

**T.C.  
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**AKTİF DAĞITIM ŞEBEKESİNDE EVİRİCİ TABANLI  
KAYNAKLARIN GERİLİM KARARLILIĞI AÇISINDAN  
İNCELENMESİ**

**Sait TAŞKESER**

**Danışman  
Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**

**İkinci Danışman  
Dr. Hasan Basri ÇETİNKAYA**

**MANİSA-2025**

**SAIT  
TAŞKESER**

**AKTİF DAĞITIM ŞEBEKESİNDE EVİRİCİ TABANLI KAYNAKLARIN GERİLİM  
KARARLILIĞI AÇISINDAN İNCELENMESİ 2025**

## TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

İmza  
Sait TAŞKESER



# ÖZET

## Yüksek Lisans Tezi

**Sait TAŞKESER**  
**Manisa Celal Bayar Üniversitesi**  
**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**  
**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**

**İkinci Danışman: Dr. Hasan Basri ÇETİNKAYA**

Bu tez çalışmasında, aktif dağıtım şebekelerinde evirici tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarının (GES ve RES) ve batarya enerji depolama sistemlerinin (BEDS) gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, bu kaynakların dağıtım şebekesi üzerindeki gerilim profiline etkilerini sayısal olarak değerlendirmek ve sistemin kararlılık sınırlarına olan katkılarını ortaya koymaktır. Bu çalışmada, gerçek bir elektrik dağıtım şebekesi analiz edilmiştir. İncelenen dağıtım şebekesi 9 bara, 466 bağlantı noktası, 312 dağıtım hattı, 157 transformatör ve 155 yük içermektedir. Analizlerde, DIgSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak P-V (güç-gerilim) eğrileri yardımıyla sistemin gerilim kararlılığı sınırları belirlenmiştir. Bu bağlamda, kritik baraya GES, RES ve BEDS sistemleri ayrı ayrı ve entegre şekilde eklenerek farklı senaryolar oluşturulmuştur. Ayrıca, güç kontrollü bir BEDS modeliyle yarı dinamik simülasyonlar (QDS) gerçekleştirilmiştir. Böylece, zamana bağlı üretim ve yük karakteristikleri ile bataryanın şarj-deşarj tepkileri analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, GES ve RES entegrasyonu ile kritik baranın 0,95 p.u. gerilim seviyesinde daha fazla aktif güç aktararak yüklenebilirliği yaklaşık %30 artırdığını göstermektedir. Bu bulgular, evirici tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarının batarya sistemleri ile kullanımının, aktif dağıtım şebekelerinde gerilim kararlılığını artırmaya yönelik etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** DIgSILENT PowerFactory, Gerilim kararlılığı, P-V eğrisi analizi, Yenilenebilir enerji entegrasyonu, Gerilim profili iyileştirme

**2025, 83 sayfa**

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

**Sait TAŞKESER**

**Manisa Celal Bayar University  
Graduate School of Education  
Department of Electrical Electronics Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN**

**Co-Supervisor: Dr. Hasan Basri ÇETİNKAYA**

This thesis investigates the effects of inverter-based renewable energy sources (photovoltaic (PV) and wind turbine generators (WTGs)) as well as battery energy storage systems (BESS) on voltage stability in active distribution networks. The main objective is to quantitatively evaluate the impact of these sources on the voltage profile of the distribution grid and to assess their contribution to voltage stability margins. A real-world electrical distribution network was analysed, comprising 9 buses, 466 connection points, 312 distribution lines, 157 transformers, and 155 loads. Voltage stability limits were determined by generating P-V (power-voltage) curves using DIgSILENT PowerFactory software. In this context, several scenarios were created by integrating PV, WTG, and BESS individually and in combination into the critical bus. Furthermore, quasi-dynamic simulations (QDS) were performed using a power-controlled BESS model. Time-dependent generation and load characteristics were included to analyse the charge-discharge response of the battery system. Simulation results demonstrate that the integration of PV and WTG systems increases the loadability of the critical bus by approximately 30% by enabling higher active power transfer at the 0.95 p.u. voltage level. These findings suggest that the combined use of inverter-based renewable sources with battery storage offers an effective approach to enhance voltage stability in active distribution networks.

**Keywords:** DIgSILENT PowerFactory, Voltage stability, P-V curve analysis, Renewable energy integration, Voltage profile improvement

**2025, 83 pages**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, aktif dağıtım şebekelerine entegre edilen evirici tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarının ve batarya enerji depolama sistemlerinin gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. Bu kapsamda, ilk bölümde literatür araştırması yapılmıştır. İkinci bölümde konuya ilişkin temel kavramlar ve gerilim kararlılığı kavramı açıklanmıştır. Üçüncü bölümde kullanılan simülasyon araçları ve gerçek bir dağıtım şebekesi tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde sistemde GES etkisi, beşinci bölümde RES etkisi ve altıncı bölümde GES ve RES entegrasyonunun etkisi incelenmiştir. Yedinci bölümde senaryolar bazında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Çalışmamın her aşamasında bilgi birikimi, tecrübesi ve rehberliğiyle bana yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Sezai TAŞKIN'a ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Arş. Gör. Macit TOZAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Teknik konulardaki bilgi birikimi ve yönlendirmeleriyle çalışmama önemli katkılar sağlayan ikinci danışmanım Sayın Dr. Hasan Basri ÇETİNKAYA'ya teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle daima yanımda olan, sabır ve sevgileriyle bana güç veren kıymetli aileme teşekkür ederim.

Sait TAŞKESER  
Manisa, 2025

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>BEDS</b>	Batarya Enerji Depolama Santrali
<b>BESS</b>	Battery Energy Storage Systems
<b>FACTS</b>	Flexible Alternating Current Transmission System
<b>GES</b>	Güneş Enerji Santrali
<b>IBS</b>	Inverter Based Sources
<b>LF</b>	Load Flow
<b>P</b>	Aktif Güç
<b>PF</b>	Power Factor
<b>PV</b>	Photovoltaic
<b>P-V Curve</b>	Güç-Gerilim Eğrisi
<b>Q</b>	Reaktif Güç
<b>QDM</b>	Quasi-Dynamic Model
<b>QDPF</b>	Quasi-Dynamic Power Flow
<b>QDS</b>	Quasi-Dynamic Simulation
<b>RES</b>	Rüzgar Enerji Santrali
<b>S</b>	Görünür Güç
<b>SG</b>	Senkron Generatör
<b>SoC</b>	State of Charge
<b>STATCOM</b>	Static Synchronous Compensator
<b>SVC</b>	Static VAR Compensator
<b>TCSC</b>	Thyristor Controlled Series Capacitor
<b>VSD</b>	Variable Speed Drives
<b>YEK</b>	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
<b><math>\phi</math></b>	Güç Üçgeni Açısı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Güç kalitesi problemlerinden gerilim (a) düşümü ve (b) yükselmesi	2
Şekil 2.1 Tek yüklü sonsuz bara sistemi	8
Şekil 2.2 Sonsuz bara sisteminin eşdeğer devresi	9
Şekil 2.3 $\phi$ açısının tanıtımı	10
Şekil 2.4 Kayıpsız bir sistemde ve sabit güç faktörü altında ( $\tan\phi=0,2$ ), yük direncine bağlı güç, gerilim ve akım değişim eğrileri	16
Şekil 2.5 Bir yük akışı çözümünün çözülebilir yük noktalarının alanı	19
Şekil 2.6 Yükün aktif ve reaktif güçlerinin bir fonksiyonu olarak gerilim eğrisi	21
Şekil 2.7 P-V (Güç-Gerilim) eğrileri	22
Şekil 3.1 Gerçek bir elektrik dağıtım şebekesinin tek hat şeması	25
Şekil 3.2 Dağıtım şebekesindeki N930 bölgesinin yakınlaştırılmış görünümü	26
Şekil 3.3 Gerilim büyüklükleri	28
Şekil 3.4 Gerilim açıları	28
Şekil 4.1 Mevcut durumda en kritik baraya ait P-V eğrisi	30
Şekil 4.2 Mevcut durumda tüm baralara ait P-V eğrisi	31
Şekil 4.3 Mevcut durumda en kritik baraya ait Q-V eğrisi	31
Şekil 4.4 Mevcut durumda tüm baralara ait Q-V eğrisi	32
Şekil 4.5 Bir günlük aktif güç üretimi yapan GES üretim karakteristiği	33
Şekil 4.6 En kritik bara ile bağlantılı GES için P-V eğrisi	34
Şekil 4.7 GES günlük üretiminde düşüş karakteristiği	35
Şekil 4.8 En kritik bara ile bağlantılı GES’de güç düşümü sonucu P-V eğrisi	35
Şekil 4.9 Voltage Measurement parametrelerinin giriş sayfası	37
Şekil 4.10 Gerilim kontrollü batarya modelinin simülasyon sonuçları	38
Şekil 4.11 Power Measurement parametrelerinin giriş sayfası	39
Şekil 4.12 Güç kontrollü batarya modelinin simülasyon sonuçları	40
Şekil 4.13 Şebekeye bağlı GES ve BEDS tek hat şeması	41
Şekil 4.14 Bir günlük aktif güç tüketimi yapan yük karakteristiği	41
Şekil 4.15 Güç kontrollü GES ve BEDS entegrasyonu için simülasyon sonuçları	42
Şekil 5.1 Bir günlük aktif güç üretimi yapan RES üretim karakteristiği	44
Şekil 5.2 En kritik bara ile bağlantılı RES için P-V eğrisi	44
Şekil 5.3 Tüm baralar için P-V kritik nokta eğrisi (Sistemde RES var)	45
Şekil 5.4 RES günlük üretiminde düşüş karakteristiği	45
Şekil 5.5 En kritik bara ile bağlantılı RES’de güç düşümü sonucu P-V eğrisi	46
Şekil 5.6 Şebekeye bağlı RES ve BEDS tek hat şeması	47
Şekil 5.7 Güç kontrollü RES ve BEDS entegrasyonu için simülasyon sonuçları	48
Şekil 6.1 GES ve RES bağlantılı bara için mevcut durum P-V eğrisi	50
Şekil 6.2 Tüm baralar için P-V kritik nokta eğrisi (Sistemde GES ve RES var)	50
Şekil 6.3 En Kritik Barada GES ve RES’de Güç Düşümü sonucu P-V Eğrisi	51
Şekil 6.4 Şebekeye bağlı GES, RES ve BEDS tek hat şeması	53
Şekil 6.5 Güç kontrollü RES ve BEDS entegrasyonu için simülasyon sonuçları	54

## TABLULAR DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 1.</b> Temsili şebeke parametreleri	27
<b>Tablo 2.</b> Baraların trafo merkezine olan uzaklıkları ve gerilim büyüklükleri	27
<b>Tablo 3.</b> GES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için limit değerleri	36
<b>Tablo 4.</b> GES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için kritik nokta değerleri	36
<b>Tablo 5.</b> RES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için limit değerleri	46
<b>Tablo 6.</b> RES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için kritik nokta değerleri	46
<b>Tablo 7.</b> GES ve RES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için limit değerleri	52
<b>Tablo 8.</b> GES ve RES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için kritik nokta değerleri	52

## İÇİNDEKİLER

TAAHHÜTNAME .....	III
ÖZET .....	IV
ABSTRACT .....	V
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLOLAR DİZİNİ .....	IX
İÇİNDEKİLER.....	X
BİRİNCİ BÖLÜM .....	1
1 GİRİŞ .....	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Araştırması.....	4
İKİNCİ BÖLÜM .....	8
2 GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA TEORİK YAKLAŞIM..	8
2.1 Tek Yüklü Sonsuz Bara Sistemi.....	8
2.2 Maksimum Aktarılabılır Güç .....	10
2.2.1 Sınırsız Maksimum Güç .....	10
2.2.2 Belirli Bir Yük Güç Faktörü Altında Maksimum Güç.....	13
2.2.3 Yük Akış Denklemlerinden Elde Edilen Maksimum Güç .....	17
2.3 Güç ve Gerilim İlişkisi.....	20
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM .....	23
3 ELEKTRİK ŞEBEKESİ MODELLEME.....	23
3.1 DIGSILENT Powerfactory Simülasyon Programı.....	23
3.2 Elektrik Dağıtım Şebekesinin PowerFactory Modeli .....	24
3.2.1 Şebeke Parametreleri.....	24
3.2.2 Güç Akışı Simülasyon Sonuçları .....	24
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM.....	29
4 GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA ETKİSİ: MEVCUT DURUM VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ .....	29
4.1 Mevcut Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi.....	29
4.2 GES Bağlantılı Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi .....	33
4.3 GES Bağlantılı ve Güç Düşümü Durumunda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi .....	34
4.4 GES ve BEDS'in Birlikte Çalıştırılması Durumunda Gerilim Davranışı .....	36
4.4.1 Gerilim Kontrollü Batarya Modeli.....	36

4.4.2 Güç Kontrollü Batarya Modeli .....	38
4.4.3 GES ve BEDS'in Entegre Şekilde Gerilim Davranışına Etkisi.....	40
BEŞİNCİ BÖLÜM .....	43
5 RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA ETKİSİ .....	43
5.1 RES Bağlantılı Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi .....	43
5.2 RES Bağlantılı ve Güç Düşümü Durumunda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi .....	45
5.3 RES ve BEDS'in Birlikte Çalıştırılması Durumunda Gerilim Davranışı.....	47
ALTINCI BÖLÜM.....	49
6 GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA ETKİSİ .....	49
6.1 GES ve RES Bağlantılı Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi.....	49
6.2 GES ve RES Bağlantılı ve Güç Düşümü Durumunda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi .....	51
6.3 GES, RES ve BEDS'in Birlikte Çalıştırılması Durumunda Gerilim Davranışı	52
YEDİNCİ BÖLÜM.....	55
7 SONUÇLAR.....	55
SEKİZİNCİ BÖLÜM.....	57
8 REFERANSLAR .....	57
EK 1 - Kayıpsız bir sistemde ve sabit güç faktörü altında ( $\tan\phi=0,2$ ), yük direncine bağlı güç, gerilim ve akım değişim eğrileri için Matlab Kodu .....	59
EK 2 - Bir yük akışı çözümünün çözülebilir yük noktalarının alanı için Matlab Kodu .....	60
EK 3 - Yükün aktif ve reaktif güçlerinin bir fonksiyonu olarak gerilim eğrisi için Matlab Kodu .....	61
EK 4 - P-V (Güç-Gerilim) eğrileri için Matlab Kodu .....	63
EK 5 – Dağıtım şebekesinin yük parametreleri.....	64
EK 6 – Dağıtım şebekesinin transformatör parametreleri.....	68
EK 7 – Dağıtım şebekesinin transformatör tipi özellikleri .....	72
EK 8 – Dağıtım şebekesinin hat parametreleri.....	73
EK 9 – Dağıtım şebekesinin hat tipi özellikleri.....	81
EK 10 – Dağıtım şebekesinin generatör parametreleri .....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	83

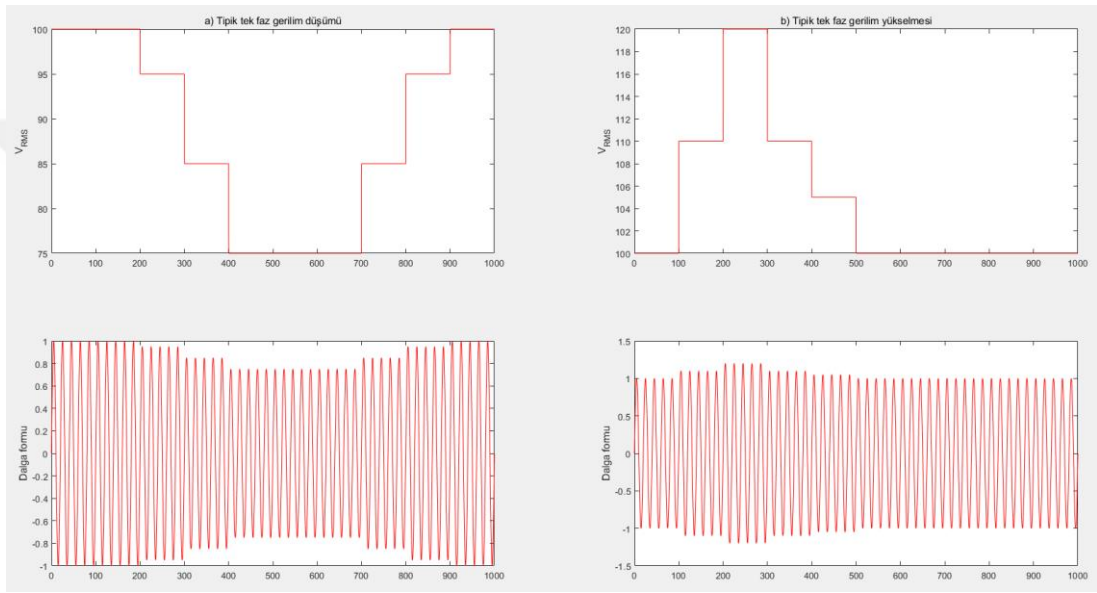
## BİRİNCİ BÖLÜM

### 1 GİRİŞ

Günümüzde sanayileşmenin hız kazanması, teknolojik gelişmelerin artması ve yaşam standartlarının yükselmesi elektrik enerjisine olan talebin her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Sürekli artan elektrik enerji talebi mevcut elektrik şebekesinin yükünü önemli ölçüde artırmaktadır. Yükler şebekenin çalışma koşullarını daha karmaşık ve kontrolünü daha zorlu bir hale getirmektedir. Özellikle ani yük değişimleri, dengesiz üretim-tüketim koşulları ve güç elektroniği temelli üretim sistemlerin yaygınlaşması gibi durumlar sistem kararlılığı açısından ciddi riskler oluşturmaktadır.

