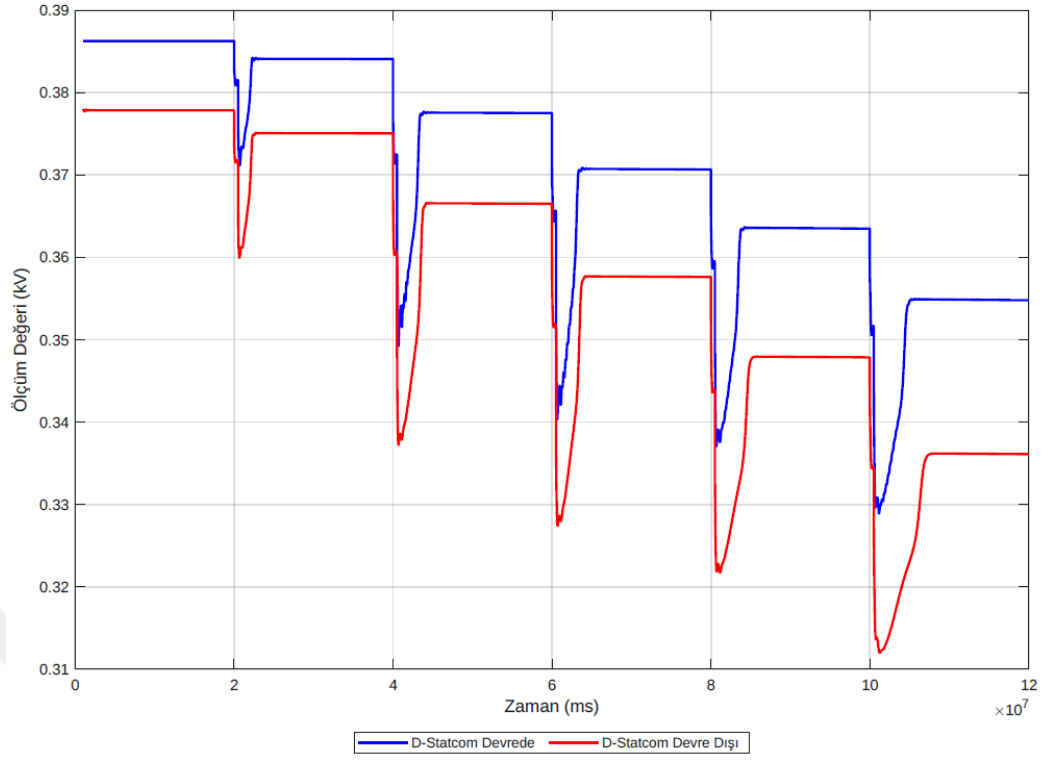
D-STATCOM devredeyken ölçüm noktaları arasındaki gerilim farkları daha homojen bir hal almıştır. Cihaz, bulunduğu noktadan tüm şebekeye reaktif destek sağladığı için, uzak uçlardaki gerilim değeri kaynak ucuna daha yakın seviyelerde tutunabilmiştir. Cihaz devrede olmadığı durumunda AG Pano ile Direk-13 arasındaki gerilim farkı anlık olarak $\sim 0,05-0,06$ kV mertebelerine (yaklaşık %15 fark) ulaşırken, D-STATCOM'un devrede olduğu durumda aynı noktalar arasındaki farkın genellikle $\sim 0,01-0,02$ kV seviyesinde (yaklaşık %3-5) kaldığı söylenebilir. Bu da şebekenin gerilim profilinin düzelmesi anlamına gelmektedir. Uç noktalarda D-STATCOM'un yokluğunda yaşanan gerilim düşmeleri standart limitlerin altına inme riski taşıırken, D-STATCOM devredeyken tüm ölçüm noktaları kabul edilebilir gerilim bandı içinde kalmıştır. Bu

durumun, D-STATCOM'un dağıtım şebekesine entegre edildiği takdirde güç kalitesini artırmada etkili bir çözüm olacağının bir kanıtı olarak değerlendirilmektedir.

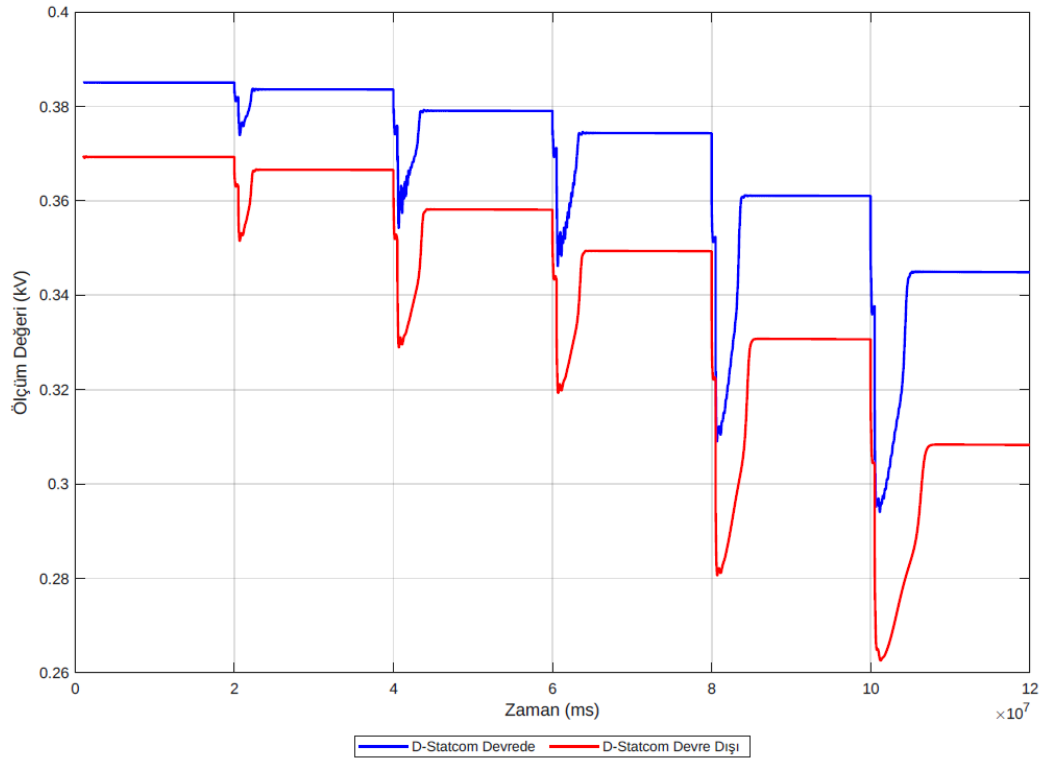
D-STATCOM'un sistemin dinamik performansına olan etkisini noktasal bazda ve daha derinlemesine incelemek amacıyla, kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumlara ait simülasyon sonuçları, şebekenin 7 kritik ölçüm noktasında ayrı ayrı görselleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalı grafikler, D-STATCOM'un sağladığı gerilim desteğinin şebeke üzerindeki dağılımını ve etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Analize besleme kaynağına en yakın noktadan başladığında, AG Panodaki (Şekil 4.8) gerilim düşümlerinin nispeten sınırlı olduğu ve D-STATCOM'un bu noktada mütevazı bir iyileştirme sağladığı görülmektedir. Ancak, kaynaktan uzaklaşıldıkça ve hat empedansı arttıkça, D-STATCOM'un dinamik desteğinin önemi dramatik bir şekilde artmaktadır. Hattın orta noktalarında yer alan Branşman-1 (Şekil 4.9) ve Direk-6 (Şekil 4.11) ile özellikle hattın en sonundaki elektriksel olarak zayıf düğüm noktaları olan Branşman-2 (Şekil 4.10), Direk-9 (Şekil 4.12), Direk-13 (Şekil 4.13) ve Direk-16'da (Şekil 4.14) yapılan ölçümler bu durumu kanıtlamaktadır.



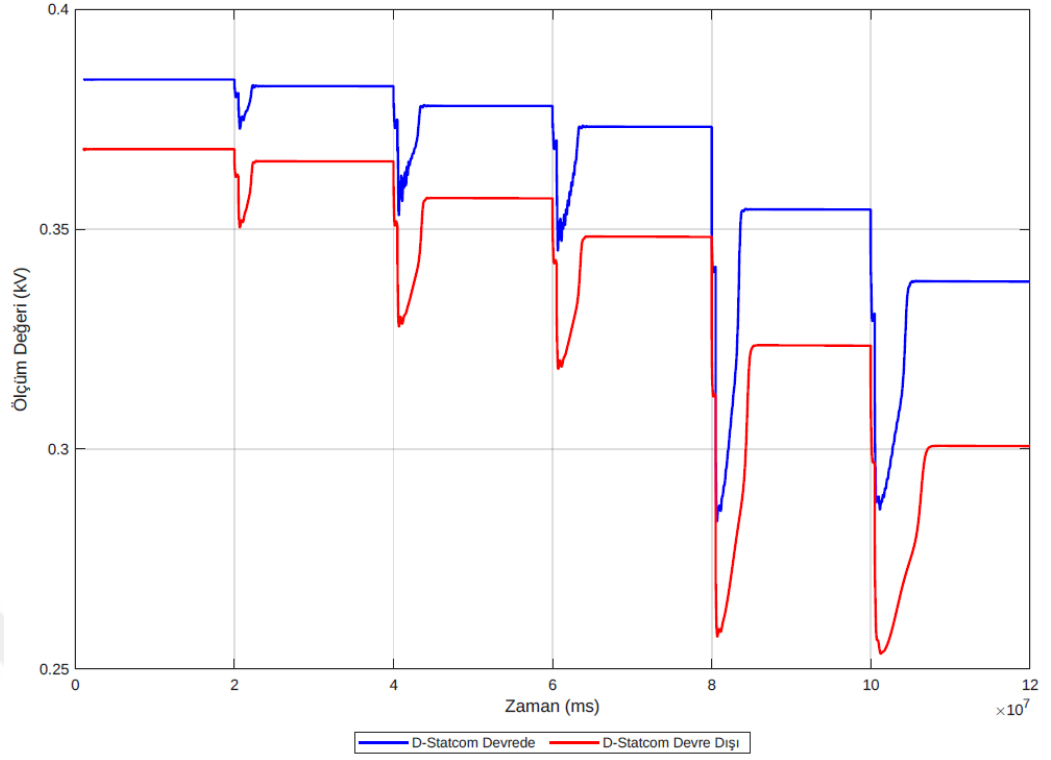
Şekil 4.8. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda AG Pano ölçümü



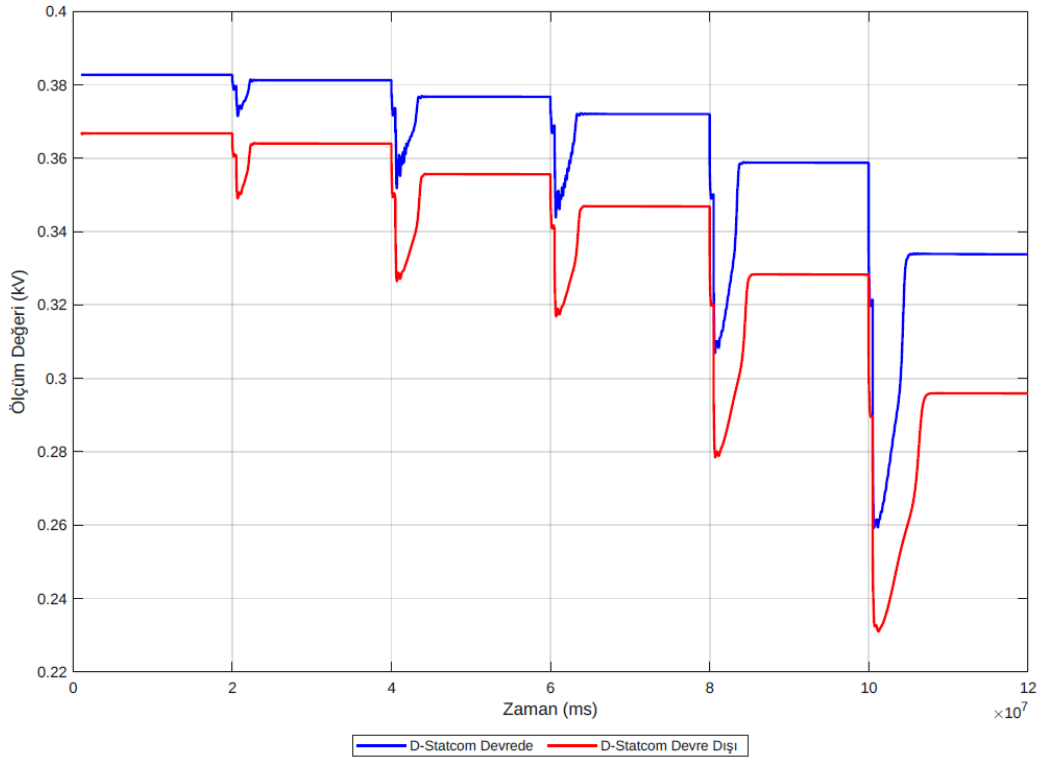
Şekil 4.9. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda
Branşman-1 ölçümü



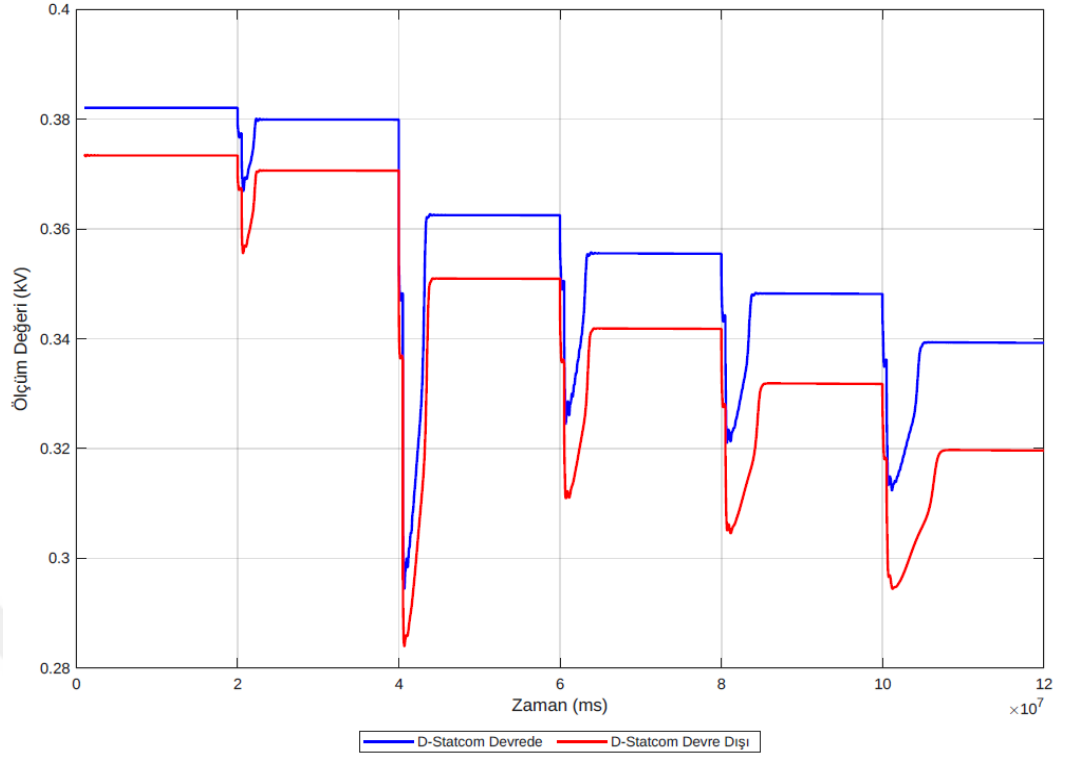
Şekil 4.10. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda
Branşman-2 ölçümü



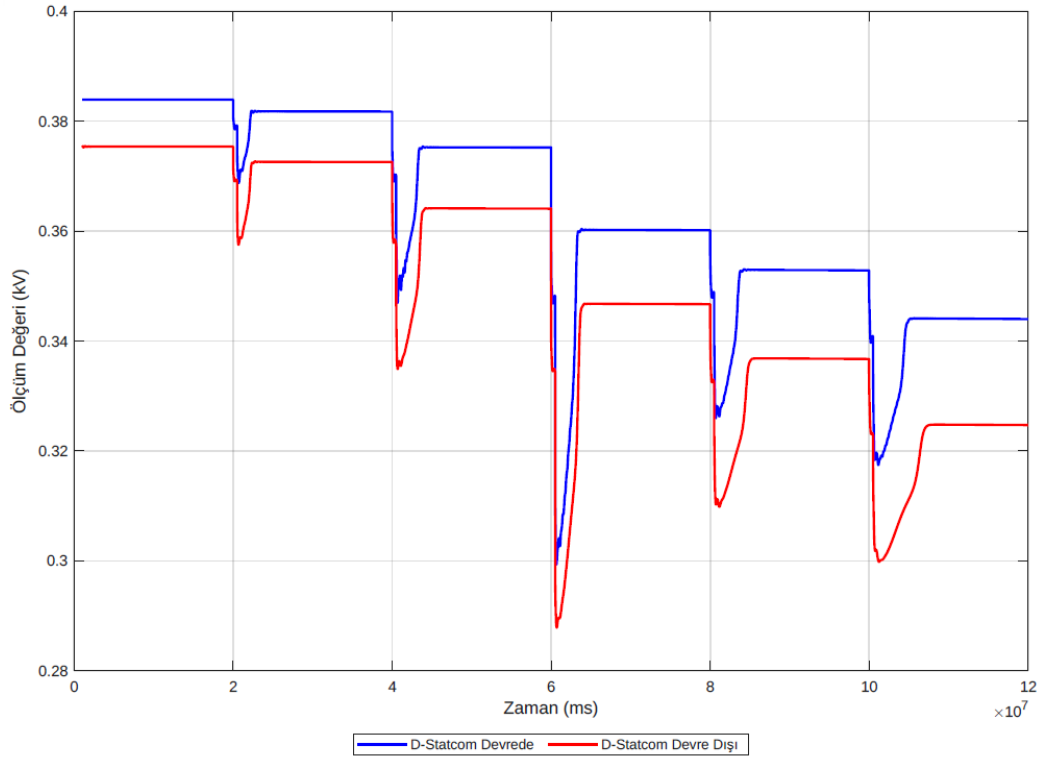
Şekil 4.11. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-6 ölçümü



Şekil 4.12. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-9 ölçümü



Şekil 4.13. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-13 ölçümü



Şekil 4.14. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-16 ölçümü

Genel olarak D-STATCOM devrede olmadığı senaryoda, her bir motorun şebekeye bağlanması anında tüm ölçüm noktalarında anlık gerilim düşmeleri (voltaj sarkmaları) meydana gelmiştir. Özellikle uzak mesafedeki uç noktalarda bu gerilim sarkmalarının daha derin olduğu görülmüştür. Beşinci ve son motorun da devreye girmesiyle en zayıf noktadaki gerilim anlık olarak $\sim 0,34$ kV seviyesine (nominal gerilimin yaklaşık %85'ine) kadar düşmüştür. Buna karşın şebekenin kaynak ucuna yakın noktasında (AG Pano) gerilim, aynı olaylar sırasında minimum $\sim 0,38\text{--}0,39$ kV civarında kalarak nominal değerin ~ 100 'üne yakın seyretmiştir.