Gerilim düşmeleri ve yükselmeleri, en yaygın güç kalitesi bozulmalarıdır. Şekil 1.1'de alternatif gerilimin tek fazındaki gerilim düşümü ve yükselmesi sonucunda oluşan efektif değer değişimlerinin düşme ve yükselme durumları gösterilmektedir. Her elektrik ekipmanı bir gerilim değerinde çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Tüketiciler için belirlenen gerilim seviyeleri altındaki veya üstündeki gerilim değişiklikleri elektronik ve endüstriyel ekipmanlara zarar verebilir, kesintilere ve diğer güç kalitesi problemlerine neden olabilir. Gerilim kararlılığı, modern güç sistemlerinin güvenli ve verimli bir şekilde çalışması için temel bir öneme sahiptir. Güç sistemlerinin normal işletme koşullarında ve bozulmalar sonrasında gerilim seviyelerini sürdürebilmesi, şebeke güvenilirliği ile enerji arzının sürekliliği açısından büyük bir gerekliliktir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) kullanımının artmasıyla birlikte invertör tabanlı kaynakların (IBS) güç sistemlerine entegrasyonu, senkron generatörlerden (SG) farklı karakteristikler göstermeleri nedeniyle yeni teknik sorunları da beraberinde getirmektedir [1,2].

IBS'ler, nominal akım sınırları nedeniyle reaktif güç desteği sağlama kapasitesinde sınırlamalara sahiptir. Bu durum, özellikle yük talebindeki ani değişimlerde şebekenin kararlılığını sağlamak için yeterli reaktif gücün sağlanamamasına neden olur. Geleneksel senkron generatörler, manyetik alanlarının doğal yapısı gereği geniş bir reaktif güç aralığında çalışabilirken, invertörlerin akım kapasiteleri bu esnekliği sağlamakta yetersizdir [3]. Bu nedenle, yüksek yenilenebilir oranlı enerji sistemlerinde gerilim çökmesi gibi ciddi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Geleneksel senkron generatörlerin yerini giderek daha fazla YEK'ler almaktadır.



**Şekil 1.1** Güç kalitesi problemlerinden gerilim (a) düşümü ve (b) yükselmesi

Güneş enerji santralleri (GES) ve rüzgar enerji santralleri (RES) bu sistemlerin başlıca örneklerini oluşturmaktadır. YEK sistemlerinin şebekeye entegrasyonu genellikle güç elektroniği tabanlı invertörler aracılığıyla sağlanmaktadır. IBS'ler, senkron generatörlerin aksine, arıza sırasında şebekeye sınırlı seviyede arıza akımı sağlar. Bu durum, şebekede kısa devre seviyelerinin düşmesine neden olarak, koruma sistemlerinin algılama ve tepki verme sürelerini etkiler. Literatürde, bu tür düşük kısa devre seviyelerinin şebeke güvenilirliği üzerinde ciddi etkileri olduğu vurgulanmıştır. Bu eksiklik, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının fazla olduğu mikro şebekelerde daha belirgin hale gelmektedir [4].

Bu bağlamda, Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazlarından biri olan Statik Senkron Kompansatörler (STATCOM), özellikle yenilenebilir enerji entegrasyonu yüksek olan sistemlerde gerilim dalgalanmalarının giderilmesi için etkili bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. STATCOM, dinamik reaktif güç desteği sağlayarak gerilim profilini dengeler ve şebeke kararlılığını artırır. STATCOM gibi kontrol cihazlarının uygulanması, özellikle invertör tabanlı kaynakların ağırlıklı olduğu güç sistemlerinde sistem performansını artırma kapasitesine sahiptir [5,6].

Bu bağlamda, GES ve RES sistemlerinin kurulumu ve şebekeye entegrasyonu, titiz bir mühendislik yaklaşımı gerektirir. Özellikle güneş ışınımının düşük olduğu dönemlerde ya da rüzgar hızındaki ani değişimlerde, bu üretim tesislerinde ciddi güç düşüşleri gözlemlenmekte ve bu da doğrudan sistem geriliminde dalgalanmalara sebep olabilmektedir. Bu sorunları hafifletmek amacıyla, batarya enerji depolama sistemleri (BEDS) son yıllarda ön plana çıkmaktadır. BEDS, ani yük değişimlerine karşı şebekeye hızlı bir şekilde yanıt verebilir ve gerilim dalgalanmalarının önlenmesine yardımcı olabilir.

## **1.1 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasının amacı, aktif enerji şebekesinde evirici tabanlı kaynakların (GES, RES ve BEDS) gerilim sınırları üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu kapsamda, gerçek bir dağıtım şebekesi üzerinde gerilim-güç (P-V) eğrileri kullanılarak sistemin gerilim kararlılığı (profili) sınırları analiz edilmiştir. Gerilim kararlılığı, bir güç sisteminin belirli bir noktadaki gerilim seviyesini, yük artışı veya sistemdeki bozulmalar gibi etkiler karşısında sürdürülebilir sınırlar içinde tutma yeteneğidir. Bu çalışmada gerilim kararlılığı tanımı, sistemin belirli bir bara üzerinde yük artışına karşı ne kadar güç taşıyabileceğini ifade etmektedir. Gerilim kararlılığı analizi, sistemin belirli baralarında yapılan P-V analizleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. P-V eğrileri, artan güç talebi altında gerilim değişimlerini göstererek sistemin kararlılık sınırlarını oluşturmaktadır. Bu tezde kullanılan yöntem, gerilim profili üzerinden gerçekleştirilen bir analiz olup, özellikle 0,95 p.u. gerilim seviyesindeki yüklenme kapasitesi dikkate alınarak kararlılık değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu yaklaşım, gerilim profili analizinden yararlanmakla birlikte, doğrudan gerilim kararlılığı sınırlarını tanımlayan niteliktedir. P-V analizi öncesinde PowerFactory tarafından sistemin “kritik barası” belirlenmiştir. Kritik bara, yük artışı karşısında gerilimi en hızlı düşen ve kararlılığını ilk kaybetme riski taşıyan baradır. Bu çalışmada analizler, PowerFactory'nin belirlediği bu kritik bara üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, sistemin referans durumu için mevcut şebekenin P-V eğrileri elde edilmiştir. Ardından en kritik baraya sırasıyla bir GES ve bir RES entegre edilerek çeşitli senaryolar altında güç-gerilim (P-V) eğri analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir durumda, 0,95 p.u. gerilim seviyesinde baraların aktarabileceği maksimum güç değerleri karşılaştırılmıştır. Tüm simülasyonlar PowerFactory yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, farklı türde evirici tabanlı kaynakların gerilim profiline olan katkılarını sayısal olarak tespit etmek ve bu doğrultuda aktif enerji şebekelerinde bu tür kaynakların planlamasına yönelik teknik bir değerlendirme sunmaktır.

## 1.2 Literatür Araştırması

Maharjan ve arkadaşları (2020), aktif dağıtım şebekelerinde hızlı bulut geçişleri gibi meteorolojik olayların fotovoltaik (PV) üretimde yol açtığı ani ve büyük güç düşümlerinin gerilim kararsızlığına sebep olduğunu vurgulamışlardır. İndüksiyon motoru ağırlıklı yüklerin değişken hızlı sürücüler (VSD) ile değiştirilmesinin, bu tür ani PV güç dalgalanmaları sırasında gerilim kararlılığını iyileştirdiği hem analitik Q-V eğrisi analizleri hem de zaman alanı simülasyonlarıyla gösterilmiştir [1]. Sakipour ve Abdi (2022), rüzgar enerjisi santrallerinin şebekeye entegrasyonunda, rüzgar hızındaki doğal dalgalanmaların güç üretiminde kesintili ve kontrolsüz değişimlere yol açarak gerilim kararlılığı açısından zorluk oluşturduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada şebeke arızaları sırasında üretim-tüketim dengesini sağlamak için optimize bir Batarya Enerji Depolama Sistemi (BEDS) önerilmiştir. Ayrıca arıza sonrasında gerilim dalgalanmalarını sönmölemek üzere kendini ayarlayabilen yeni bir Statik VAR Kompanzatorü (SVC) tasarlanmış ve bu yaklaşımların rüzgar santralinin gerilim kararlılığını belirgin biçimde artırdığı gösterilmiştir [2].

Charlansut ve Rugthaicharoencheep (2025), dağıtım sisteminde fotovoltaik (PV) üretim ile BEDS'in birlikte kullanımının gerilim ve güç kararlılığına etkilerini incelemişlerdir. IEEE 33 baralı bir dağıtım şebekesinde farklı senaryolar karşılaştırılmıştır. PV üretiminin uygun yerlere dağıtılıp batarya depolamayla desteklenmesinin gerilim düşümlerini önleyerek sistem kayıplarını en aza indirdiği görülmüştür [3]. Kamaruzzaman ve Mohamed (2015), PV entegrasyon oranı yüksek dağıtım şebekelerinde gerilim kararlılığını, güneş ışınımındaki ani değişimler ve bulut geçişleri gibi meteorolojik faktörlere bağlı olarak detaylı biçimde analiz etmişlerdir. Ani ışınım düşüşlerinin PV üretiminde ani güç kayıplarına ve gerilimde tolere edilemez sınırlara düşüşe yol açabildiği gösterilmiştir. Bu durumun önlem alınmazsa gerilim çökmesine sebep olabileceği belirtilmektedir [4]. Trindade ve arkadaşları (2016), PV generatörlerinin mekanik ataletinin bulunmaması nedeniyle bulut geçişlerinden kaynaklanan hızlı ışınım değişimlerinin PV gücünde anlık ve önemli dalgalanmalara yol açtığını ve bunun PV oranı yüksek dağıtım sistemlerinde hızlı gerilim değişimlerine neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, dağıtım şebekesinde bulut geçişlerinin yol açtığı gerilim dalgalanmalarını hafifletmek üzere PV inverterlerinin hızlı reaktif güç desteği sağlama kapasitelerine dayalı kontrol teknikleri önerilmiş ve zaman serisi simülasyonlarla bu yöntemlerin gerilim kararlılığını iyileştirdiği değerlendirilmiştir [5]. Kumar, Maharjan ve Srinivasan (2022), PV sistemlerinin neden olduğu güç dalgalanmalarını sınırlamak amacıyla BEDS tabanlı rampa kontrol stratejisi önermişlerdir. IEEE test şebekesinde merkezi ve dağıtık depolama yerleşimleriyle yapılan analizlerde, önerilen kontrolün PV çıkışındaki ani değişimleri etkin biçimde yumuşatarak gerilim dalgalanmalarını azalttığı ve farklı PV entegrasyon oranlarında dahi şebeke gerilimlerini kabul edilebilir aralıkta tutabildiği gösterilmiştir [6]. Kuang ve çalışma arkadaşları (2019), rüzgar enerjisi santralının şebeke bağlantısında karşılaşılan gerilim kararlılığı sorununu ele almış ve bu soruna çözüm olarak Tristör Kontrollü Seri Kompansatör (TCSC) ile STATCOM'un sistematik denetimini içeren bir kontrol stratejisi önermişlerdir. MATLAB/Simulink ortamındaki benzetimlerde, koordineli kontrolün arıza sonrası rüzgar santralının bağlantı noktasındaki gerilimi çok daha hızlı toparlayarak sistemin gerilim kararlılığını ve düşük gerilim sürdürme (LVRT) yeteneğini iyileştirdiği gösterilmiştir [7].

Muyeen ve çalışma arkadaşları (2009), sabit hızlı türbinlere sahip bir rüzgar santralinin çıkış gücünü düzgünleştirmek amacıyla STATCOM ile entegre BEDS kullanımını önermişlerdir. Simülasyon analizleri STATCOM/BEDS destekli sistemin rüzgar gücündeki dalgalanmaları ve buna bağlı gerilim değişikliklerini etkin şekilde bastırabildiğini ortaya koymuştur [8]. Malik ve çalışma arkadaşları (2024), rüzgar enerjisiyle beslenen güç sistemlerinde rüzgarın kesintili doğasının çok sayıda gerilim kararsızlığı sorununa yol açtığını ve bu durumun şebeke kodları ile düzenlemeler aracılığıyla kontrol altına alınmaya çalışıldığını kapsamlı bir literatür taramasıyla ortaya koymuşlardır. Bu derleme, rüzgar entegreli sistemlerde gerilim kararsızlığının nedenleri ve sonuçlarını irdelemektedir. Şebeke güvenliği için LVRT gereksinimleri gerekli kontrol planı ve iyileştirme tekniklerini detaylı olarak değerlendirmektedir [9]. Ghaffarianfar ve Hajizadeh (2018), yüksek düzeyde fotovoltaiik (PV) entegrasyonunun dağıtım şebekesindeki gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerini analitik olarak incelemişlerdir. Büyük ölçekli PV entegrasyonunun şebeke karakteristiklerine bağlı olarak gerilim kararlılığına hem olumlu hem olumsuz etkileri olabileceğini belirtilmiştir. Kontrol ekipmanlarının bulut geçişi gibi hızlı değişimlerin etkilerini tamamen telafi etmekte yetersiz kalabileceği belirtilmiştir [10]. Ahmed, Tasnim ve Aura (2022), zayıf bir mikro-şebekede dağıtık enerji kaynaklarının arıza sonrası gerilim toparlanmasını hızlandırmak amacıyla STATCOM ve BEDS kullanımını karşılaştırmışlardır. Uygun şekilde konumlandırıldığında her iki cihazın da gerilim düşümünü iyileştirebildiğini belirtilmiştir. Ancak BEDS yardımıyla daha küçük bir güç kapasitesiyle dahi STATCOM'a kıyasla daha hızlı gerilim toparlanması elde edilebildiğini gösterilmektedir [11]. Guo ve çalışma arkadaşları (2023), PV sistemlerinin şebekeden kopmasıyla sonuçlanan gerilim çökmesi senaryolarını incelemişlerdir. Kısa dönem gerilim kararlılığının ciddi şekilde zayıfladığı ve gerilimin toparlanma hızının düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca PV oranı yüksek durumlar için PV invertörlerinin aktif ve reaktif güç desteği verecek şekilde gelişmiş kontrol mekanizmaları gibi önlemlerin alınmasının, ani gerilim dalgalanmaları sonrasında sistemin kararlılığını korumak için gerekli olduğu belirtilmektedir [12]. Yadav ve Saravanan (2022), yüksek oranlı rüzgar enerjisi entegrasyonunun güç sistemlerinin dinamik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Rüzgar gücünün kesintili yapısının sistem işletimini zorlaştırdığı belirtilmiştir.