D-STATCOM devrede olduğu durumda ise şebeke gerilimindeki tepki karakteristiğinin belirgin biçimde iyileştiği görülmüştür. Dinamik gerilim destek cihazı D-STATCOM, motorlara yol verme anlarında sisteme anlık ve yüksek hızda reaktif güç enjekte ederek gerilim düşümlerini sınırlandırmaktadır (Ramamurthy vd., 2018). Her bir motorun devreye giriş anında yalnızca hafif bir gerilim sarkması meydana gelmekte ve gerilim kısa sürede tekrar kararlı seviyesine dönmektedir. Özellikle önceki senaryoda en ciddi voltaj düşüşlerinin yaşandığı uç noktalarda dahi gerilimin nominale çok yakın kaldığı gözlemlenmektedir (D-STATCOM devredeyken ölçülen en düşük faz-faz gerilim değeri $\sim 0,37\text{--}0,38$ kV civarındadır, yani nominal gerilimin yaklaşık %97–100 aralığı). Bu sonuç, D-STATCOM'un hızlı tepki özelliği sayesinde motor yol verme esnasındaki ani voltaj düşüşlerini anında kompanze ettiğinin bir kanıtıdır.

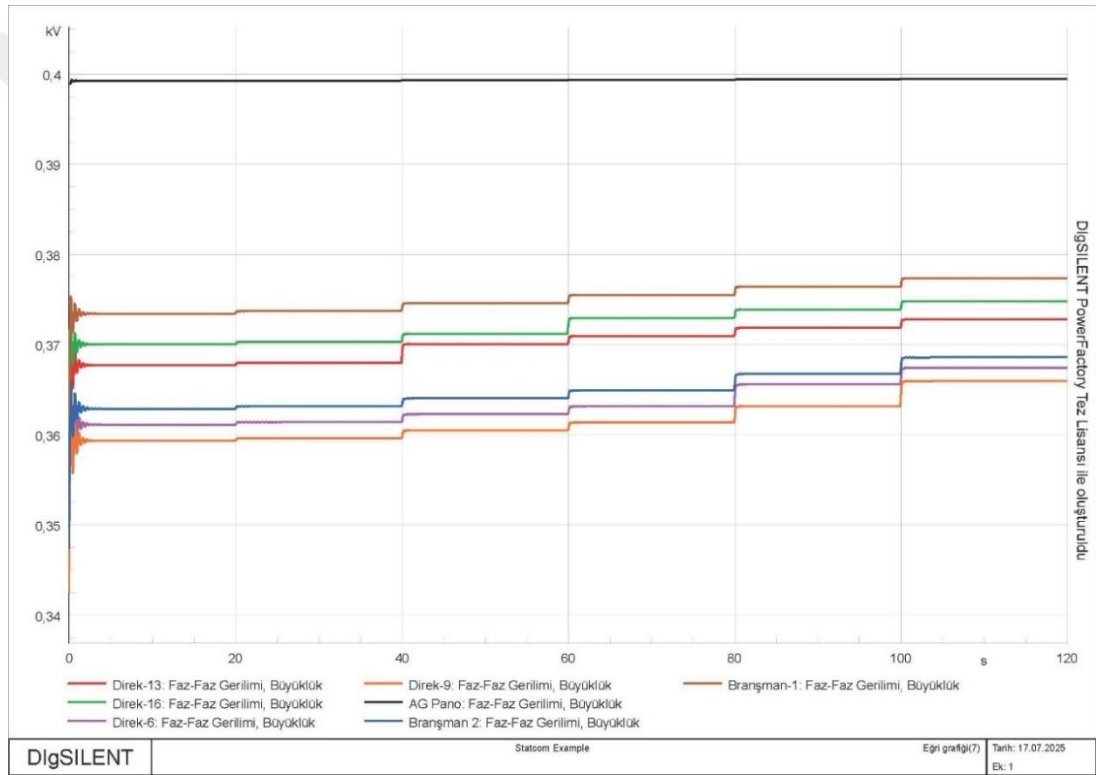
4.2.3.D-STATCOM'un Devrede Olduğu ve Devrede Olmadığı Durumlarda Motorların Devreden Çıkarılması

Dal-budak dağıtım şebekesi yapısı aynı kalmak şartıyla, DIgSLIENT PowerFactory programında tasarlanan alçak gerilim dağıtım şebekesi dinamik simülasyonunda, motor yüklerinin ani olarak devreden çıkarılması yani motor bağlantısının aniden kesilmesi, şebekeden çekilen aktif ve reaktif gücün aniden azalmasına sebep olacağından kısa süreli gerilim yükselmeleri (swell) ve dengesizliklere yol açmaktadır. Bu durum da gerilim profillerinde dalgalanmalara ve güç kalitesi sorunlarına yol açabilmektedir. Yapılan dinamik simülasyon çalışmasında, böyle bir senaryonun oluşması halinde dağıtım sisteminin gerilim tepkisi incelenmiş ve D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumları karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen dinamik simülasyon verilerine dayanarak, dal-budak dağıtım şebekesinde beş adet motor yükünün ardışık olarak devreden çıkarılması sonucunda sistemde oluşan gerilim değişimleri analiz edilmiştir. Motor-1, Motor-6, Motor-9, Motor-

13 ve Motor-16 sırasıyla 20., 40., 60., 80. ve 100. saniyelerde devre dışı bırakılmıştır. Şebekenin 7 farklı noktasında (AG Pano, Branşman-1, Direk-13, Direk-16, Branşman-2, Direk-6 ve Direk-9) faz gerilimleri ölçülmüş ve her bir ölçüm noktası için elde edilen gerilim zaman eğrileri Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da sunulmuştur.

Model şebekede, önce D-STATCOM’un devrede olmadığı durum ele alınmış, ardından devrede olduğu durum incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Literatürde D-STATCOM’un dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonunu iyileştiren etkin bir güç kalite elemanı olduğu ve yüksek hızlı elektronik kontrol özelliği sayesinde gerilim (sag/swell) problemlerini ve flicker benzeri dalgalanmaları giderebildiği raporlanmıştır (Taşdemir, 2020).

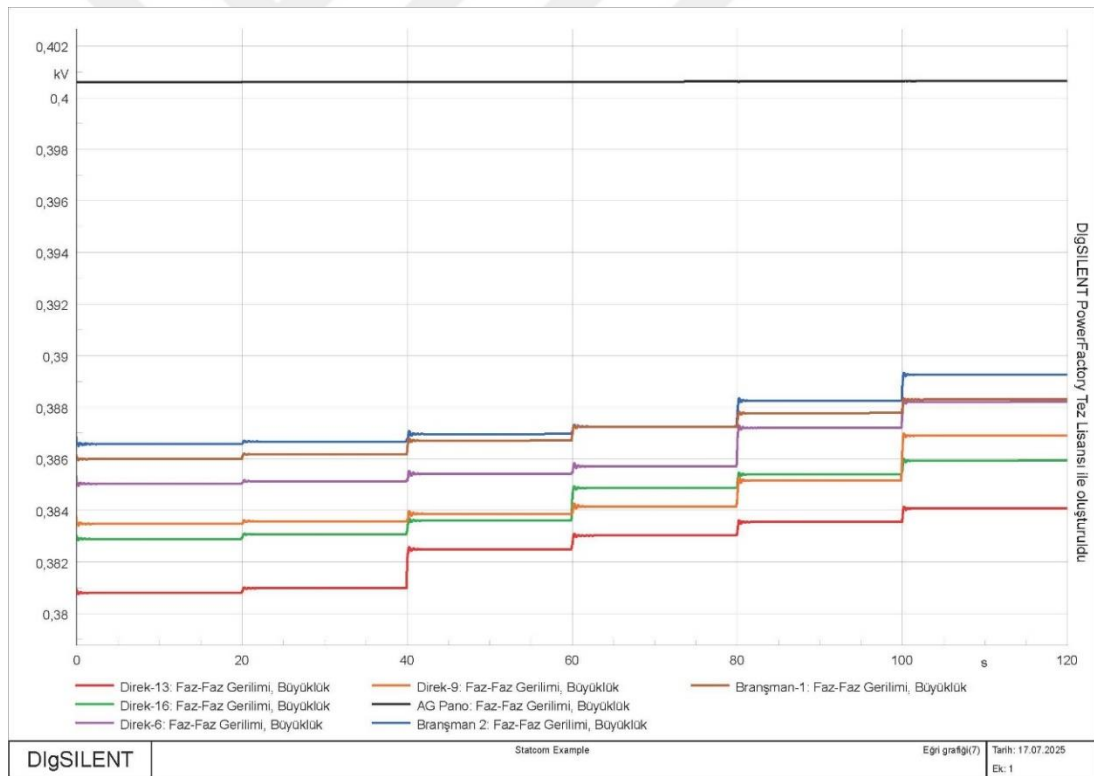


Şekil 4.15. D-STATCOM devrede olmadığı durumda motorların devreden çıkması

D-STATCOM’un devrede olmadığı senaryoda, her bir motorun şebekeden ayrılması sırasında sistem geriliminde belirgin dalgalanmaların meydana geldiği, özellikle yükün azaltılmasıyla birlikte hafif yük koşulu olduğundan, hattın uç noktalarında gerilimde ani artışların (geçici aşırı gerilim) olduğu görülmektedir. Bu durumun uzun hatlardaki endüktans ve kapasite etkisiyle birlikte, az yüklü durumlarda gerilim seviyesinin yükselme eğiliminde olduğu göstermektedir. Nitekim 20. saniyede Motor-1’in devreden çıkmasıyla tüm ölçüm noktalarında gerilimde bir yükselme olduğu,

bunu takip eden 40., 60., 80. ve 100. saniyelerde ise diğer motorların da sırasıyla devreden çıkmasıyla sistem genelinde kademeli bir gerilim artışı meydana geldiği görülmektedir.

Motorların şebekeden ayrılmasının gösterdiği etki, şebekenin farklı noktalarında farklı büyüklüklerde hissedilmektedir. AG pano, şebekenin besleme noktasına en yakın, en yüksek ve en kararlı gerilime sahip noktası olsa da her motor şebekeden ayrıldığında burada dahi küçük de olsa bir artış görülmektedir. Uç noktalarda meydana gelen bu gerilim dengesizliği, D-STATCOM'un devrede olduğu durumda ve kompanzasyon yardımıyla söndürülemediği için hızlı bir şekilde düzelmez ve şebeke ancak transformatör regülasyonu veya doğal yük dağılımı ile zamanla ve yavaşça denge değerine gelmektedir. Bu geçişler sırasında sistemde kısa süreli gerilim dalgalanmaları (flicker) meydana gelmektedir. Gerilim dalgalanmalarının genliği, özellikle uzak ölçüm noktalarında daha büyük olup, bu da ışık titremesi gibi güç kalitesi sorunlarına da yol açabilmektedir.