RES'lerin şebekeye büyük ölçekte bağlanmasının, senkron generatörlerin yerini almaları nedeniyle sistem ataletini azaltarak ve güç elektroniği yapısı nedeniyle belirsizlikler oluşturarak kararlılık sınırlarını daralttığı bu çalışma kapsamında vurgulanmaktadır [13]. Bakır ve Kulaksız (2018), MATLAB/Simulink ortamında bir güneş-rüzgar hibrit dağıtık üretim sistemini STATCOM ile entegre ederek modellemiş ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Hibrit YEK'lerin şebeke gerilim profilinde dalgalanmalara yol açtığını belirtilmiştir. Ancak STATCOM'un devreye alınmasıyla gerilim profilinin iyileştirildiğini ve reaktif güç ihtiyaçlarının karşılanarak sistemin kararlılık sınırlarının yükseltilebildiğini gösterilmektedir [14].

Literatürde inverter tabanlı GES, RES ve BEDS gibi dağıtık enerji kaynaklarının gerilim kararlılığına etkileri genellikle ayrı ayrı incelenmiştir. Bu tezde ise bu kaynakların entegre kullanımının dağıtım şebekesi gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi gerçek bir şebeke modeli üzerinde analiz edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen özgün katkılar şunlardır:

- Mevcut sistemin güç-gerilim (P-V) eğrileri üzerinden, %95 gerilim (0,95 p.u.) eşliğinde kritik baranın taşıyabileceği maksimum güç değeri belirlenmiş ve bu değer yenilenebilir kaynak entegrasyonu öncesi ve sonrası için karşılaştırılmıştır. Bu sayede, GES ve RES entegrasyonunun gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi sayısal olarak ortaya konulmuştur.
- Kritik baraya ayrı ayrı GES ve RES entegrasyonu ile her iki kaynağın birlikte entegre edildiği durum senaryoları analiz edilmiştir. Farklı senaryolar altında P-V eğrilerinin karşılaştırılmasıyla, sistemin gerilim kararlılığı sınırlarını nasıl değiştirdiği gözlemlenmiştir.
- Kritik barada konumlandırılan BEDS için bir güç kontrol mekanizması gerçekleştirilmiştir. Dağıtım hattı üzerindeki güç akışı gerçek zamanlı izlenerek belirli bir eşik değerinin altına düştüğünde bataryanın şarj, üzerine çıktığında ise deşarj olmasını sağlayan bir güç desteği uygulanmıştır.

Bu katkılar, literatürde genellikle ayrı ayrı ele alınan yenilenebilir enerji kaynaklarının ve batarya sistemlerinin, birlikte kullanımının sistem kararlılığı üzerinde nasıl önemli iyileştirmeler sağladığını kapsamlı bir şekilde sunan çalışmalardan biridir.

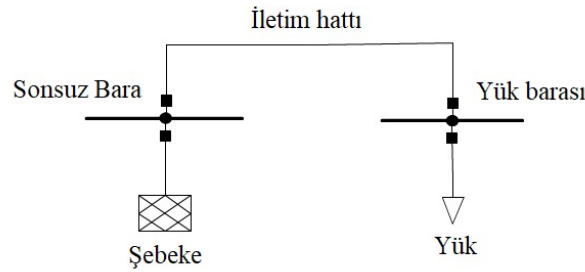
## İKİNCİ BÖLÜM

### 2 GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA TEORİK YAKLAŞIM

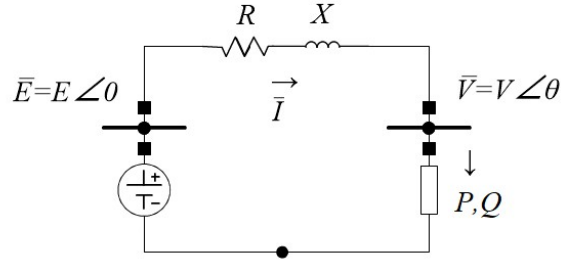
Bu bölümde, elektrik güç sistemlerinde gerilim kararlılığı konusu teorik bir çerçevede ele alınmaktadır. İzlenen yaklaşım kapsamında, ilk olarak sistem kararlılığını belirlemede kritik öneme sahip iki önemli parametre üzerinde durulacaktır: (i) yüklere iletilebilecek maksimum güç miktarı ve (ii) yük gücü ile şebeke gerilimi arasındaki ilişki. Bu parametrelerin gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde tartışılacaktır. Bu kapsamda, kolay ve analitik işlemler yapabilmek için basit bir tek yüklü sonsuz bara sistemi model olarak referans alınmıştır. Gerilim kararlılığına ilişkin teorik altyapı, ağırlıklı olarak Van Cutsem ve Vournas (2007) tarafından yayımlanan “Voltage Stability of Electric Power Systems” adlı eserde sunulan temel kavramlar ve yaklaşımlar doğrultusunda derlenmiştir [15].

#### 2.1 Tek Yüklü Sonsuz Bara Sistemi

Şekil 2.1’de yer alan sistem, sonsuz bara tarafından ve bir iletim hattı üzerinden beslenen tek bir yükün modellendiği basit bir yapı olarak ele alınmaktadır.



Şekil 2.1 Tek yüklü sonsuz bara sistemi



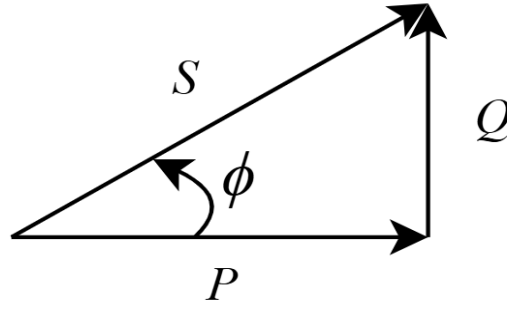
**Şekil 2.2** Sonsuz bara sisteminin eşdeğer devresi

Tanım gereği, sonsuz baranın gerilim genliği ve frekansı sabit kabul edilmektedir. Sistemde dengeli üç fazlı çalışma koşulları varsayıldığı için analizler faz başına yapılan tek hat eşdeğer devre üzerinden yapılmaktadır. Bu bağlamda, çalışma koşulları sabit durum koşulları ve sinüsoidal kabul edilmektedir.

Şekil 2.2’de devre gösterimi verilmiştir. Sonsuz bara, ideal bir gerilim kaynağı olan  $E$  ile temsil edilmektedir. İletim hattı, klasik  $\pi$  eşdeğer devresinin sadeleştirilmiş biçimi olarak, yalnızca  $R$  ve reaktans  $X$  bileşenleriyle modellenmiştir. Bu yaklaşımda şönt kapasitans ihmal edilmiştir. Dolayısıyla iletim hattı empedansı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$Z = R + jX \quad (1)$$

$E$  ve  $Z$  büyüklükleri, sistemin incelenen bara noktasından görülen Thevenin eşdeğer gerilim kaynağı ve empedansı olarak yorumlanabilir. Gerçekte generatörler ideal bir gerilim kaynağı gibi davranmadıkları için sistemden çekilen gücün artmasıyla birlikte Thevenin gerilim kaynağında küçük değişiklikler meydana gelebilir. Ancak teorik çalışma kapsamında, söz konusu değişim ihmal edilmektedir ve analizler sabit bir  $E$  değeri üzerinden hesaplanmaktadır.



Şekil 2.3  $\phi$  açısının tanımı

Son olarak, yükün güç faktörünün (Power Factor, PF) aşağıdaki şekilde tanımlandığını hatırlatmakta fayda vardır:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{(P^2 + Q^2)}} = \cos \phi \quad (2)$$

Burada  $P$ ,  $Q$  ve  $S$  sırasıyla aktif, reaktif ve görünür gücü temsil etmektedir.  $\phi$  açısı, Şekil 2.3'te gösterilen güç üçgeni üzerinden tanımlanan açıdır.

## 2.2 Maksimum Aktarılabilir Güç

İkinci bölümün girişinde belirtildiği üzere gerilim kararsızlığı, genellikle yüklerin üretim ve iletim sisteminin sağlayabileceğinden daha fazla güç talep etmesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu bölümde, Şekil 2.2'de gösterilen basitleştirilmiş sistem referans alınmıştır. Bu bağlamda, yük ucunda çeşitli çalışma koşulları altında aktarılacak maksimum güç miktarının belirlenmesine odaklanılmıştır.

### 2.2.1 Sınırsız Maksimum Güç

İlk aşamada yükün sabit bir empedans gibi davrandığı varsayılmaktadır. Bu varsayım ile modelin genel geçerliliği etkilenmemektedir. İlerleyen adımlarda bu kabulün sonuca olan etkisinin sınırlı olduğu gösterilecektir. Yük aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$Z_l = R_l + jX_l \quad (3)$$

burada  $R_l$  ve  $X_l$  sırasıyla yük direnci ve reaktansdır.

Bu noktada, devre teorisinde klasik olarak bilinen ve literatürde yük uyumlama problemi (*load adaptation problem*) [16] veya maksimum güç transferi teoremi (*maximum power transfer theorem*) olarak geçen durum ele alınmaktadır. Buna göre hem  $R_l$  hem de  $X_l$ 'nin serbestçe değişebildiği bir durumda, yük tarafından tüketilen aktif gücü en yüksek seviyeye çıkaran empedans değerlerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}}{(R + R_l) + j(X + X_l)} \quad (4)$$

ve yük tarafından tüketilen aktif güç:

$$P = R_l I^2 = \frac{R_l E^2}{(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2} \quad (5)$$

Maksimum güç aktarımı koşullarını belirleyebilmek için yükün aktif güç tüketimi parametrelerinin maksimum değerini bulmak gerekmektedir.  $R_l$  ve  $X_l$ 'nin değişimine bağlı olarak sistem davranışı analiz edilmektedir. Böylece gerekli en büyük ve en küçük değerleri bulmaya yönelik koşullar (ekstremum koşulları) aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial X_l} = 0 \quad (7)$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda Denklem (6)'ya göre Denklem (8) ve Denklem (7)'ye göre Denklem (9) olarak hesaplanmaktadır.

$$(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2 - 2R_l(R + R_l) = 0 \quad (8)$$

$$-R_l(X + X_l) = 0 \quad (9)$$

Yukarıda elde edilen Denklem (8) ve Denklem (9) için koşulların çözümüne bakıldığında,  $R_l > 0$  kısıtlaması altında sistemin yalnızca tek bir geçerli çözümü olduğu görülmektedir:

$$R_l = R \quad (10)$$

$$X_l = -X \quad (11)$$

veya karmaşık formda:

$$Z_l = Z^* \quad (12)$$

Bu sonuç, maksimum aktif güç aktarımının, yük empedansının iletim hattı empedansının karmaşık eşleniğine eşit olması durumunda gerçekleştiğini göstermektedir. Bu koşullar altında, gerilim kaynağı tarafından görülen toplam empedans:  $R + R_l + j(X + X_l) = 2R$  şeklinde yalnızca dirençten oluşur. Bu durumda kaynak, yalnızca aktif güç üretir ve sistemde reaktif güç alışverişi gerçekleşmez.

Maksimum güç aktarımı altında yük tarafından çekilebilecek aktif güç:

$$P_{max} = \frac{E^2}{4R} \quad (13)$$

olarak hesaplanır. Bu noktada, alıcı uçtaki gerilim ise:

$$V_{maxP} = \frac{E}{2} \quad (14)$$

şeklindedir. Burada kullanılan “ $maxP$ ” alt indisi, ilgili büyüklüğün maksimum aktif güç aktarımı koşulları altında aldığı değeri ifade etmektedir.

Bu bölümde incelenen sınırsız güç durumu, gerçek güç sistemi uygulamaları açısından uygun bir modelleme yaklaşımı sunmamaktadır. Bu durumun ilk temel nedeni, gerçekte iletim sistemlerinde hat direnci  $R$  değerinin, reaktans  $X$  ile karşılaştırıldığında genellikle ihmal edilebilir düzeyde küçük olmasıdır.

$R \rightarrow 0$  yaklaşımı kabul edildiğinde ( $X+X_l=0$  kısıtıyla birlikte), optimal yük direnci (Denklem (10)) de sifıra yaklaşmakta ve buna bağlı olarak maksimum güç (Denklem (13)) de teorik olarak sonsuz değerlere ulaşmaktadır. Bu iki sonuç doğrultusunda empedans tamamen reaktif hale geldiğinde, yük akımı  $I$  sonsuz büyüklüklere ulaşmaktadır. Dolayısıyla yükün tükettiği aktif güç  $P = R_l I^2$  de fiziksel olmayan değerlere çıkmaktadır. Bu tür bir durum gerçek sistem davranışını yansıtmaz ve pratikte uygulanabilir değildir.

Ayrıca iletim hattı direnci  $R$  sıfırdan farklı kabul edilse bile, sistemin baskın endüktif karakteri maksimum güç aktarımını sağlayabilmek için yükün yüksek derecede kapasitif özellik göstermesini gerektirir. Bu durum güç sistemlerinde karşılaşılan yaygın bir durum değildir. Bu nedenle, güç sistemlerine daha uygun olan yaklaşım, yükün güç faktörünün sabit olduğu varsayımına dayanan alternatif bir türetmedir. Bu durum, bir sonraki alt bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

### 2.2.2 Belirli Bir Yük Güç Faktörü Altında Maksimum Güç

Yükün güç faktörünün  $\cos \phi$  olarak sabitlenmesi, yük empedansının şu şekilde tanımlanmasına karşılık gelir:

$$Z_l = R_l + jX_l = R_l + jR_l \tan \phi \quad (15)$$

Denklem (15)'e göre empedans yalnızca  $R_l$  değişkenine bağlı hale geldiğinden, maksimum güç aktarımı problemi tek bir değişkene indirgenmiştir. Sistemdeki akım aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}}{(R + R_l) + j(X + R_l \tan \phi)} \quad (16)$$

ve yük tarafından tüketilen aktif güç şu şekilde yazılır:

$$P = R_l I^2 = \frac{R_l E^2}{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan \phi)^2} \quad (17)$$

Bu fonksiyonun maksimum noktası, Denklem (18)'deki türev koşulu sağlandığında elde edilir.

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0 \quad (18)$$

Denklem (18)'in çözümlenmesiyle Denklem (19) elde edilmektedir.

$$(R^2 + X^2) - R_l^2(1 + \tan^2 \phi) = 0 \quad (19)$$

Denklem (19)'daki ifade, Denklem (20)'deki eşdeğer koşula karşılık gelmektedir.

$$|Z_l| = |Z| \quad (20)$$

Dolayısıyla, yük empedansının büyüklüğü ile iletim hattı empedansının büyüklüğü eşitlendiğinde, yük tarafından çekilen aktif güç maksimuma ulaşmaktadır. İkinci türev Denklem (21)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial R_l^2} = -2R_l(1 + \tan^2 \phi) \quad (21)$$

Bu ifade her zaman negatiftir; dolayısıyla elde edilen kritik nokta, fonksiyonun maksimumuna karşılık gelir. Başka bir deyişle, sabit bir güç faktörü altında, yük empedansının büyüklüğü iletim empedansının büyüklüğüne eşit olduğunda, maksimum güç aktarımı sağlanır.

Bu duruma karşılık gelen optimum yük direnci ve reaktansı Denklem (22) ve Denklem (23)'deki gibi gösterilebilir.

$$R_{lmaxP} = |Z| \cos \phi \quad (22)$$

$$X_{lmaxP} = |Z| \sin \phi = R_{lmaxP} \tan \phi \quad (23)$$

Şekil 2.4'te yük direnci  $R_l$ 'nin farklı değerleri için yük gücü  $P$ , uç gerilim  $V$  ve akım büyüklüğü  $|I|$  gösterilmektedir.  $R_l \rightarrow \infty$  durumu, açık devre koşulunu temsil eder.