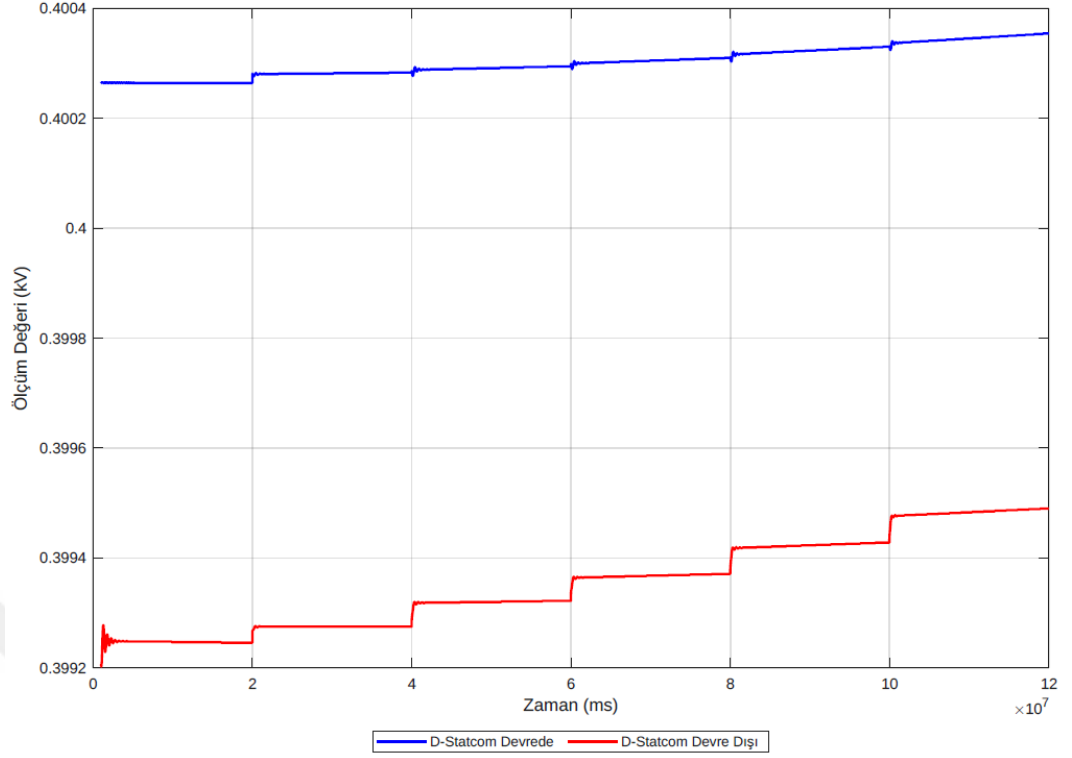


Şekil 4.16. D-STATCOM devrede olduğu durumda motorların devreden çıkması

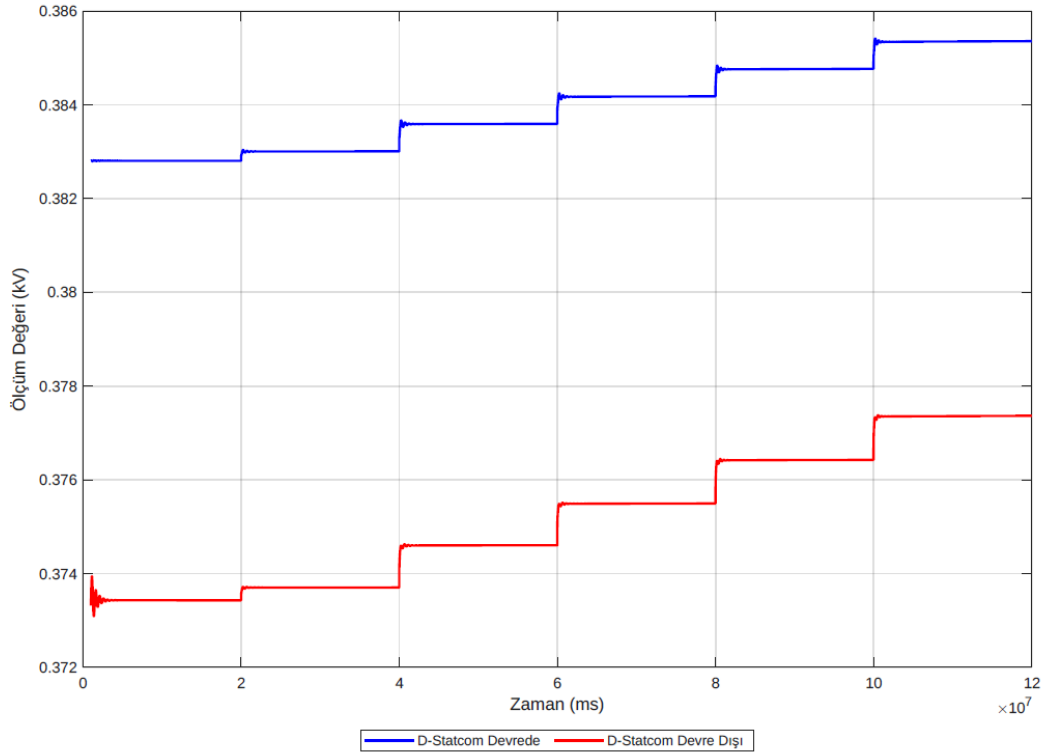
D-STATCOM'un devrede olduğu durumda ise sistem geriliminin davranışının belirgin biçimde iyileştiği, her bir motor devreden çıkarıldığında gerilimde oluşan artışın, önceki senaryoya kıyasla çok daha küçük olduğu ve hızlı bir şekilde söndürüldüğü, gerilim zaman grafiğinin başlangıç noktasında (0. saniye) yani sisteme ilk enerjinin tatbik

edildiği anda, D-STATCOM'un devrede olmadığı durumunda meydana gelen titreşim şeklindeki dalgalanmanın da D-STATCOM'un devrede olduğu durumda oluşmadığı görülmektedir. Örneğin 20. saniyedeki Motor-1 çıkışı anında, D-STATCOM devreye anlık tepki vererek şebekeden çekilen reaktif gücü azaltmakta (ya da gerekirse fazla reaktif absorbe etmekte) ve gerilim yükselmesini bastırmaktadır. Bu sayede AG Pano ve diğer ölçüm noktalarındaki gerilim yalnızca hafif bir yükselme göstermekte, kısa sürede tekrar kararlı değere doğru yaklaşmakta ve büyük bir salınım oluşmamaktadır. Hatta her fazın ihtiyacına göre reaktif güç enjeksiyonu yapabildiğinden, herhangi bir fazda motor çıkışı olduğunda oluşabilecek asimetriyi anında dengeleyebilir. Literatürde de D-STATCOM'un bağlandığı bir dağıtım sisteminde gerilim dalgalanmalarını büyük oranda azalttığı, değişken yüklerin neden olduğu gerilim yükselmesi veya çökmesinin büyük ölçüde giderildiği tartışılmıştır.

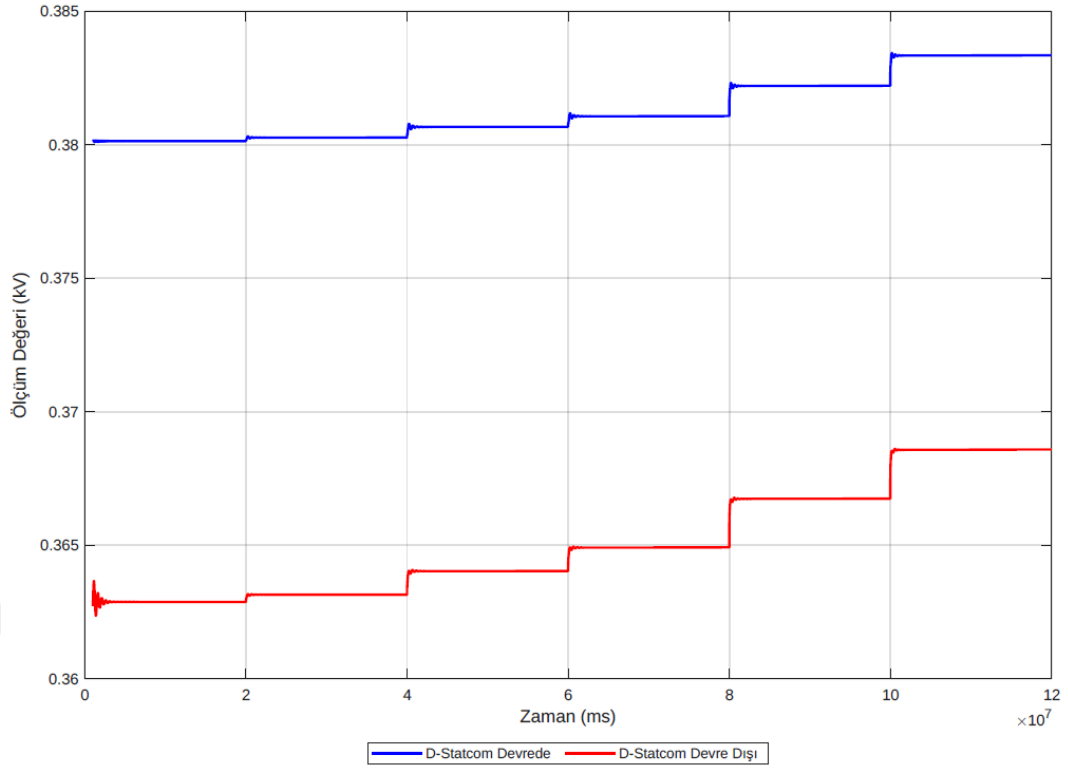
D-STATCOM'un ani yük azalmaları (yük reddi) senaryosundaki performansını noktasal bazda ve detaylı olarak incelemek amacıyla, kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumlara ait simülasyon sonuçları, şebekenin 7 kritik ölçüm noktasında karşılaştırmalı olarak görselleştirilmiştir. Bu grafik serisi, D-STATCOM'un geçici aşırı gerilimleri sönmülemeindeki etkinliğini ve bu etkinliğin şebeke üzerindeki dağılımını açıkça ortaya koymaktadır. Analize besleme kaynağına en yakın noktadan başladığında, AG panodaki (Şekil 4.17) gerilim yükselmesinin her iki senaryoda da sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. Ancak, kaynaktan uzaklaştıkça ve hattın kapasitif etkisi belirginleştikçe, D-STATCOM'un dengeleyici rolü dramatik bir şekilde önem kazanmaktadır. Hattın orta noktalarında yer alan Branşman-1 (Şekil 4.18) ve Direk-6 (Şekil 4.20) ile özellikle hattın elektriksel olarak zayıf olan son düğüm noktaları Branşman-2 (Şekil 4.19), Direk-9 (Şekil 4.21), Direk-13 (Şekil 4.22) ve Direk-16'da (Şekil 4.23) yapılan ölçümler bu durumu kanıtlamaktadır.