$R_l$  azaldıkça, uç gerilim  $V$  düşerken akım büyüklüğü  $|I|$  artar.  $R_l > R_{lmaxP}$  olduğu sürece, akımın karesindeki artış ( $I^2$ ) dirençteki azalmaya göre baskındır ve dolayısıyla yük gücü  $P$  artar. Ancak  $R_l < R_{lmaxP}$  durumunda bu eğilim tersine döner ve  $P$  azalmaya başlar. Sonuç olarak  $R_l = 0$ , kısa devre durumuna karşılık gelir ve bu noktada gerilim sıfırlanırken sistem kararsız hale gelir.

### 2.2.2.1 Kayıpsız İletim

İletim hattı direncinin ihmal edildiği durum, yani  $R=0$ , sistem davranışını sadeleştirmek amacıyla ele alınmaktadır. Sabit güç faktörü altında, maksimum aktif gücün aktarılmasını sağlayan optimum yük direnci, Denklem (19)'a göre:

$$R_{lmaxP} = X \cos \phi \quad (24)$$

olarak verilmektedir. Bu değer, Denklem (17)'de yerine konduğunda elde edilen maksimum aktif güç ifadesi Denklem (25)'deki gibi olmaktadır.

$$P_{max} = \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \frac{E^2}{2X} \quad (25)$$

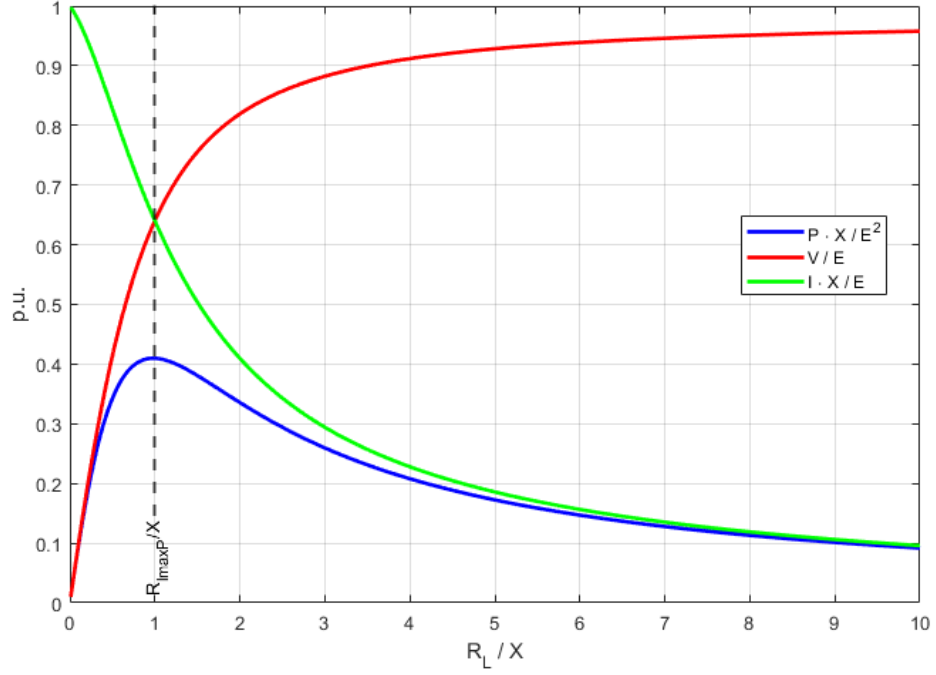
Buna karşılık gelen reaktif güç ifadesi:

$$Q_{maxP} = \frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi} \frac{E^2}{2X} \quad (26)$$

Alıcı uçtaki gerilim ise:

$$V_{maxP} = \frac{E}{\sqrt{2} \sqrt{1 + \sin \phi}} \quad (27)$$

şeklinde elde edilmektedir.



Şekil 2.4 Kayıpsız bir sistemde ve sabit güç faktörü altında ( $\tan\phi=0,2$ ), yük direncine bağlı güç, gerilim ve akım değişim eğrileri

### 2.2.2.2 Kayıpsız İletim ve Birim Güç Faktörü

Eğer yük, birim güç faktörüne ( $\cos \phi = 1$ ) sahip olacak şekilde tamamen aktif karakterli, yani mükemmel bir şekilde dengelenen bir yükse, bu durumda optimum yük direnci:

$$R_{lmaxP} = X \quad (28)$$

ve maksimum aktif güç:

$$P_{max} = \frac{E^2}{2X} \quad (29)$$

ve alıcı uç gerilimi:

$$V_{maxP} = \frac{E}{\sqrt{2}} \cong 0.707E \quad (30)$$

olarak elde edilir. Bu durum, birim güç faktörünün sistem açısından en verimli koşullardan biri olduğunu göstermektedir.

### 2.2.3 Yük Akış Denklemlerinden Elde Edilen Maksimum Güç

Analizi sadeleştirmek amacıyla, Şekil 2.2'de gösterilen sistemde iletim hattı direnci  $R$  ihmal edilmiştir. Ayrıca, ideal gerilim kaynağı  $\bar{E}$  sabit bir genliğe ve sıfır faz açısına sahip olacak şekilde faz referansı olarak seçilmiştir:

$$\bar{E} = E \angle 0 \quad (31)$$

Yük ucundaki gerilim ise genlik  $V$  ve faz açısı  $\theta$  ile ifade edilmiştir. Şekil 2.2'ye göre sistemin temel gerilim denklemi:

$$\bar{V} = \bar{E} - jX\bar{I} \quad (32)$$

olarak yazılır. Bu durumda, yük tarafından tüketilen kompleks güç aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$S = P + jQ = \bar{V}\bar{I}^* = \bar{V} \frac{\bar{E}^* - \bar{V}^*}{-jX} \quad (33)$$

$$= \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2) \quad (34)$$

Bu ifade açılar kullanılarak aşağıdaki bileşenlerine ayrılır:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \quad (35)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta \quad (36)$$

Denklem (35) ve Denklem (36), kayıpsız bir sistemin yük akış (power flow) denklemleridir. Bir yük talebi ( $P, Q$ ) için bu denklemler  $V$  ve  $\theta$  değişkenleri açısından çözümlenerek sistemin gerilim durumu belirlenebilir.

Bu çözümün mümkün olup olmadığını belirlemek için, yukarıdaki denklemlerden  $\theta$  değişkeni elimine ederek Denklem (37) gibi ikinci dereceden ifade elde edilebilir.

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (37)$$

Denklem (37)'deki ifade,  $V^2$  açısından bir kuadratik denklemdir. Gerçek bir çözümün var olabilmesi için diskriminantın sıfırdan büyük veya eşit olması gerekir. Bu koşul Denklem (38)'deki gibidir.

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (38)$$

Denklem (38) basitleştirildiğinde, Denklem (39)'daki eşitsizlik elde edilir.

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (39)$$

Denklem (39),  $(P, Q)$  düzleminde çözülebilir yük noktalarının yer aldığı alanı tanımlar. Bu alan, Şekil 2.5'te gösterilen bir parabolün iç bölgesidir. Parabolün içindeki noktalar sistem için iki farklı yük akışı çözümü vermektedir. Parabol üzerindeki noktalar tekil çözüme karşılık gelmektedir ve parabol dışında kalan noktalar için ise çözüm yoktur.

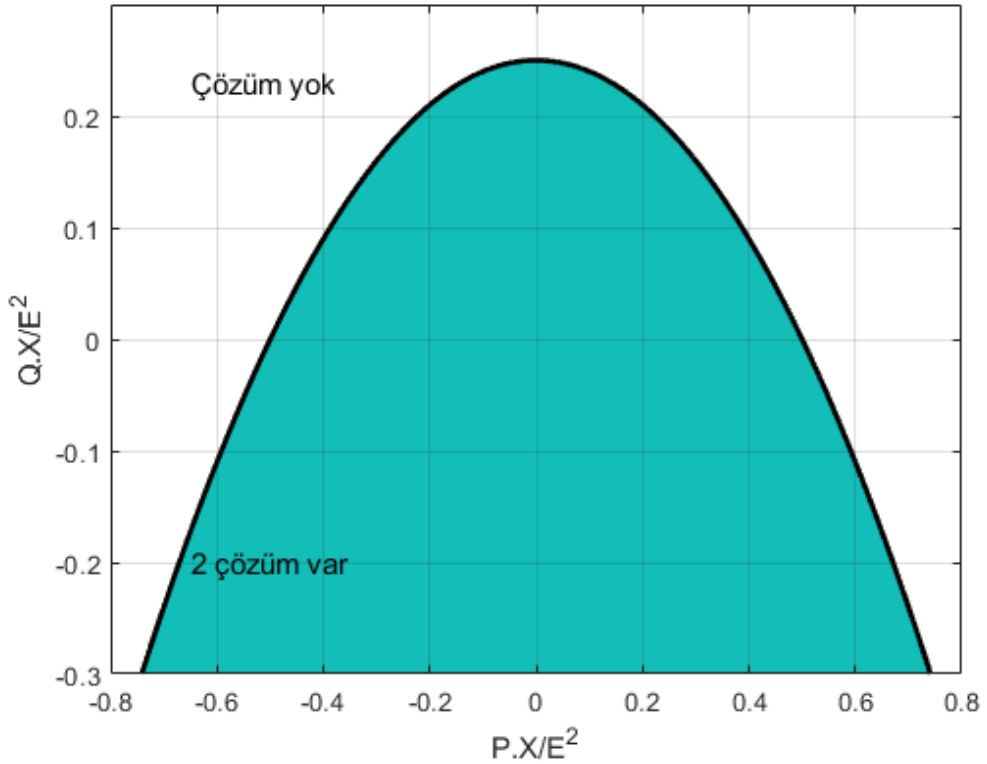
Şekil 2.5'teki parabol, maksimum güç noktalarının geometrik haritasını oluşturmaktadır. Pozitif  $P$  yönündeki noktalar, daha önceki bölümlerde elde edilen sabit güç faktörü altındaki maksimum yük aktarımını, negatif  $P$  yönündeki noktalar ise maksimum üretim durumlarını temsil etmektedir.

Şekil 2.5'teki parabol,  $Q$  eksenine göre simetriktir. Bu bağlamda, sisteme verilebilecek maksimum güç ile yük tarafından çekilebilecek maksimum güç eşittir.

Ancak, iletim hattı direnci dikkate alındığında bu simetri bozulur. Denklem (39)'da  $P=0$  için eşitsizlik Denklem (40) gibi olur.

$$Q \leq \frac{E^2}{4X} \quad (40)$$

Denklem (40) ile elde edilen sonuç, yük barasında aktarılacak maksimum reaktif gücün, o noktadaki kısa devre gücünün dörtte biri ile sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, sistemin yalnızca reaktif yüklenmesi halinde bile gerilim kararlılığı açısından belirli bir fiziksel sınırı aşamayacağını ortaya koyar. Sonuç olarak kısa devre gücü, boşa çalışma gerilimi  $E$  ile kısa devre akımı  $E/X$ 'in çarpımı olarak tanımlanır. Dolayısıyla, maksimum reaktif güç kapasitesi, bu kısa devre gücünün 1/4'ü ile sınırlanarak sistem güvenliğinin korunmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 2.5 Bir yük akışı çözümünün çözülebilir yük noktalarının alanı

Benzer şekilde, Denklem (39)'da  $Q=0$  alındığında Denklem (41) eşitsizliği elde edilir.

$$P \leq \frac{E^2}{2X} \quad (41)$$

Bu durum, daha önce birim güç faktörü ( $\cos \phi = 1$ ) altında kayıpsız hat için türetilmiş olan maksimum güç sınırıyla tutarlıdır ve kısa devre gücünün yarısı kadar bir değere karşılık gelir.

Bu sonuçlar, aktif güç ve reaktif güç arasında temel bir farkı da ortaya koyar:

- Sisteme yeterli reaktif güç verilebileceği sürece yüksek miktarda aktif güç aktarımı mümkündür.
- Ancak sistemin taşıyabileceği reaktif yük gücü hiçbir zaman ( $E^2/4X$ )'i aşamaz.

Bu farkın nedeni, iletim sisteminin doğası gereği endüktif karakterde olmasından kaynaklanır. Büyük aktif güç aktarımı için gereken yüksek reaktif güç desteği, çoğu zaman yüklerin bara geriliminde kabul edilemez yükselmelere yol açar. Bu nedenle reaktif güç yönetimi, gerilim kararlılığı açısından kritik bir öneme sahiptir.

### 2.3 Güç ve Gerilim İlişkisi

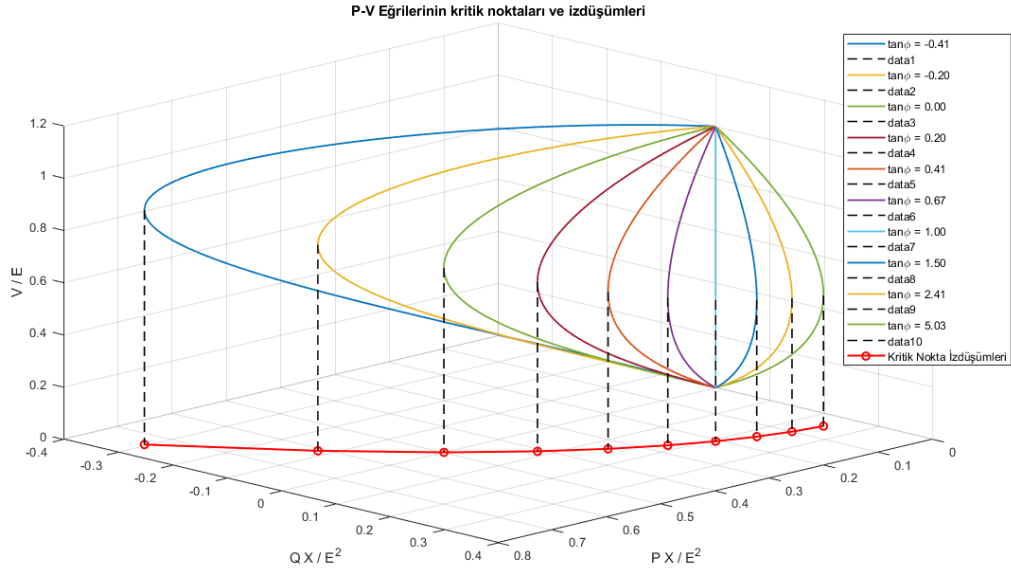
Denklem (39) koşulunun sağlandığı varsayıldığında, Denklem (37)'nin iki farklı çözümü elde edilir. Bu çözümler Denklem (42) gibi ifade edilir:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - XE^2 Q}} \quad (42)$$

Denklem (42), yükün aktif ve reaktif güçleri ( $P$ ,  $Q$ ) ile yük gerilimi  $V$  arasındaki ilişkiyi tanımlar. Üç boyutlu ( $P$ ,  $Q$ ,  $V$ ) uzayında, bu denklem Şekil 2.6'da gösterilen iki katmanlı bir yüzey oluşturur.

Bu yüzeyin üst bölümü, yukarıdaki ifadede artı işareti ile alınan çözüme karşılık gelir ve yüksek gerilimli çözümü temsil eder. Yüzeyin alt bölümü, eksi işareti ile alınan çözüm olup, düşük gerilimli çözümü ifade eder. Bu iki çözümün eşitlendiği "orta seviye", yani ayırım sınırı, sistemin maksimum güç noktalarıdır.

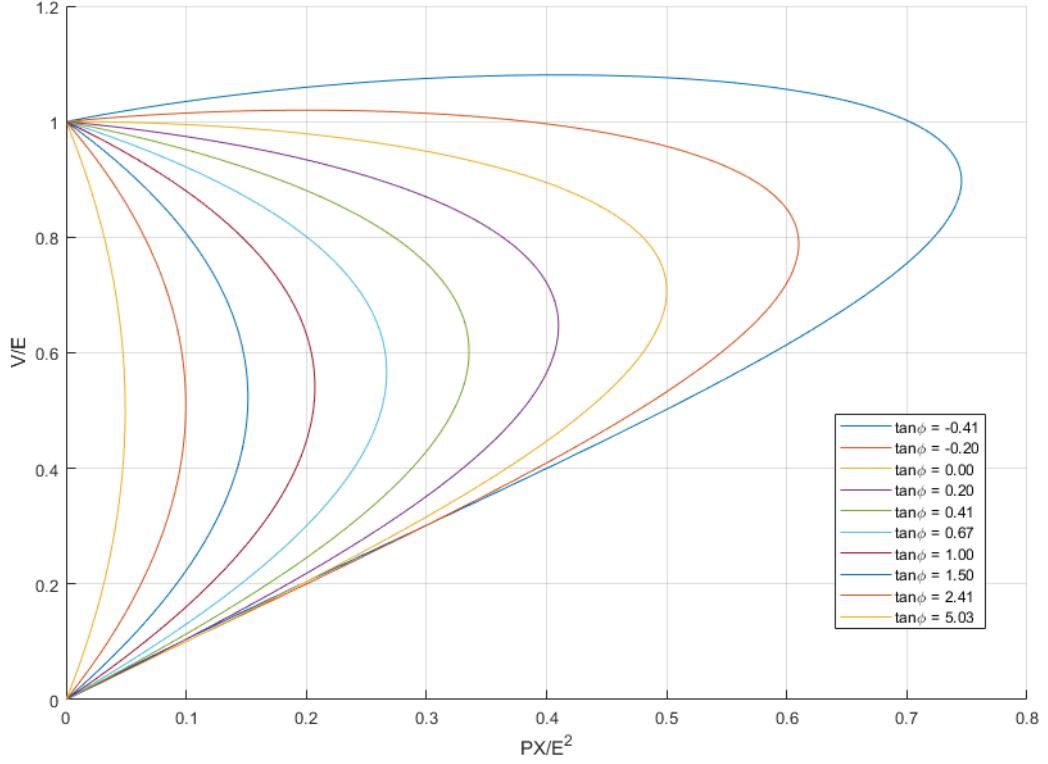
Bu noktalar Denklem (25), (26) ve (27)'de tanımlanan koşulları sağlar ve Şekil 2.5'te gösterilen parabolün izdüşümüne denk gelir.



**Şekil 2.6** Yükün aktif ve reaktif güçlerinin bir fonksiyonu olarak gerilim eğrisi

Şekil 2.6'da düz çizgilerle gösterilen "meridyenler", sabit güç faktörlerini temsil eden düzlemlerdir. Burada  $\phi$  açısı,  $-\pi/8$  ile  $\pi/2$  aralığında  $\pi/16$  artışlarla değişmektedir. Bu meridyenlerin (P,V) düzlemine yansıtılmasıyla, farklı  $\tan\phi$  değerleri için aktif güç ile yük gerilimi arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler elde edilir. Şekil 2.7'de görülen bu karakteristik eğriler, literatürde genellikle "P-V eğrileri" olarak adlandırılır. Bu eğriler, gerilim kararsızlığının analizinde ve kavranmasında önemli bir değerlendirme grafiği olarak kabul edilmektedir.

P-V eğrisi üzerindeki kritik noktadan daha düşük bir aktif güç değeri için, iki ayrı gerilim çözümü mümkündür. Birincisi, yüksek gerilim ve düşük akım durumu (normal çalışma koşulu) durumudur. Diğeri, düşük gerilim ve yüksek akım durumu (kararsız/istenmeyen işletme noktası) durumudur.



**Şekil 2.7** P-V (Güç-Gerilim) eğrileri

Yükte yapılan reaktif güç kompanzasyonu arttıkça (yani  $\tan\phi$  küçüldükçe), sistemin taşıyabileceği maksimum aktif güç miktarı artar. Ancak bu artış ile, söz konusu maksimum gücün gerçekleştiği gerilim değeri de yükselir. Bu bağlamda, sistem geriliminin kararsızlık sınırına, yani maksimum güç aktarımı noktasına, normal işletme koşulları altında fark edilmeden yaklaşılmaya neden olabilir. Bu durum, görünürde sistem güvenli çalışıyor gibi olsa da aslında kararsızlık tehlikesine oldukça yakın çalışıldığını gösterir.

Yük aşırı kapasitif hale geldiğinde (yani  $\tan\phi < 0$  olduğunda), P-V eğrisinin bir bölgesinde gerilimin yüklerle birlikte arttığı bir kesit gözlenir. Bu durumda, aktif güç tüketiminin neden olduğu gerilim düşümü henüz belirginleşmeden, reaktif gücün etkisiyle gerilim seviyesinde bir artış gözlemlenebilir. Yani yük arttıkça (aktif güç yönünde), gerilim değerinin de artmaya devam ettiği bir bölge oluşur.  $\tan\phi$  değeri negatif yönde büyüdükçe, bu karakteristik davranışın gözlemlendiği P-V eğrisi bölgesi de genişler.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### 3 ELEKTRİK ŞEBEKESİ MODELLEME

Tez çalışmalarında yapılan literatür araştırmaları, güç sistemlerinin analizinde oldukça etkili bir program olan DIgSILENT PowerFactory simülasyon programını vurgulamaktadır. Tez çalışmasında yer alan örnek şebeke modellemesi için DIgital SiMuLation and Electrical NeTwork (DIgSILENT) PowerFactory simülasyon programı tercih edilmiştir.

#### 3.1 DIgSILENT Powerfactory Simülasyon Programı

PowerFactory, üretim, iletim, dağıtım ve endüstriyel sistemlerin analizinde lider bir güç sistemi analiz yazılımı olarak kabul edilmektedir. Yazılım, rüzgar enerjisi, dağıtık üretim, gerçek zamanlı simülasyon, sistem testi ve denetimi gibi gelişmiş uygulamaları içeren geniş bir işlevselliğe sahiptir. DIgSILENT PowerFactory, komut dosyaları ve arayüz oluşturma esnekliği sayesinde yüksek oranda otomatik ve bütünleşmiş çözümler sunabilme yeteneğine sahiptir.

DIgSILENT PowerFactory, güç dönüşüm sistemlerinin simülasyonuna yönelik geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca güç iletim sistemlerinin tasarımında hem tek fazlı hem de üç fazlı sistemler için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Simülasyonların oluşturulması aşamasında ise uyulması gereken IEC standartları, programın veri tabanında hazır olarak bulunmaktadır. Program aynı zamanda endüstriyel tesislerin elektrik sistemlerinin simülasyonlarının gerçekleştirilmesinde, elektrik üretim tesisleri ve sistemlerinin ve dağıtık elektrik üretim sistemlerinin tasarımında son derece etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Özellikle yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin tasarımında, bu programda gelişmiş bir simülasyon özelliği bulunmaktadır. Kullanılan yazılım, güç sistemleri ve enerji dağıtım sistemleri ile ilgili birçok kütüphane ve analiz yöntemine sahiptir. Program, elektrik şebekesi simülasyon tasarımında ihtiyaç duyulan trafo, kablo, yük ve bara gibi ekipmanları gerçek değerleriyle sunmaktadır. Bu değerler, isteğe bağlı olarak modeldeki tasarıma uyarlanabilir.

## 3.2 Elektrik Dağıtım Şebekesinin PowerFactory Modeli

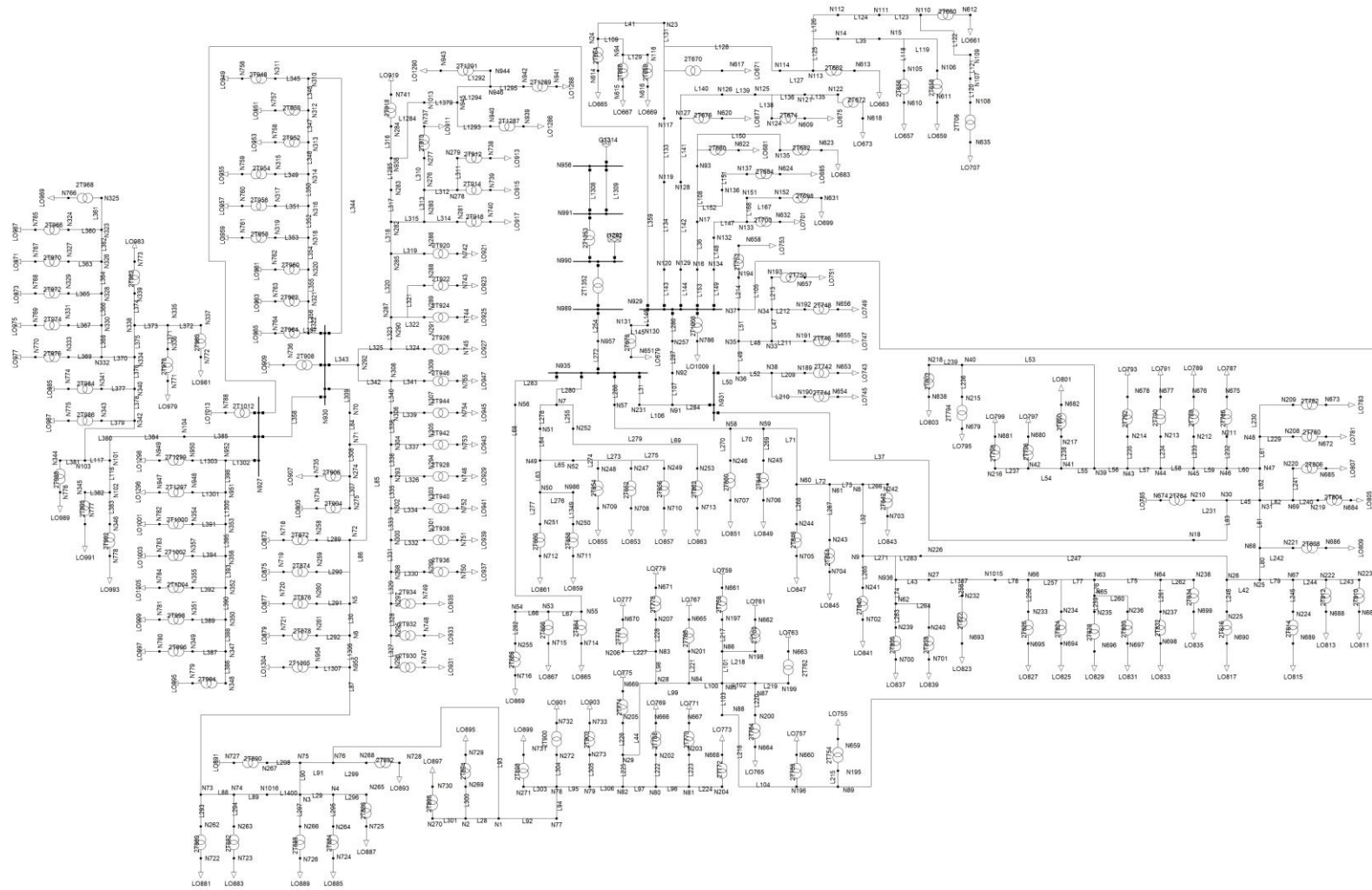
Bu tez çalışmasında, analiz edilen gerçek elektrik dağıtım şebekesi Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Bu şebeke, Türkiye’nin Ege Bölgesi’nde bulunmaktadır. Şekil 3.2’de, gerçek dağıtım şebekesinin N930 bölgesine ait yakınlaştırılmış görünümü yer almaktadır. Dağıtım şebekesi, 9 bara, 466 bağlantı noktası, 312 dağıtım hattı, 157 transformatör, 155 yük ve 1 senkron generatörden oluşmaktadır. Bu sistemin nominal frekansı 50 Hz, ana dağıtım gerilimi ise 34,5 kV seviyesindedir. Farklı gerilim seviyesindeki düğüm noktaları için PowerFactory modelindeki nominal gerilim değerleri Bara-N956 ve Bara-N991 için 10,5 kV, Bara-N990 için 154 kV değerleri alınmıştır. Gerçek işletme koşullarını yansıtmak amacıyla, bu tez çalışmasında gerilim kararlılığı analizleri için gerçek bir dağıtım şebekesi kullanılmıştır.

### 3.2.1 Şebeke Parametreleri

Elektrik şebekesi simülasyonunda parametrelerin doğru belirlenmesi, sonuçların güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Doğru bir model oluşturmak için şebeke topolojisi, bileşenlerin teknik özellikleri, yük profilleri ve kullanılan kontrol stratejileri gibi faktörler dikkatlice değerlendirilmelidir. Bu parametrelerin doğru belirlenmesi, şebeke performansının gerçek dünya koşullarına daha yakın simülasyonlarını mümkün kılacaktır. Bu tez çalışmasında, dağıtım trafolarının gerilim regülasyonu amacıyla otomatik kademe değiştirici yapıları dikkate alınmıştır. Gerilim profili üzerindeki etkileri değerlendirebilmek amacıyla, yüksek gerilim tarafında kademe değiştirici sınırları alt limit 0,95 p.u. ve üst limit 1,05 p.u. olacak şekilde belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan şebeke ekipmanlarına ait bazı temel parametreler Tablo 1’de örnek olarak verilmiştir. Tüm ekipmanlara ait detaylı parametre listesi EK-5,6,7,8,9,10’da sunulmuştur.

### 3.2.2 Güç Akışı Simülasyon Sonuçları

Kararlı durum güç akışı, bir yük akışı (load flow) hesabı ile gerçekleştirilmiştir. İncelenen elektrik dağıtım şebekesinde bara gerilimlerinin büyüklük ve açılarına ait sonuçlar sütun grafikleri ile Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te gösterilmiştir. Baralara ait gerilim büyüklükleri ve trafo merkezine olan uzaklıklar Tablo 2’de gösterilmektedir.