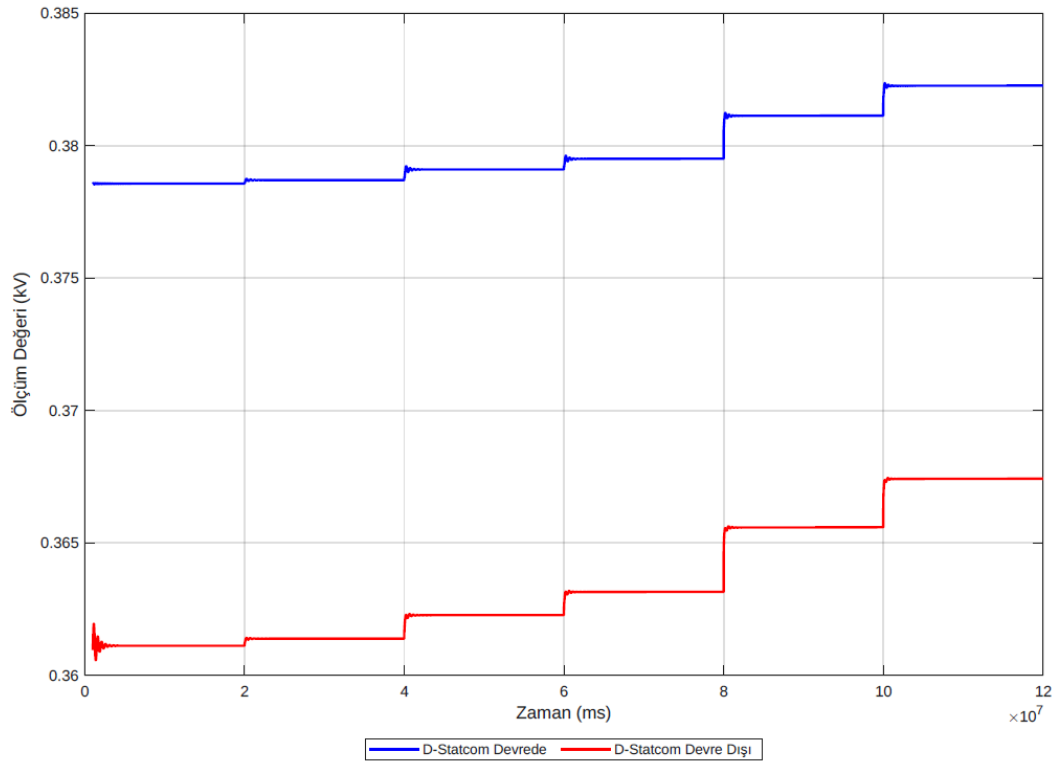
Şekil 4.17. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda AG Pano ölçümü



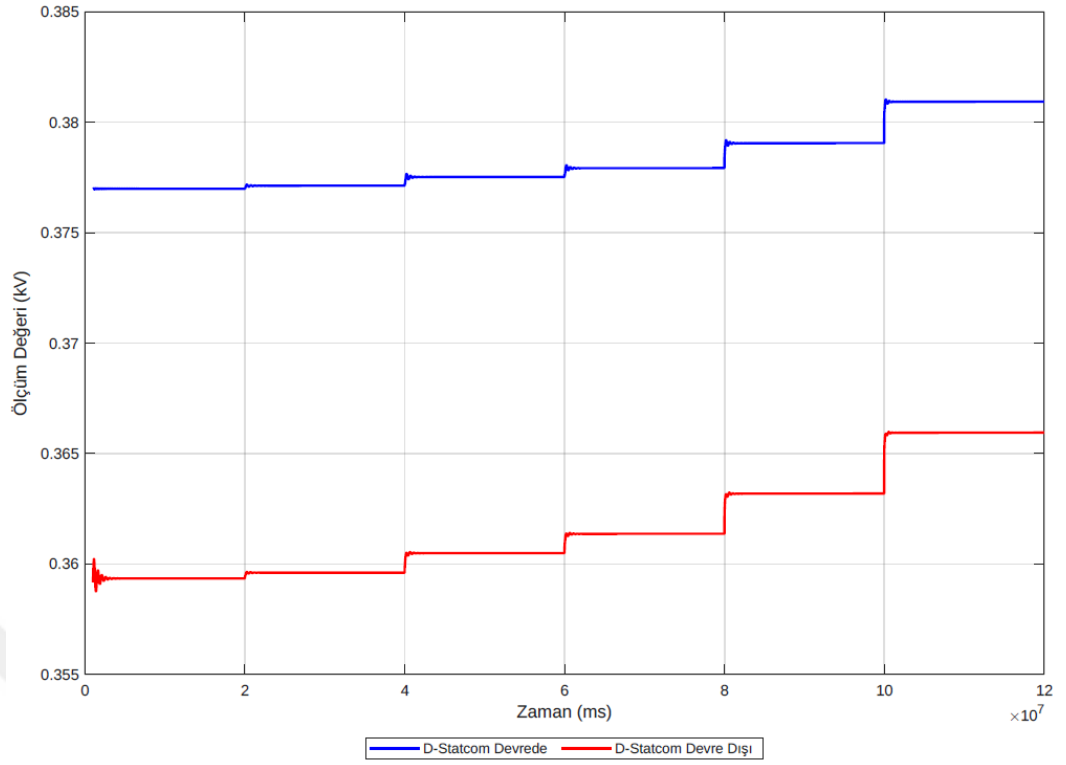
Şekil 4.18. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Branşman-1 ölçümü



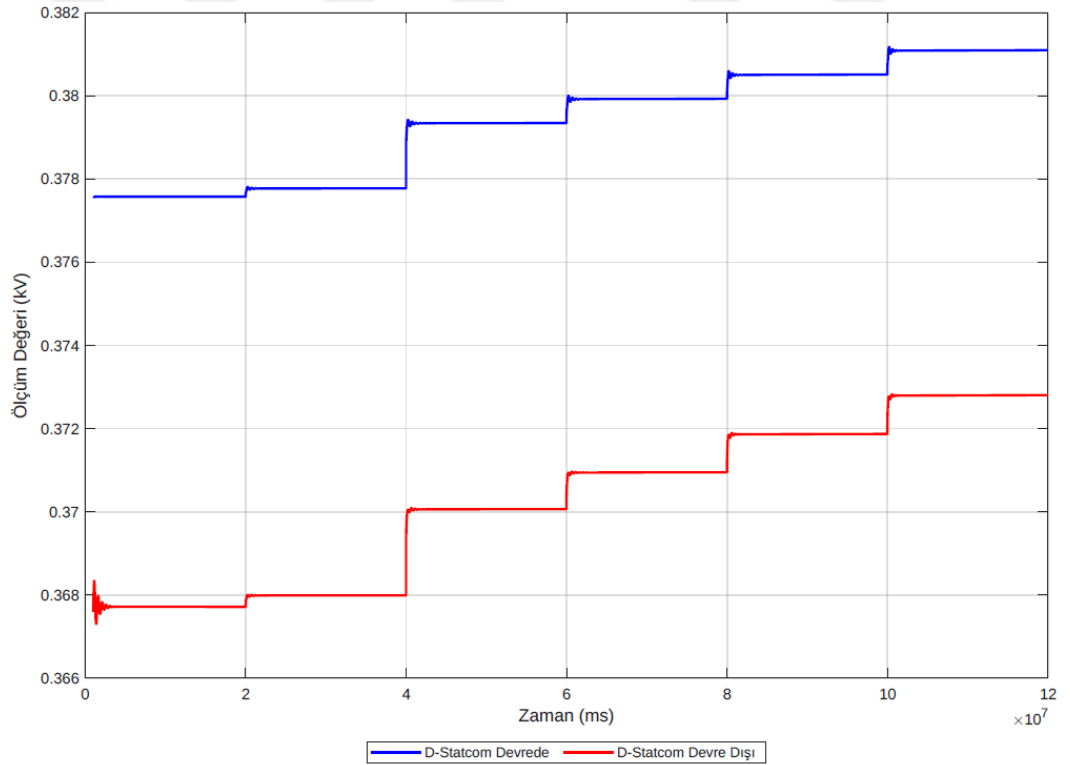
Şekil 4.19. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Branşman-2 ölçümü