Çizim: M. ÖZGEN, ENYI Power-Factory Tesis Çizimi

Şekil 3.1 Gerçek bir elektrik dağıtım şebekesinin tek hat şeması

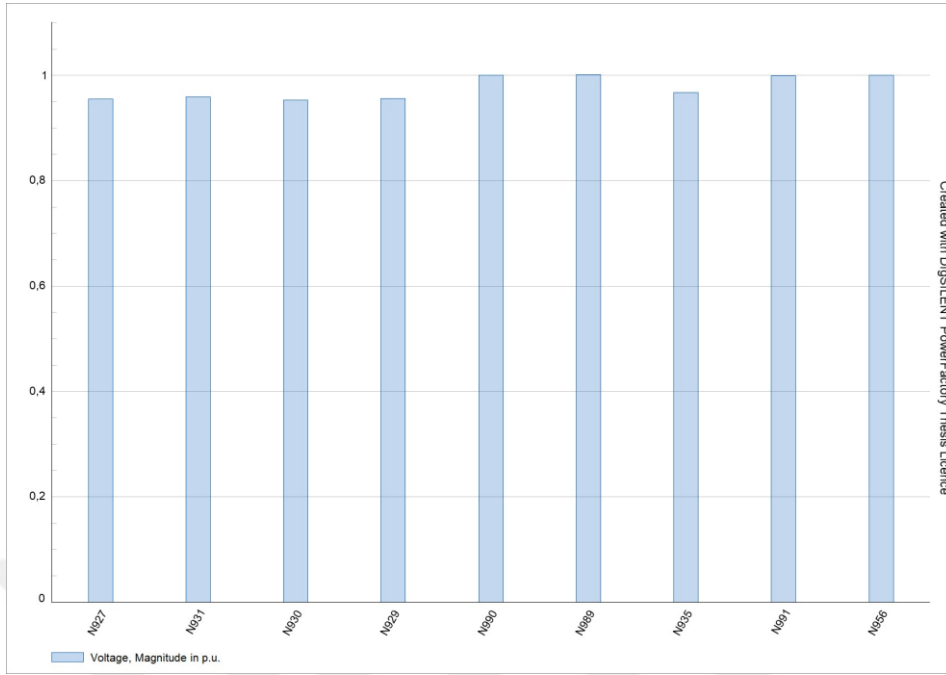


**Tablo 1** Temsili Şebeke parametreleri

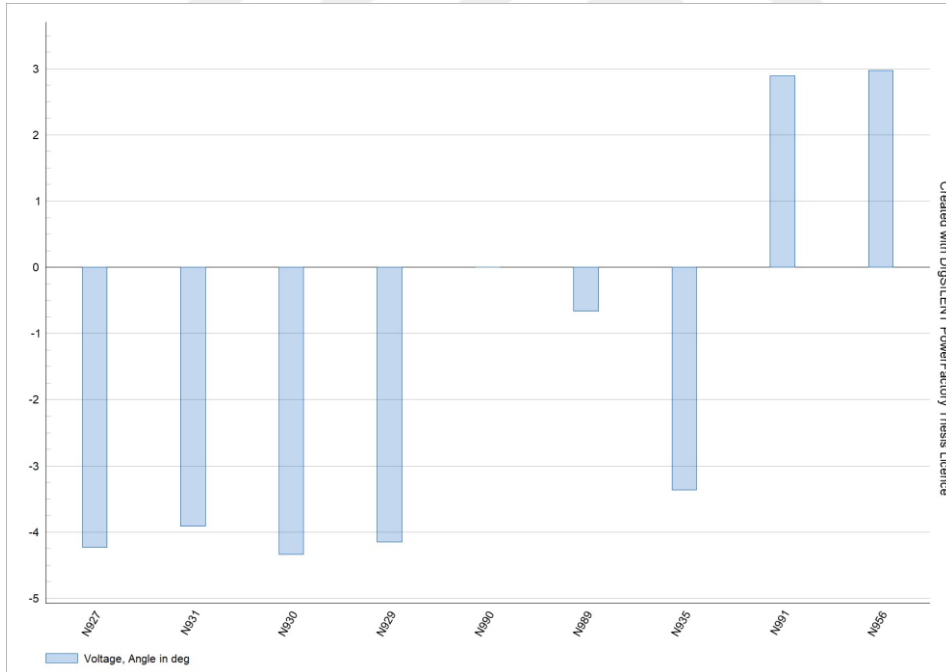
Eleman	Parametre	Birim	Değer
YG/OG transformatör	$S$	MVA $u\%$	50 11,7
OG/AG transformatör	$S$	kVA $u\%$	50 4
Generatör	$S$	MVA	10,5
Kablo	$l$	m	90
	$r$	$\Omega/\text{km}$	1,074
	$x$	$\Omega/\text{km}$	0,377
	$c$	nF/km	8,61
	$q$	$\text{mm}^2$	31,3
AG Yük	$P$	kW	23

**Tablo 2** Baraların trafo merkezine olan uzaklıkları ve gerilim büyüklükleri

Bara Adı	Trafo merkezinden uzaklık [m]	Gerilim büyüklüğü [p.u.]
N956	182,2	1,000
N991	-	1,000
N990	-	1,000
N989	-	1,001
N935	27142,2	0,968
N931	37130,3	0,959
N929	41420,2	0,956
N927	43966,5	0,955
N930	49319,3	0,953



Şekil 3.3 Gerilim büyüklükleri



Şekil 3.4 Gerilim açıları

## DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

### 4 GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA ETKİSİ: MEVCUT DURUM VE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ

Dördüncü bölümde, güneş enerji santrallerinin güç değişimlerinin ve batarya enerji depolama santralleri ile entegre kullanılması sonucu iletim şebekesindeki gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

#### 4.1 Mevcut Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi

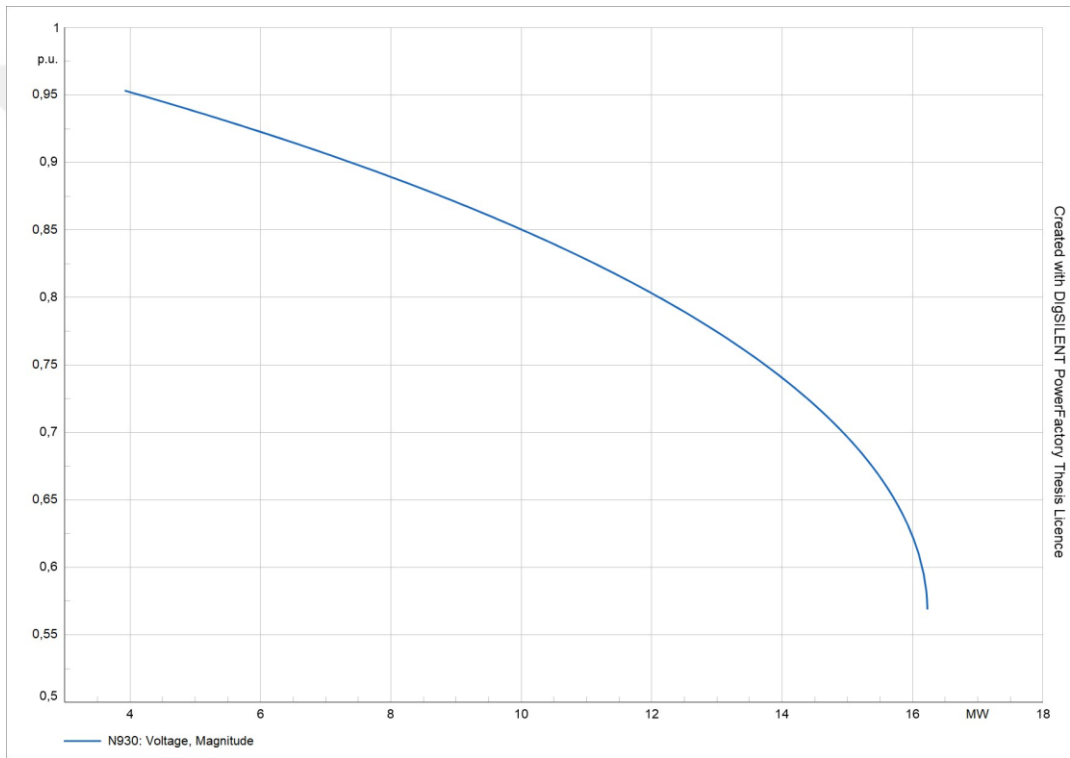
Güneş enerjisinin kesintili üretim karakteristiği ve meteorolojik koşullardan kaynaklanan belirsizlikler, özellikle düşük güçlü dağıtım sistemlerinde gerilim profili açısından önemli üretim dalgalanmalarına ve kararsızlıklara yol açabilmektedir. Bu bağlamda, PowerFactory'nin Transmission Networks Tools ile gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılmıştır. Bu kapsamda, elektrik dağıtım şebekesinin en kritik barası belirlenmiştir. En kritik baraya bir GES'in bağlanması ile gerilim kararlılığının nasıl etkilendiği tespit edilmiştir.

Üçüncü bölümde tanıtılan elektrik dağıtım şebekesinin güç-gerilim eğrisi analizinde en kritik bara N930 olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizde en kritik bara için güç-gerilim eğrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Tüm baralara ait güç-gerilim (P-V) eğrisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. P-V eğri analizinin temelinde yer alan Denklem 42, yükün aktif ve reaktif güçleri ile yük gerilimi arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Bu denklem, sistem geriliminin belirli yük koşulları altında nasıl değiştiğini matematiksel olarak ifade etmektedir.

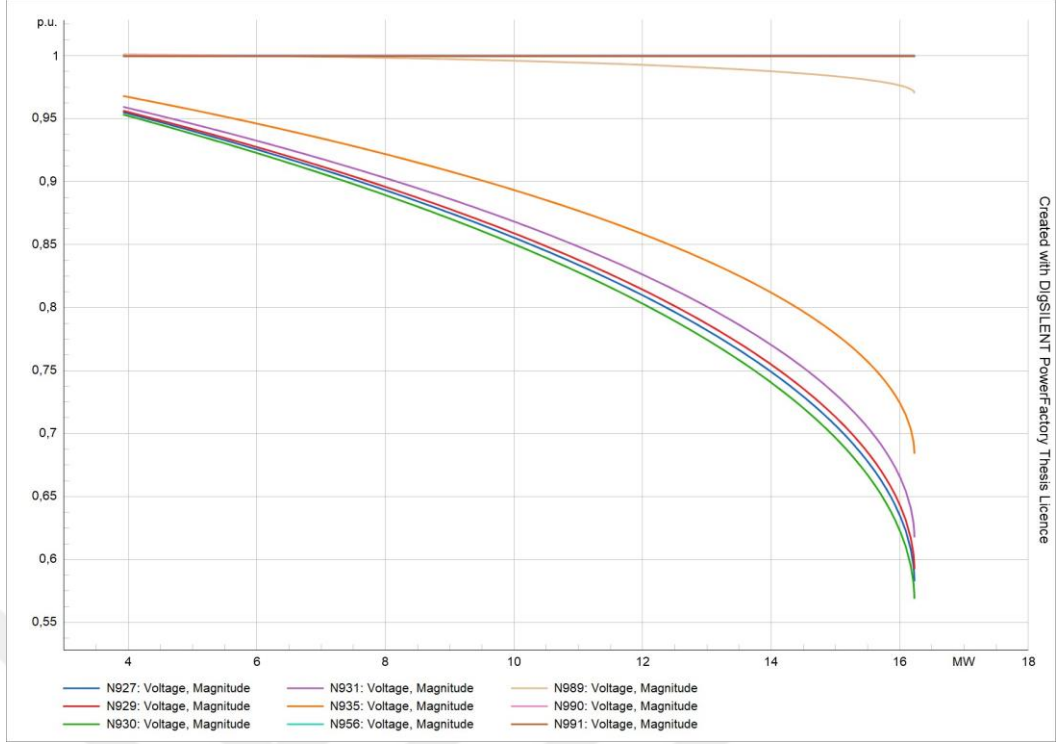
Türkiye'deki orta gerilim dağıtım sistemlerinde, nominal gerilim seviyesi 34,5 kV olup, bu baraya ait sistem analizlerinde IEC 60038 ve TS EN 50160 standartları dikkate alınmaktadır. TS EN 50160 standardına göre gerilim dalgalanmaları  $\pm\%10$  sınırları içinde kalmalıdır.

Bu bağlamda, P-V eğrisi analizlerinde gerilimin %95'ine karşılık gelen noktadaki aktif güç değeri, sistemin gerilim kararlılığı sınırı olarak kabul edilmiştir. Bu eşik, dağıtım sistemi ekipmanlarının güvenli işletme sınırları içinde kalmasını sağlamaktadır.

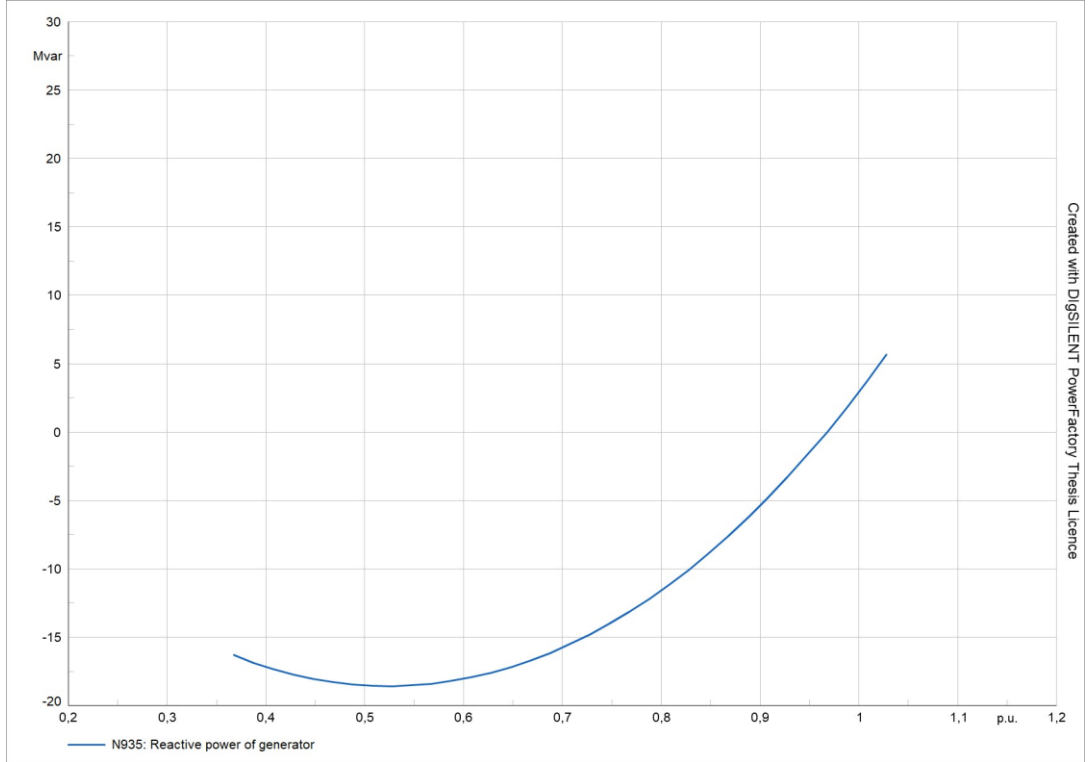
PowerFactory ile yapılan P-V analizinde, güç-gerilim eğrisi üzerinde 0,95 p.u. gerilim için karşılık gelen güç değerleri dikkate alınmıştır. Bu bölümde, tespit edilen kritik bara üzerinde sistemin mevcut durumda maksimum aktarılabilir gücü ve sisteme GES bağlandığı durumda maksimum aktarılabilir gücün artışı karşılaştırılmıştır.