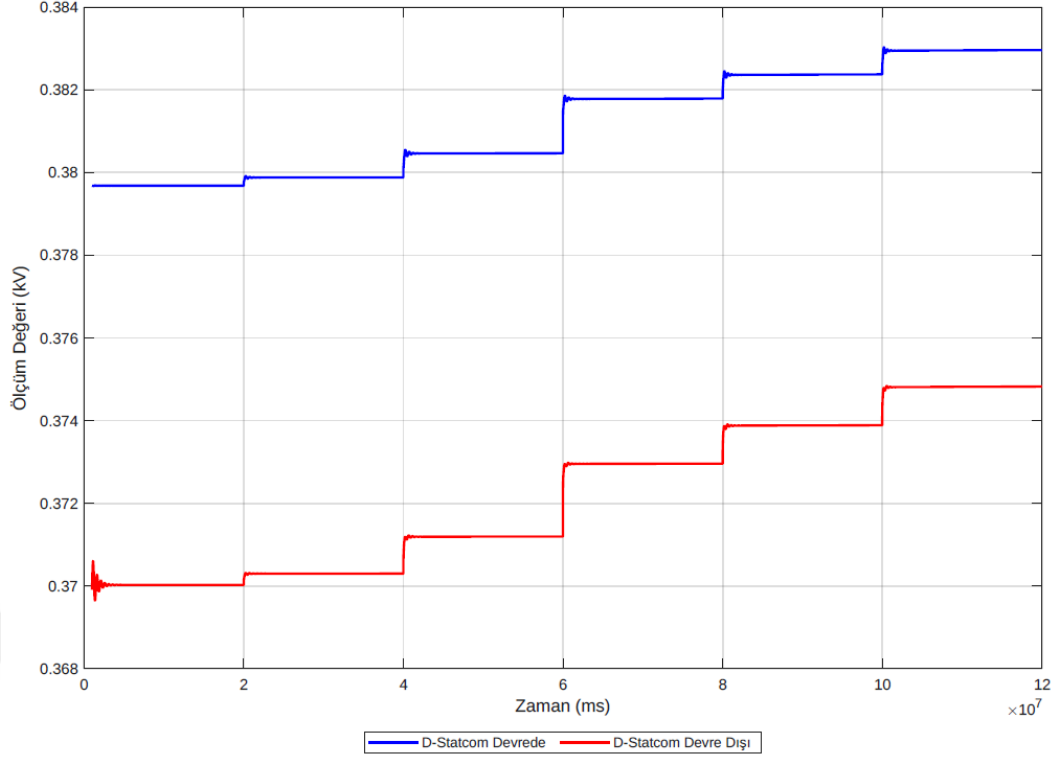
Şekil 4.20. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-6 ölçümü



Şekil 4.21. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-9 ölçümü



Şekil 4.22. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-13 ölçümü



Şekil 4.23. D-STATCOM'un devrede olduğu ve devrede olmadığı durumlarda Direk-16 ölçümü

D-STATCOM'un devrede olmadığı durumda motorların sırasıyla devreden çıkarılması sonucunda şebeke geriliminde kademeli artışlar gözlenmiştir. Örneğin, Direk-16 noktasında başlangıç gerilimi yaklaşık 0,360 kV iken, motorların devreden çıkarılmasıyla bu değer 0,365 kV $\rightarrow$ 0,370 kV $\rightarrow$ 0,374 kV seviyelerine yükselmiştir. Benzer şekilde AG Pano noktasında ölçülen gerilim değeri yaklaşık 0,3992 kV'tan başlayarak 0,3996 kV $\rightarrow$ 0,3998 kV düzeylerine ulaşmıştır. Bu durum, yükün azalması ile hat boyunca gerilim düşümünün azalmasından kaynaklanmaktadır. D-STATCOM devre dışı iken motorların devreden çıkarılması, gerilim değerlerinde artış sağlamış olsa da bu artış sınırlı kalmış ve şebeke boyunca kararlı bir gerilim profili elde edilememiştir.

Aynı koşullar altında D-STATCOM devreye alındığında gerilim değerlerinin daha yüksek ve daha kararlı olduğu görülmüştür. Örneğin, Direk-16 noktasında gerilim değeri 0,368 kV civarında başlamış ve motorların devreden çıkmasıyla kademeli olarak 0,372 kV $\rightarrow$ 0,378 kV $\rightarrow$ 0,382 kV seviyelerine yükselmiştir. Bu değerler, D-STATCOM devre dışı durumuna kıyasla yaklaşık 10–15 V daha yüksek ve daha kararlı bir seviyededir. AG Pano noktasında D-STATCOM'un etkisiyle gerilim değeri 0,4002 kV seviyesinde korunmuş ve kademeli artışlarla 0,4004 kV'a kadar yükselmiştir. Bu değer, cihaz devrede

değilken elde edilen değerlere göre yaklaşık 0,6–0,8 V daha yüksektir. D-STATCOM devrede iken hem gerilim seviyeleri daha yüksek tutulmuş hem de dalgalanmalar minimize edilmiştir. Özellikle uç noktalarda (Direk-13 ve Direk-16) gerilim iyileştirmesi daha belirgin olup, cihazın yük değişimlerine hızlı tepki vererek dinamik regülasyon sağladığı ortaya çıkmaktadır. D-STATCOM'un sağladığı iyileştirme uç noktalarda 10–20 V, AG panosunda ise yaklaşık 0,5–1 V aralığında olmuştur.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, özellikle tarımsal sulama gibi endüktif karakterli dinamik yüklere sahip radyal dağıtım şebekelerinde karşılaşılan gerilim regülasyonu ve güç kalitesi sorunlarının çözümünde D-STATCOM'un etkinliği incelenmiştir. DigSILENT PowerFactory ortamında gerçekleştirilen kapsamlı simülasyonlar, D-STATCOM'un bu tür şebekeler için üstün bir teknolojik çözüm olduğunu net bir şekilde ortaya koymuştur. Çalışma, cihazın sadece teorik faydalarını değil, aynı zamanda pratik uygulanabilirliğini ve şebeke üzerindeki bütünsel etkilerini de gözler önüne sermiştir.

Yapılan analizler, cihazın performansının şebeke üzerindeki yerleşimine ne denli hassas olduğunu göstermiştir. Gerilimin en çok düştüğü ve elektriksel olarak zayıf olan hat sonuna yakın bir noktaya (Branşman-2) konumlandırılan D-STATCOM'un, tüm şebeke genelinde en dengeli ve verimli iyileştirmeyi sağladığı tespit edilmiştir. Cihazın sisteme entegrasyonu, motorların yol alması sırasında gözlemlenen ve nominal değerin %15'ine varan kritik gerilim sarkmaları, milisaniyeler mertebesindeki hızlı reaktif güç enjeksiyonu sayesinde etkin bir şekilde engellenmiştir. Benzer şekilde, yüklerin aniden devreden çıkmasıyla oluşan gerilim yükselmeleri de cihazın dinamik kontrol kabiliyeti ile sönmülenerek sistemin kararlılığı güvence altına alınmıştır. Böylece, D-STATCOM'un varlığında şebeke gerilimi, en zorlu dinamik koşullarda dahi standart tolerans sınırları içinde kalmayı başarmıştır.

Gerilim profilinin iyileştirilmesinin ötesinde, D-STATCOM'un sistemin genel verimliliğine de önemli katkılar sağladığı kanıtlanmıştır. Sistemin güç faktörünü belirgin bir şekilde düzelterek (yaklaşık 0,88'den 0,93 seviyesine çıkararak), iletim ve dağıtım hatları üzerindeki reaktif güç yükünü azaltmış, bu sayede hat kayıplarını düşürmüş ve kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamıştır. Bu çalışma, D-STATCOM'un sadece bir gerilim regülatörü değil, aynı zamanda dağıtım şebekelerinin operasyonel performansını bütünsel olarak iyileştiren çok fonksiyonlu bir güç kalitesi cihazı olduğunu doğrulamaktadır.

Bu çalışmanın bulguları, gelecekteki akademik araştırmalar için verimli bir zemin oluşturmaktadır. Öncelikle, D-STATCOM'un teknik üstünlüğünü tamamlayacak kapsamlı bir maliyet-fayda analizi yapılması, teknolojinin geleneksel şebeke güçlendirme yöntemleriyle ekonomik açıdan karşılaştırılmasına olanak tanıyacaktır. Bunun yanı sıra, yapay zekâ tabanlı adaptif kontrol algoritmalarının geliştirilerek D-STATCOM'un dinamik performansının daha da ileriye taşınması potansiyeli araştırılabilir. Ayrıca, D-

STATCOM'un Bataryalı Enerji Depolama Sistemleri (BESS) ile hibrit bir yapıda kullanılarak hem aktif hem de reaktif güç kontrolü sağlama yeteneği ve harmonik filtreleme performansının nicel olarak incelenmesi, konuya dair literatüre önemli katkılar sunacaktır.

Uygulama alanında ise, bu tez sonuçları elektrik dağıtım şirketleri için önemli bir stratejik girdi sunmaktadır. Özellikle zayıf kırsal şebekelerde, D-STATCOM'un maliyetli ve uzun soluklu altyapı yatırımlarını erteleyebilecek veya gereksiz kılacak bir alternatif şebeke çözümü olarak değerlendirilmesi şiddetle tavsiye edilmektedir. Simülasyon sonuçlarının saha verileriyle doğrulanması amacıyla pilot bir bölgede D-STATCOM uygulamasının hayata geçirilmesi, teknolojinin yaygınlaşması adına kritik bir adım olacaktır. Son olarak, düzenleyici kurumların bu tür modern güç kalitesi çözümlerinin benimsenmesini teşvik edecek mevzuat ve destek mekanizmaları oluşturması, ulusal şebekenin güvenilirliğini ve kalitesini artırma hedeflerine ulaşmada kilit rol oynayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abido, M. A. (2009). Power system stability enhancement using FACTS controllers: A review. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(1B), 153–172.
- Akcanca, M. A., ve Taşkın, S. (2014). Akıllı şebeke uygulanabilirliği açısından Türkiye elektrik enerji sisteminin incelenmesi. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3(4), 396–404.
- Akmaz, D. (2012). *Güç sistemlerinde harmoniklerin incelenmesi ve akım harmoniklerinin azaltılması için aktif güç filtre tasarımları. (Yüksek Lisans Tezi).* Tunceli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli.
- Andersen, B. R., ve Nilsson, S. L. (Eds.). (2020). *Flexible AC transmission systems (FACTS)*. CIGRE Green Books. Springer. <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-35386-5>
- Atmaca, H. (2020). *Alçak gerilim tesislerinde reaktif güç kompanzasyonu. (Yüksek Lisans Tezi).* Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.
- Balaman, O. (2012). *Reactive power compensation. (Master's Thesis).* Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
- Balıkçı, A. (2014). *Voltage regulation and reactive power compensation using STATCOM. (Doctoral Dissertation).* Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
- Baş, Z. (2014). *Güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu ve harmonik analizi. (Yüksek Lisans Tezi).* Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Bhakkad, M. V., ve Deshmukh, B. T. (2020). Mitigation of voltage sag using DSTATCOM. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 8(12), 19–27. <https://dx.doi.org/10.17148/IJIREEICE.2020.81204>
- Bhattacharya, S. (2012). Applications of DSTATCOM using MATLAB/Simulation in power system. *Research Journal of Recent Sciences*, 1(ISC-2011), 430–433.
- Bolaños, R. I., Torres-Mancilla, C. E., Grisales-Noreña, L. F., Montoya, O. D., ve Hernández, J. C. (2025). Optimal D-STATCOM operation in power distribution systems to minimize energy losses and CO2 emissions: A master-slave methodology based on metaheuristic techniques. *Sci*, 7(3), 98. <https://dx.doi.org/10.3390/sci7030098>

- Borhan, Y. (2006). *Elektrik dağıtım şebekelerinde gerilim değişimlerinin incelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze.
- Bouزيد, A. M., Guerrero, J. M., Cheriti, A., Bouhamida, M., Sicard, P., ve Benhanem, M. (2015). A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 751-766. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.016>
- Bozgeyik, F. (2015). *Üç fazlı dengeli elektrik dağıtım şebekelerinde kayıp tahmini ve kayıp paylaşımı. (Yüksek Lisans Tezi)*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ćalasan, M., Konjić, T., Kecojević, K., ve Nikitović, L. (2020). Optimal allocation of static var compensators in electric power systems. *Energies*, 13(12), 3219. <https://dx.doi.org/10.3390/en13123219>
- Carbonara, A., Dambone Sessa, S., L'Abbate, A., Sanniti, F., ve Chiumeo, R. (2024). Comparison of advanced flexible alternating current transmission system (FACTS) devices with conventional technologies for power system stability enhancement: an updated review. *Electronics*, 13(21), 4262. <https://dx.doi.org/10.3390/electronics13214262>
- Chapman, D. (2001). The cost of poor power quality. *Power Quality Application Guide*, 1-4.
- Çifci, A. (2015). *FACTS cihazları kullanılan elektrik güç sistemlerinde enerji fonksiyonu ile gerilim kararlılığı analizi. (Doktora Tezi)*. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Dağlı, A., ve Durmuş, A. (2019). Yeni nesil elektrik şebeke sistemleri. *International Symposium on Applied Sciences (ISAS2019)* içinde (644-646 s.). Ankara, Türkiye.
- DIgSILENT GmbH, DIgSILENT PowerFactory, v2024.
- Düzgün, B. (2018). Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 621-632. <https://dx.doi.org/10.2339/politeknik.389604>
- El-Moursi, M. S., ve Sharaf, A. M. (2005). Novel controllers for the 48-pulse VSC STATCOM and SSSC for voltage regulation and reactive power compensation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(4), 1985-1996. <https://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2005.856996>
- Eminoğlu, U., Herdem, S., ve Yalçınöz, T. (2013). İnvertör temelli FACTS cihazları kullanarak reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolü. *Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi Bildirileri* içinde (152-156 s.). Niğde Üniversitesi.

- Engin, B. (2008). *Elektrik dağıtım sistemlerinde kompanzasyon ve enerji kalitesi sorunları* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2020). *Elektrik Piyasasında Dağıtım ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Kalite Yönetmeliği*. Erişim adresi <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=36132&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> (Son Erişim Tarihi: 12/02/2025).
- EPDK, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2022). *Dağıtım Lisansı Sahibi Tüzel Kişiler ve Görevli Tedarik Şirketlerinin Tarife Uygulamalarına İlişkin Usul ve Esaslarda Değişiklik Yapılmasına Dair Usul ve Esaslar*. Erişim adresi <https://www.epdk.gov.tr/Detay/DownloadDocument?id=MESSE3sPiW4=> (Son Erişim Tarihi: 20/02/2025).
- Erdinç, F. G. (2020). Nonlineer yüklü sistemde filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu açısından simülasyon ve deneysel çalışma tabanlı bir analizin gerçekleştirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 319–331. <https://dx.doi.org/10.31590/ejosat.672211>
- Eroğlu, H. (2009). *Bir dağıtım şebekesinin güç kalitesi ve harmonikler yönünden incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ersamut, R. (2009). *Statik VAR kompanzasyonu sistemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ertay, M. M., ve Aydoğmuş, Z. (2012). Güç sistemlerinde FACTS uygulamaları. *SDÜ International Journal of Technologic Sciences*, 4(2), 40–58.
- Ertay, M. M., Dijle, M., ve Yücedağ, İ. (2016). Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM topolojileri. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 20(2), 265–279.
- Gallegos, J., Arévalo, P., Montaleza, C., ve Jurado, F. (2024). Sustainable electrification Advances and challenges in electrical-distribution networks: A review. *Sustainability*, 16(698), 1–31. <https://dx.doi.org/10.3390/su16020698>
- Glennon, B., Kusch, C., ve Nelson, E. (2012). Improve reliability and power quality on any system. *Conference on Reliable ve Quality Power*, New Delhi.
- Grady, W. M., ve Santoso, S. (2001). *Understanding power system harmonics*. (Teknik Rapor). University of Texas at Austin, Department of Electrical ve Computer Engineering.

- Gui, Y., Jiang, S., Bai, L., Xue, Y., Wang, H., Reidt, J., Ojetola, S. T., ve Schoenwald, D. A. (2024). Review of challenges and research opportunities for control of transmission grids. *IEEE Access*, 12, 94543-94569. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3425272>
- Gupta, G., Fritz, W., ve Kahn, M. T. E. (2017). A comprehensive review of DSTATCOM: Control and compensation strategies. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(12), 3387–3393.
- Hingorani, N. G. (2007). FACTS Technology – State of the Art, Current Challenges and the Future Prospects. *Panel on “Intelligent Techniques Applied to Transmission Systems”*, IEEE.
- Hingorani, N. G., ve Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible AC transmission systems*. IEEE Press ve John Wiley ve Sons.
- Isha, G., ve Jagatheeswari, P. (2021). Optimal allocation of DSTATCOM and PV array in distribution system employing fuzzy-lightning search algorithm. *Automatika*, 62(3–4), 339–352. <https://dx.doi.org/10.1080/00051144.2021.1963080>
- Iwuogu, S. E., Idoniboyeobu, D. C., Braide, S. L., ve Uwho, K. O. (2022). Optimal D-STATCOM placement for loss minimization in distribution system using loss sensitivity technique. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)*, 4(5), 2029–2039. <https://dx.doi.org/10.35629/5252-040520292039>
- Jyothi, K. R. S., Kumar, P. V., ve JayaKumar, J. (2021). A review of different configurations and control techniques for DSTATCOM in the distribution system. *E3S Web of Conferences*, 309(01119). <https://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202130901119>
- Kabalcı, E., ve Taşdemir, O. (2021). Mikro şebekelerde güç kalitesinin iyileştirilmesi için D-STATCOM tasarımı ve analizi. *Politeknik Dergisi*, 24(2), 361–372. <https://dx.doi.org/10.2339/politeknik.696779>
- Kabiri, R., Holmes, G., ve McGrath, B. (2013, Eylül). DigSILENT modelling of power electronic converters for distributed generation networks. *Proceedings of the International Conference on Power Engineering* içinde (1–8 s.). RMIT University. <https://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1203.6005>
- Kara, A., ve Yalçınöz, T. (2005, Kasım). Esnek AC iletim sistemlerinde kullanılan cihazlar ve TCR, SVC, TSR yapılı paralel kompanzatörlerin yük gerilimine etkisinin MATLAB ortamında incelenmesi. *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi (MBGAK 2005)* içinde (1–6 s.). İstanbul, Türkiye.
- Karakaş, Y. B., ve Duran, Z. (2021). Elektrik dağıtım şebekeleri için CBS tabanlı kesinti analiz sistemi. *18. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bildirileri* içinde (1-10 s.). Ankara, Türkiye.

- Kayar, E., ve Carlak, H. F. (2019). Enerji iletim sistemlerinde STATCOM kullanımı ile reaktif güç kontrolü. *IV. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre ve Sergisi* içinde (89-98 s.). İzmir.
- Kayar, E., Carlak, H. F., ve Aydınöz, H. İ. (2022). 400 kV enterkonnekte elektrik şebeke sisteminde FACTS uygulamaları. *Güç Sistemleri Konferansı Bildirileri* içinde (1-7 s.). CIGRE Türkiye Ulusal Komitesi, Ankara.
- Kocabaş, E. (2006). *Reaktif güç kompanzasyonu ve simülasyonu. (Yüksek Lisans Tezi)*. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koyuncu, M. A. (2012). *Statik VAr kompanzasyon sistemlerinin harmonikler bakımından incelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ku, T.-T., Lin, C.-H., Chen, C.-S., Lee, Y.-D., Jiang, J.-L., Tzeng, S.-J., ve Chan, C.-M. (2023). A distribution static synchronous compensator application to mitigate voltage variation for distribution feeders. *Sustainability*, 15(15), 11618. <https://dx.doi.org/10.3390/su151511618>
- Kürker, F., Taşaltın, R., ve Karadağ, K. (2018). Elektrik tesisinde harmonik incelemesi ve harmonik filtreli kompanzasyon. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3), 43–51.
- Mohammadi, M., ve Akbari Nasab, M. (2011). Voltage sag mitigation with D-STATCOM in distribution systems. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5), 201-207.
- Mohit, ve Pawar, R. (2023). Advancement and Prospects of FACTS Devices in Enhancing India's Power System Stability and Reliability. *9th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Sonipat: IEEE. <https://dx.doi.org/10.1109/IICPE60303.2023.10474989>
- Mokhtari, A., Gherbi, F. Z., Mokhtar, C., Kerrouche, K. D. E., ve Aimer, A. F. (2014). Study, analysis and simulation of a static compensator D-STATCOM for distribution systems of electric power. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 25, 117–130.
- Mutlu, A., Taşkın, S., ve Kuyucuoğlu, F. (2016). Elektrik enerji sistemlerinde güç kalitesi parametrelerine dayalı anahtarlama sistemi ile otomatik şebeke seçimi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, 826–836.
- Nar, R. (2025). *Tarımsal sulama sistemlerinde enerji verimliliği ve şebeke kararlılığı için D-STATCOM uygulaması: modelleme, simülasyon ve performans analizi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman.