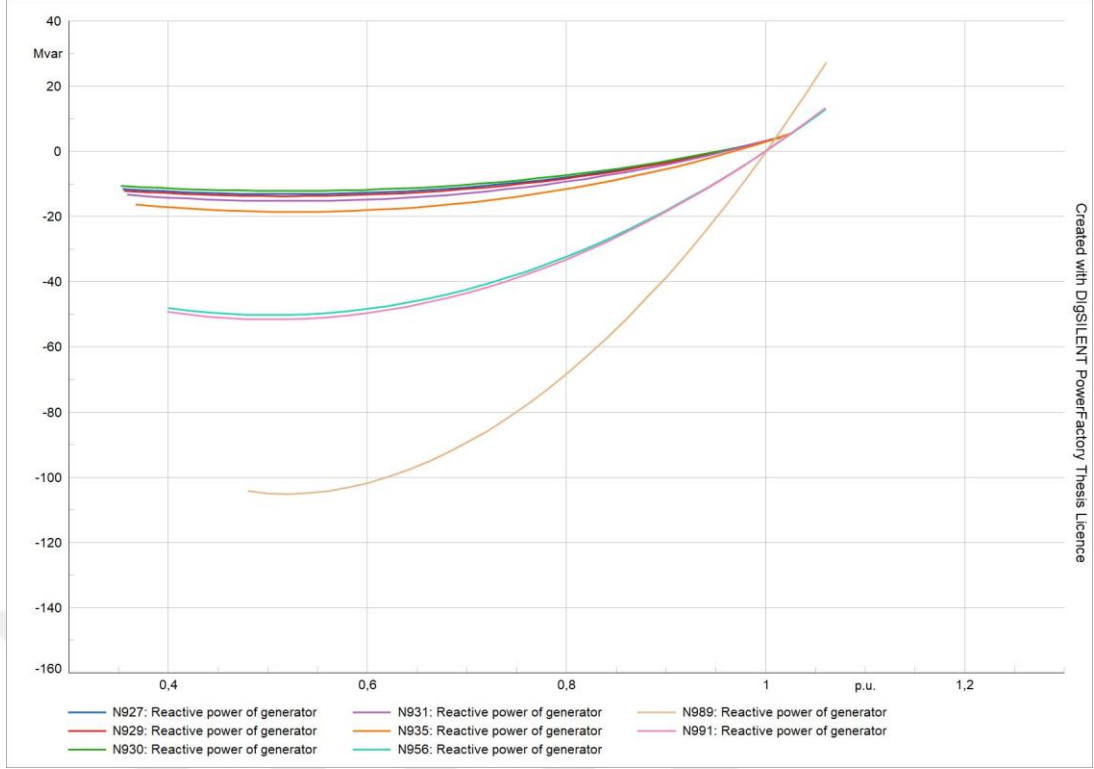
Şekil 4.1 Mevcut durumda en kritik baraya ait P-V eğrisi



Şekil 4.2 Mevcut durumda tüm baralara ait P-V eğrisi



Şekil 4.3 Mevcut durumda en kritik baraya ait Q-V eğrisi



**Şekil 4.4** Mevcut durumda tüm baralara ait Q-V eğrisi

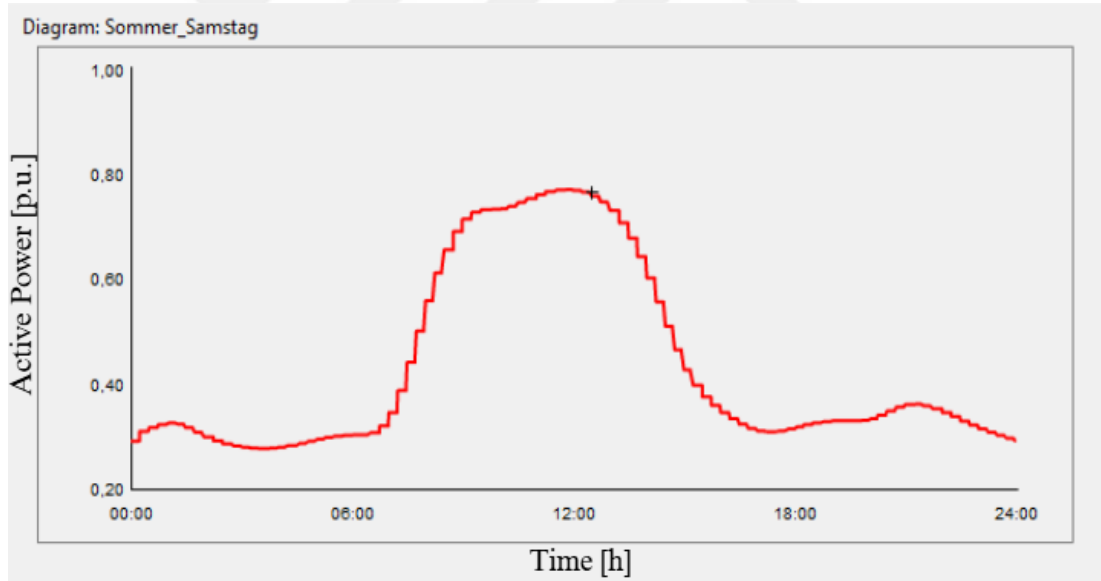
Şekil 4.3'te mevcut durumda en kritik bara olarak belirlenen N935 barasına ait Q-V eğrisi gösterilmiştir. Bu eğri, gerilim seviyesi düştükçe bara tarafından daha fazla reaktif güce ihtiyaç olduğunu ve minimum noktada sistemin en zayıf olduğu gerilim seviyesinin gözlemlenebildiğini göstermektedir. Eğrinin negatif reaktif güç bölgesinde uzun süre devam etmesi, sistemin gerilim kararlılığı açısından sınırdaki çalıştığını ve yeterli destek sağlanmadığı takdirde gerilim çökmesi riski bulunduğunu göstermektedir.

Şekil 4.4'te ise sistemdeki tüm baralara ait Q-V eğrileri birlikte gösterilmiştir. Buradan, N956 ve N991 baralarının daha düşük gerilim seviyelerinde reaktif güç ihtiyacının hızla arttığı gözlemlenmektedir. Diğer baraların, örneğin N929, daha kararlı bir gerilim-reaktif güç profiline sahiptir. Bu karşılaştırma, sistemde gerilim kararlılığı açısından hangi baraların daha kritik olduğunu belirlemeye ve bu baralara yönelik uygun kompanzasyon stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

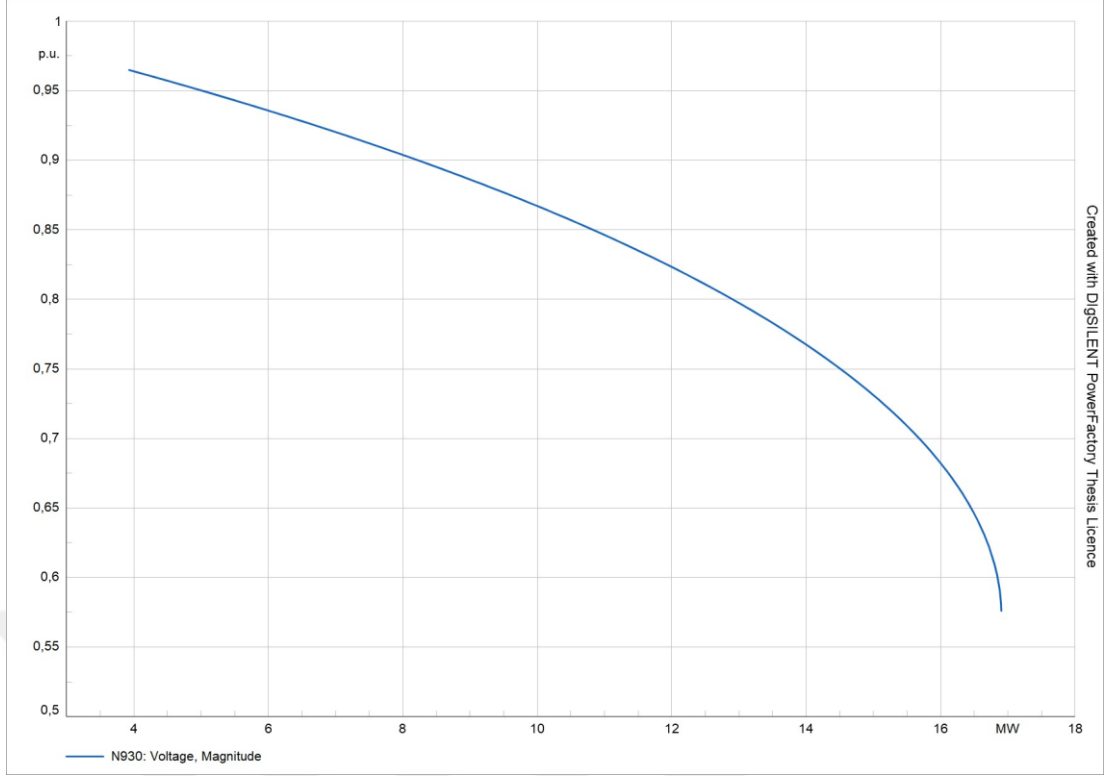
## 4.2 GES Bağlantılı Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi

Bu çalışmada, dağıtım sistemi üzerine entegre edilen güneş enerji santralinin (GES) gün içindeki üretim profilini temsil etmek amacıyla, DIgSILENT PowerFactory yazılımı içerisinde yer alan hazır zaman karakteristikleri kütüphanesinden yararlanılmıştır. Yaz mevsimine ait genel üretim davranışını modellemek için “Sommer\_Samstag” adlı üretim profili seçilmiştir.

1 MW kurulu güce sahip bir GES, gerilim kararlılığı analizinde şebekedeki en kritik bara üzerine bağlanmıştır. Bu bağlantı tercihi, GES üretimindeki güç değişimlerin gerilim kararlılığı üzerindeki etkilerinin daha net bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla yapılmıştır. GES için örnek bir günlük üretim profili Şekil 4.5’te gösterilmiştir. Kritik bara olan Bara-N930 ile bağlantılı GES’in gerilim kararlılığını değerlendirmek amacıyla güç-gerilim eğrisi Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Bir günlük aktif güç üretimi yapan GES üretim karakteristiği

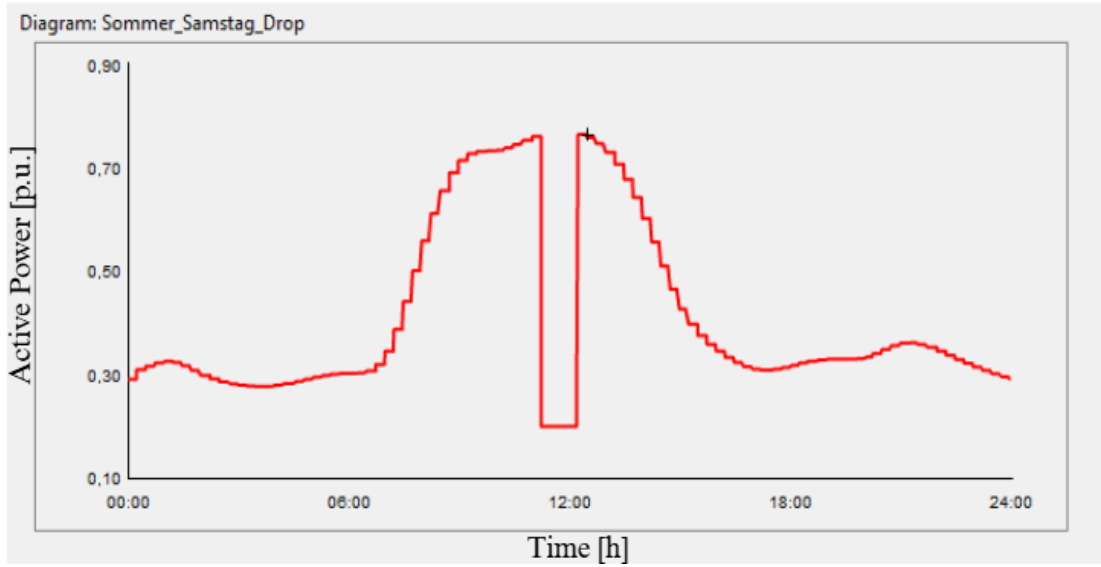


**Şekil 4.6** En kritik bara ile bağlantılı GES için P-V eğrisi

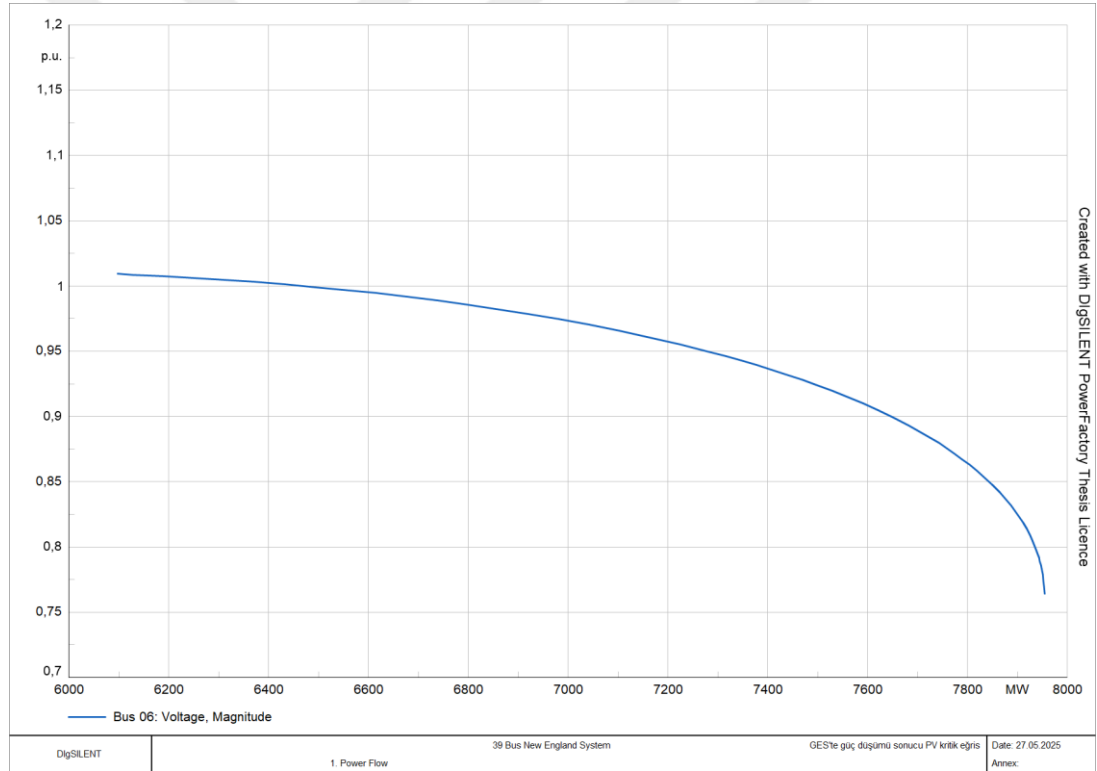
### 4.3 GES Bağlantılı ve Güç Düşümü Durumunda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi

GES'in üretim karakteristiğinde öğle saatlerinde bir bulut kütlesi geçişi senaryosu oluşturulmuştur. GES için %20'lik üretim yapacak şekilde güçte düşüş karakteristiği Şekil 4.7'de gösterilmiştir. GES'in güç üretimindeki düşüşü sebebiyle oluşacak yeni güç-gerilim eğrisi Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

İncelenen elektrik dağıtım şebekesinde gerilim kararlılığı analizi için ilk olarak mevcut durumdaki en kritik bara tespit edilmiştir. İkinci olarak en kritik baraya bir GES bağlanmıştır. Son olarak GES için bir güç düşüşü senaryosu modellenmiştir. Her bir durumda güç-gerilim eğrisindeki değişimler gözlemlenmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4'te GES için tasarlanan senaryolara ilişkin gözlemlenen değerler verilmiştir.



Şekil 4.7 GES günlük üretiminde düşüş karakteristiği



Şekil 4.8 En kritik bara ile bağlantılı GES’de güç düşümü sonucu P-V eğrisi

**Tablo 3** GES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için limit değerleri

	Gerilim (p.u.)	Güç (MW)	Güç değişim oranı (%)
Mevcut Durum	0,95	4,154	-
Normal koşulda GES	0,95	5,01	20,58 ↑
Güç düşümünde GES	0,95	4,32	13,77 ↓

**Tablo 4** GES entegrasyonunda Bara N930'daki güç-gerilim eğrisi için kritik nokta değerleri

	Gerilim (p.u.)	Güç (MW)	Güç değişim oranı (%)
Mevcut Durum	0,5693	16,23	-
Normal koşulda GES	0,576	16,91	4,2 ↑
Güç düşümünde GES	0,5709	16,37	3,19 ↓

#### 4.4 GES ve BEDS'in Birlikte Çalıştırılması Durumunda Gerilim Davranışı

BEDS modeli için farklı kontrol stratejileri kullanılmaktadır. BEDS ile bağlantılı iletim hattında gerilim ölçümü, güç ölçümü veya akım ölçümü yaparak kontrol edilebilmektedir. Bu bölümde, gerilim ölçümü ve güç ölçümlerinin nasıl modellenebileceği gösterilmiştir. Daha sonra GES ve BEDS'in birlikte çalıştığı senaryoda güç kontrollü batarya modeli kullanılarak, zamanla değişen güç talebine sahip bir yük profili altında sistemin gerilim tepkisini yarı-dinamik güç akışı (QDPF) ile analizi yapılmıştır.