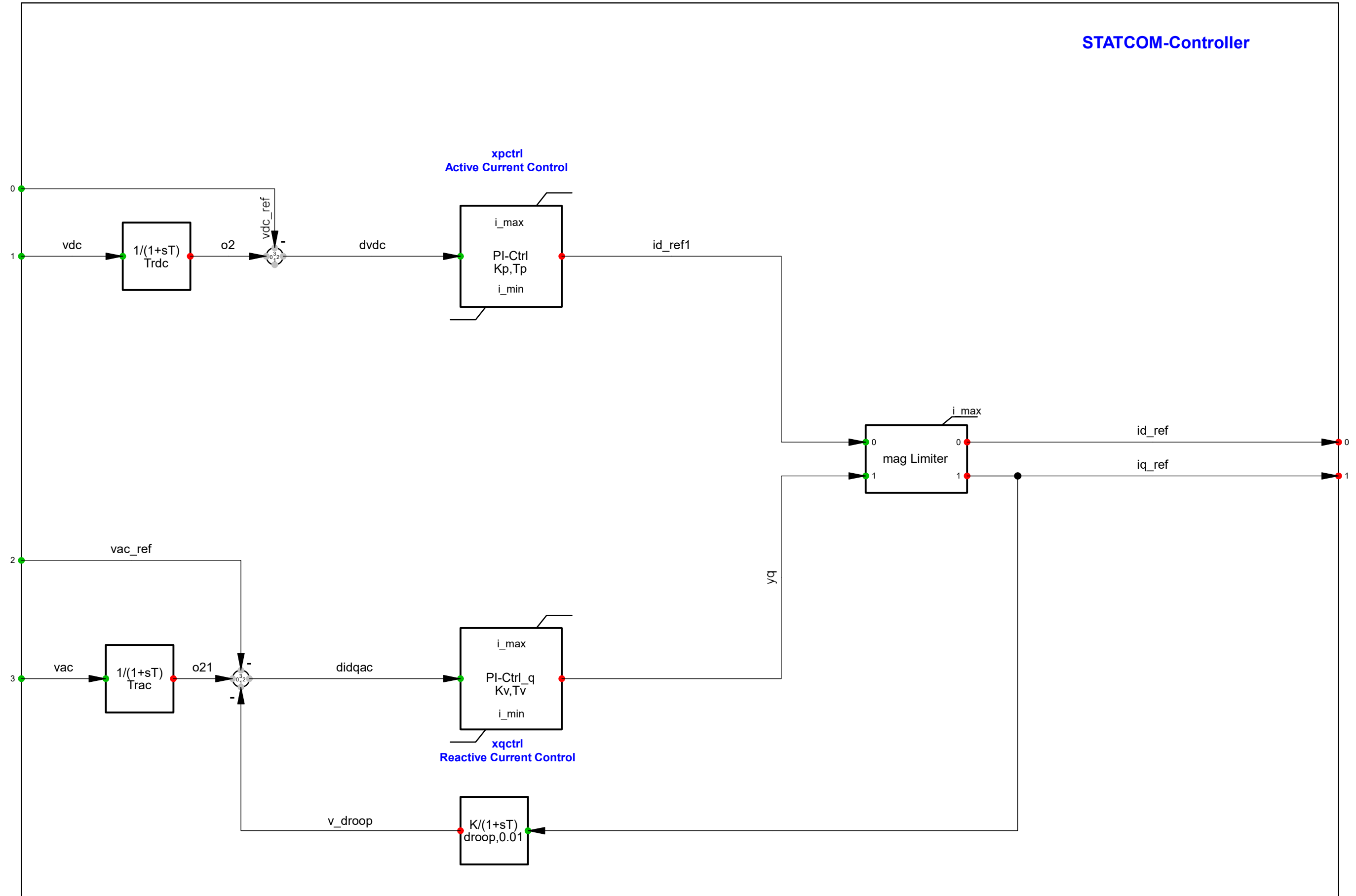
- Nassif, A. B., ve Teshome, D. F. (2020, Ekim). Voltage regulation using D-STATCOMs in rural distribution feeders. *2020 CIGRE Canada Conference* içinde (1–8 s.). Toronto, Ontario.
- Örme, M. M. (2019). *Türkiye elektrik dağıtım şebekesinin sorunları ve çözüm önerileri. (Yüksek Lisans Tezi)*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Öztürk, A., Bozalı, B., ve Tosun, S. (2016). Güç sistemi kararlılığını iyileştirecek FACTS cihazlarının bağlantı noktasının belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, 812–825.
- Pandya, S. B., ve Chudasama, M. C. (2013). Simulation of D-STATCOM to study voltage stability in distribution system. *International Journal for Scientific Research ve Development*, 1(3), 510–512.
- Ramamurthy, J. R., Kolluri, V. S., Mader, D. J., ve Camm, E. (2018, Nisan). Mitigation of Motor Starting Voltage Sags Using Distribution-Class STATCOM. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* içinde (1–7 s.). IEEE. <https://dx.doi.org/10.1109/TDC.2018.8440512>
- Rasheed, M., Hussain, B., Al-Sumaiti, A. S., ve Abid, M. (2025). Stability Improvement of Grid Connected DFIG Wind Farm With STATCOM Compensated Power Network Using RL Based Coordinated Transient Controller. *IEEE Access*, 13, 116054–116068. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3584719>
- Rathore, K., Kumar, D., ve Yadav, S. (2015). D-STATCOM modeling and simulation applying control schemes for power quality improvement. *International Journal of Electrical, Electronics ve Telecommunication Engineering*, 4(2), 27–32.
- Rönnerberg, S. K., Bollen, M. H., Amaris, H., Chang, G. W., Gu, I. Y., Kocewiak, Ł. H., Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro P. F., ve Desmet, J. (2017). On waveform distortion in the frequency range of 2 kHz–150 kHz—Review and research challenges. *Electric Power Systems Research*, 150, 1–10. <https://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.032>
- Shahnia, F., Rajakaruna, S., ve Ghosh, A. (Eds.). (2015). *Static compensators (STATCOMs) in power systems*. Springer. <https://dx.doi.org/10.1007/978-981-287-281-4>
- Singh, B., Verma, K. S., Singh, D., Singh, C. N., Singh, A., Agarwal, E., Dixit, R., ve Tyagi, B. (2011). Introduction to FACTS controllers a critical review. *International Journal of Reviews in Computing*, 8(31), 17–34.
- Soydal, O. (1986). *Elektrik tesislerinde reaktif güç kompanzasyonu. (Yüksek Lisans Tezi)*. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Suarez Patiño, J. E., Gallego Pareja, L. A., ve Gómez Carmona, O. (2025). Optimal placement, sizing and operation of D-STATCOMs in power distribution systems using a mixed-integer linear programming model. *Results in Engineering*, 26, 104749. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104749>
- Şerbetçi, M. B. (2019). *Harmonik problemi olan tesislerde harmonik filtreli kompanzasyon sistemlerinin tasarımı ve analizi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taşdemir, O. (2020). *Mikro Şebekelerde Güç Kalitesinin İyileştirilmesi için D-STATCOM Tasarımı ve Analizi. (Yüksek Lisans Tezi)*. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nevşehir.
- Tosun, S., Öztürk, A., Yalçın, M. A., Döşoğlu, K., ve Güvenç, U. (2011, Mayıs). Güç sisteminde SVC ve STATCOM denetleyici etkilerinin incelenmesi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)* içinde (287–293 s.). Elazığ, Türkiye.
- Tör, O. B., Cebeci, M. E., Koç, M., ve Güven, A. N. (2018). Primer elektrik dağıtım şebekelerinin uzun dönem kapasite artış yatırımlarının planlama ölçütlerine dayalı dinamik optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 227-237. <https://dx.doi.org/10.17341/gazimmfd.406795>
- Tunçalp, K., ve Sucu, M. (2006). Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde pasif filtre ve filtreli kompanzasyonun kullanımı ve simülasyon örnekleri. *Politeknik Dergisi*, 9(4), 263-269. <https://doi.org/10.2339/2006.9.4.263-269>
- Usta, Ö., ve Yumak, K. (2012). Akıllı elektrik şebekeleri ve veri iletişimi. *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları*.
- Uyanık, G. (2020). *Elektrik dağıtım şebekelerinde kayıpların incelenmesi: Kütahya örneği. (Yüksek Lisans Tezi)*. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Ünsal, A., ve Tunaboğlu, N. S. (2009). Dumlupınar Üniversitesi merkez kampüsü elektrik enerjisi kalitesinin ölçüm sonuçları. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(1), 1–10.
- Vural, O. (2003). *Alçak Gerilim Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu. (Yüksek Lisans Tezi)*. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Wang, Y., Yin, K., Liu, H., ve Yuan, Y. (2022). A novel integrated method for harmonic suppression and reactive power compensation in distribution network. *Symmetry*, 14(1347), 1–25. <https://dx.doi.org/10.3390/sym14071347>

Yılmaz, A. S., Yanıkoğlu, E., ve Demir, Z. (2002). Dağıtım şebekelerinde asenkron motorlara yol verilmesi sonucu oluşan kısa süreli gerilim düşümleri. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(2), 45–54.



Controller Block Diagram:



EK 2 - Şekil 3.2. D-STATCOM kontrol bloğu (A3 boyutunda)