##### 4.4.1 Gerilim Kontrollü Batarya Modeli

Bu bölümde, BEDS'in şebekeye bağlı olarak gerilim seviyesine göre nasıl kontrol edildiği açıklanmıştır. DIGSILENT PowerFactory yazılımında bu tür modellemeler için ElmQdsl objesi kullanılmaktadır. Quasi-dynamic model (QDM) ile batarya tipi olarak "Battery Type 1 (Voltage Measurement)" seçilir. Batarya ayarlarının yapılacağı parametre sayfası Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Modelleme ayarları için gerilim kontrollü bir BEDS modeli oluşturulurken, Şekil 4.9'daki parametreler gerilime göre bataryanın şarj ve deşarj olmasını belirler. Modelde tanımlı olan Pstore, Qstore, Pfeed ve Qfeed parametreleri aracılığıyla, bataryanın hem şarj hem de deşarj süreçlerinde aktif ve reaktif güç akışı kontrol altına alınmaktadır. Bu değerler sayesinde batarya, sistem gerilimi belirli eşiklerin üzerine çıktığında aktif ve reaktif güç depolamaya, belirli eşiklerin altına düştüğünde ise şebekeye hem aktif hem de reaktif güç sağlamaya başlar. Böylece batarya enerji depolama sistemi hem güç dengesine katkı sunmakta hem de gerilim profilini destekleyerek şebeke kararlılığına olumlu etki etmektedir.

The screenshot shows the 'Voltage Measurement' parameter input window. The window title is 'qds1 Quasi-Dynamic Model - Grid\Battery Type 1 (Voltage Measurement).ElmQdsl'. The window is divided into several sections:

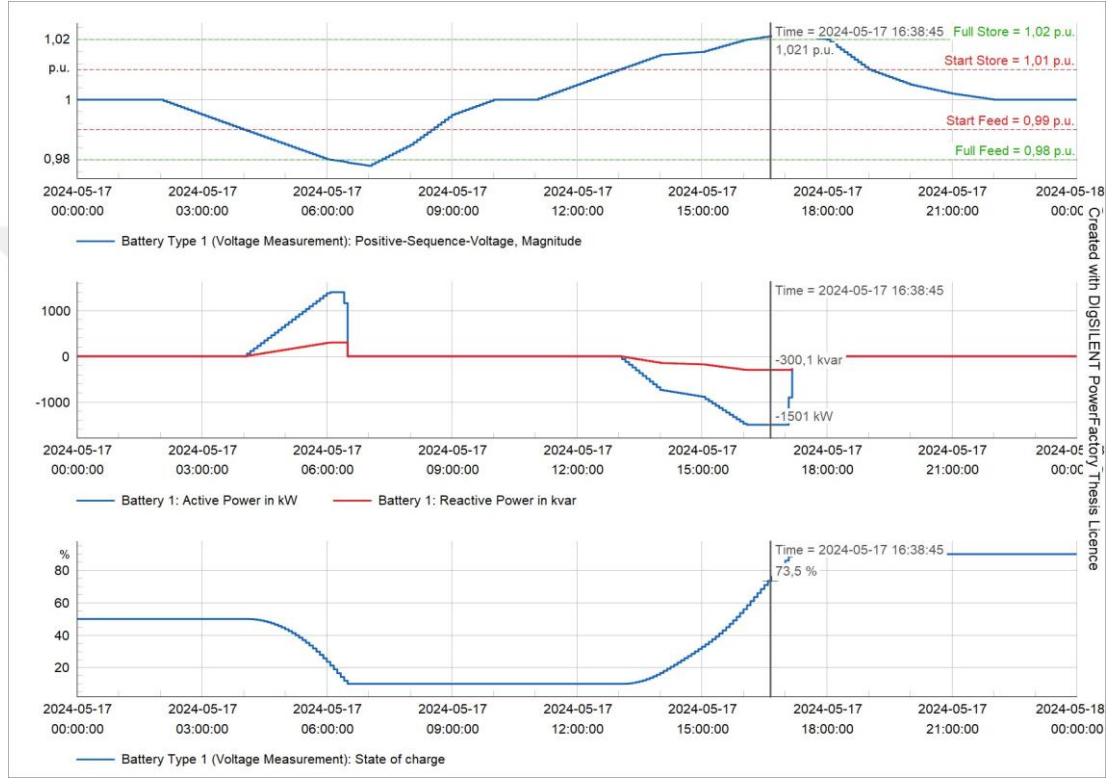
- Basic Data:** Name: Battery Type 1 (Voltage Measurement); Type: Battery Type 1 (Voltage Measurement); Out of Service: ; Supported calculation methods:  AC Load Flow, balanced, positive sequence;  AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC);  DC Load Flow (linear).
- Parameters:** A table with two columns: Parameter Name and Initial value.

Parameter Name	Initial value
Eini Storage energy size [MWh]	5,
SOCini Initial state of charge [%]	50,
SOCmin Minimal state of charge [%]	10,
SOCmax Maximal state of charge [%]	90,
Pstore Nominal storing active power [MW]	1,5
Qstore Nominal storing reactive power [Mvar]	0,3
uFullStore Voltage to store at full power [p.u.]	1,02
uStartStore Voltage to start storing [p.u.]	1,01
Pfeed Nominal feeding active power [MW]	1,4
Qfeed Nominal feeding reactive power [Mvar]	0,3
uStartFeed Voltage to start feeding [p.u.]	0,99
uFullFeed Voltage to feed at full power [p.u.]	0,98

Şekil 4.9 Voltage Measurement parametrelerinin giriş sayfası

Şekil 4.9'daki parametrelere sahip bir BEDS için simülasyon sonuçları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Üst grafikte, ölçülen iletim hattındaki gerilimin gün içinde nasıl değiştiği ve belirlenen eşik değerlerle nasıl ilişkilendiği gösterilmiştir. Gerilim 1.01 p.u.'i geçtiğinde batarya enerji depolamaya başlamıştır.

Gerilim 0.99 p.u.'nin altına düştüğünde ise batarya deşarj olmuştur. Ortanca grafikte, aktif ve reaktif güç değerleri zamanla değişmiş, bu da bataryanın şarj ve deşarj sürecinde aktif olarak çalıştığını göstermektedir. Alt grafikte ise bataryanın SoC (state of charge) yani doluluk oranının zamanla nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Sabah saatlerinde SoC %50'den %10'a düşmüştür. Öğleden sonra ise tekrar yükselerek enerji depoladığı görülmektedir.



Şekil 4.10 Gerilim kontrollü batarya modelinin simülasyon sonuçları

#### 4.4.2 Güç Kontrollü Batarya Modeli

Bu bölümde, Batarya Enerji Depolama Sistemi'nin (BEDS) aktif ve reaktif güç eşiklerine göre kontrol edildiği senaryo incelenmiştir. Bu yöntem, gerilim yerine güç değerlerine dayalı karar stratejisi ile bataryanın şarj ve deşarjını tetiklemektedir. Modelleme PowerFactory ortamında "Battery Type 2 (Power Measurement)" modeli ile gerçekleştirilir. Gerilim kontrollü modelin yerine bu yapıda şarj ve deşarj davranışı, ölçülen aktif güç seviyelerine bağlı olarak belirlenmektedir. Modelleme ayarları için güç kontrollü bir BEDS modeli oluşturulurken, Şekil 4.11'deki parametreler güce göre bataryanın şarj ve deşarj olmasını belirler.

Quasi-Dynamic Model - Grid\Battery Type 2 (Power Measurement).ElmQdsl

Basic Data  
Load Flow  
Description

Name: Battery Type 2 (Power Measurement)

Type: ...attery Type 2 (Power Measurement)

Out of Service

Supported calculation methods

AC Load Flow, balanced, positive sequence

AC Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC)

DC Load Flow (linear)

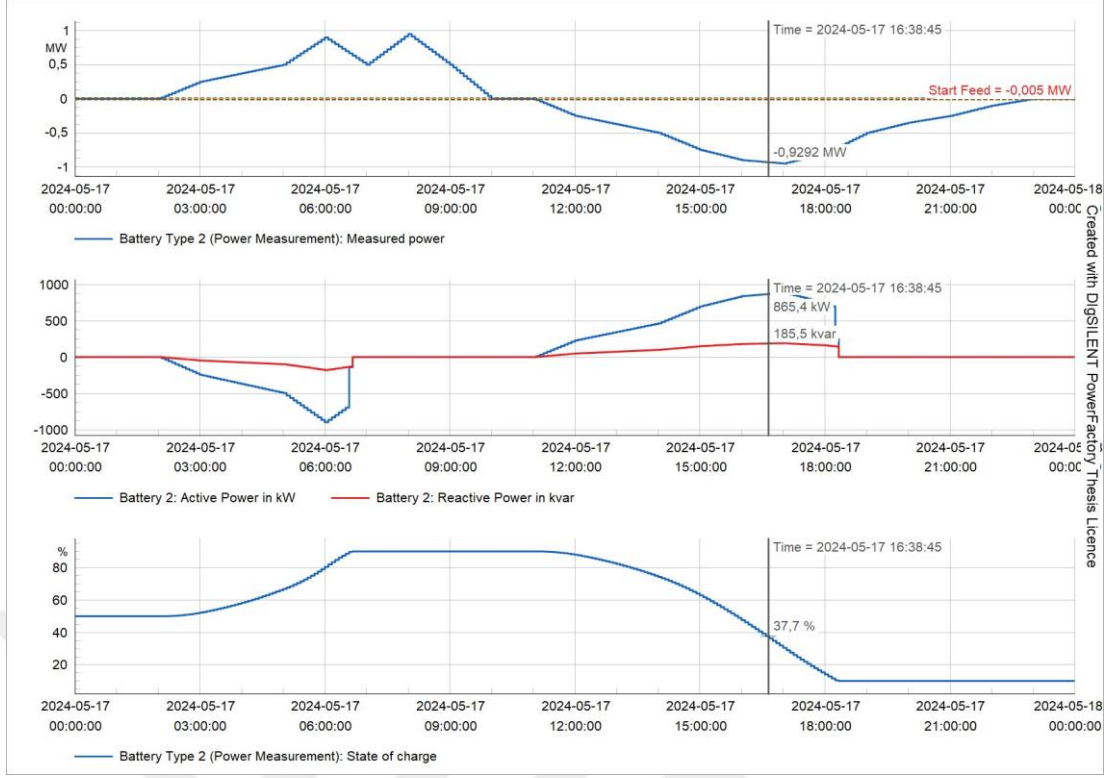
Parameters:

	Initial value
Eini Storage Energy Size [MWh]	5,
SOCini Initial state of charge [%]	50,
SOCmin Minimal state of charge [%]	10,
SOCmax Maximal state of charge [%]	90,
Pstore Nominal storing active power [MW]	1,5
Qstore Nominal storing reactive power [Mvar]	0,3
PFullStore Power to store at full power [MW]	1,5
PStartStore Power to start storing [MW]	0,005
Pfeed Nominal feeding active power [MW]	1,4
Qfeed Nominal feeding reactive power [Mvar]	0,3
PStartFeed Power to start feeding [MW]	0,005
PFullFeed Power to feed at full power [MW]	1,5
orientation 1=terminal j is closest, otherwise -1	1,

OK  
Cancel  
Check

Şekil 4.11 Power Measurement parametrelerinin giriş sayfası

Şekil 4.11'deki parametrelere sahip bir BEDS için simülasyon sonuçları Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Üst grafikte ölçülen aktif güç değişimi görülmektedir. Sabah saatlerinde ölçülen güç PStartStore eşliğini geçtiğinde batarya şarj olmaya başlamıştır. Öğleden sonraya doğru aktif güç PStartFeed eşliğinin altına düştüğünde batarya sistemden enerji çekerek deşarj sürecine geçmiştir. Reaktif güç değişimi, sistemin kompanzasyon ihtiyacına göre  $\pm 0,3$  MVAR arasında salınım göstermiştir. Böylece BEDS'in hem şarj hem de deşarj sürecinde reaktif katkı sağladığını gösterilmiştir. Günün erken saatlerinde SoC değeri %50'den başlayarak %90 seviyelerine kadar yükselmiştir. Daha sonra enerji ihtiyacı nedeniyle deşarj gerçekleşmiş ve SoC tekrar %10 değerine düşmüştür.

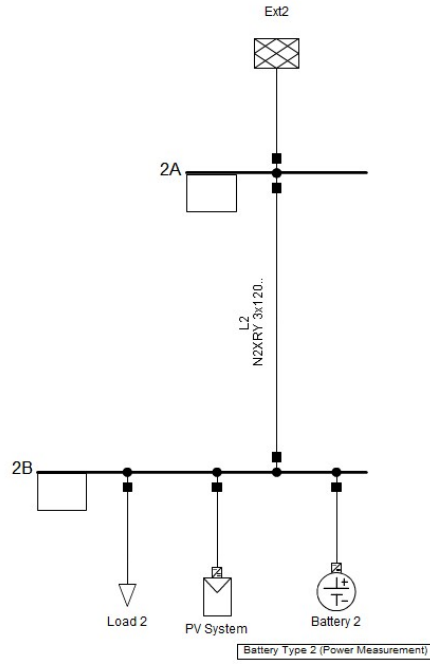


Şekil 4.12 Güç kontrollü batarya modelinin simülasyon sonuçları

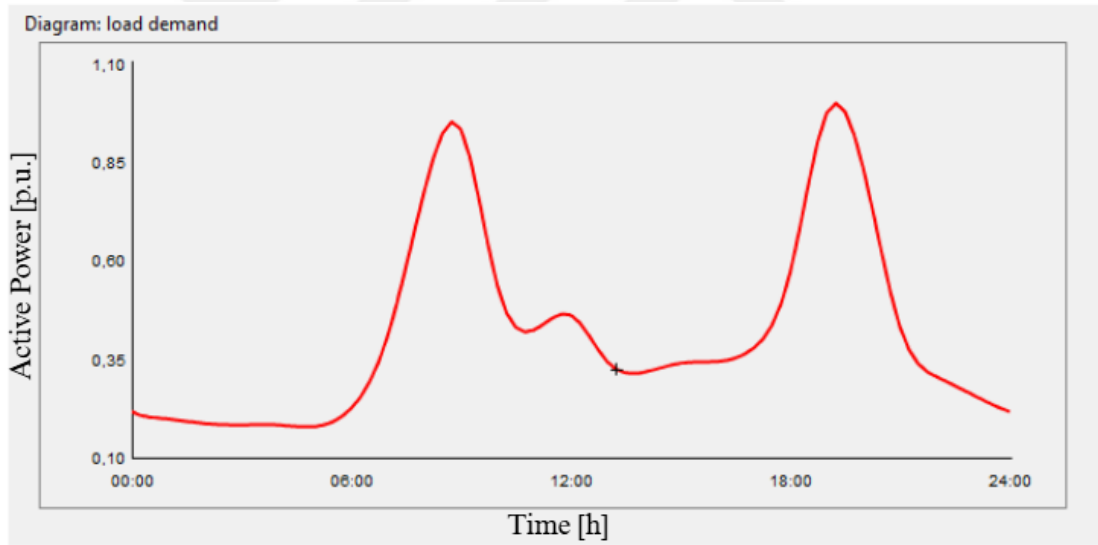
#### 4.4.3 GES ve BEDS'in Entegre Şekilde Gerilim Davranışına Etkisi

Bu bölümde, GES ile BEDS'in birlikte çalıştığı bir senaryo analiz edilmiştir. Tasarlanan sistemde GES için Şekil 4.5'teki üretim karakteristiği kullanılmıştır. Bir günlük aktif güç tüketimi yapan yük karakteristiği ise Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Örnek şebeke Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Amaç, dağıtım şebekesine entegre edilen GES kaynaklı gerilim dalgalanmalarının, güç kontrollü bir BEDS modeli ile nasıl yönetilebileceğini göstermektir. Çalışmada, zamana bağlı olarak değişen bir yük profili tanımlanmıştır.

Tasarlanan simülasyon senaryosunda, GES üretimi zamana bağlı olarak belirli bir karakteristiğe sahipken yük tarafında da değişken güç talep eden bir model oluşturulmuştur. Bu değişken yük profili sayesinde, sistemin değişken işletme koşullarına yakın davranışlar sergilemesi sağlanmıştır. Bu koşullar altında BEDS'in aktif güç ölçümüne dayalı kontrol algoritması devreye girerek belirlenen eşik değerleri doğrultusunda şarj ve deşarj işlemlerini gerçekleştirmiştir.



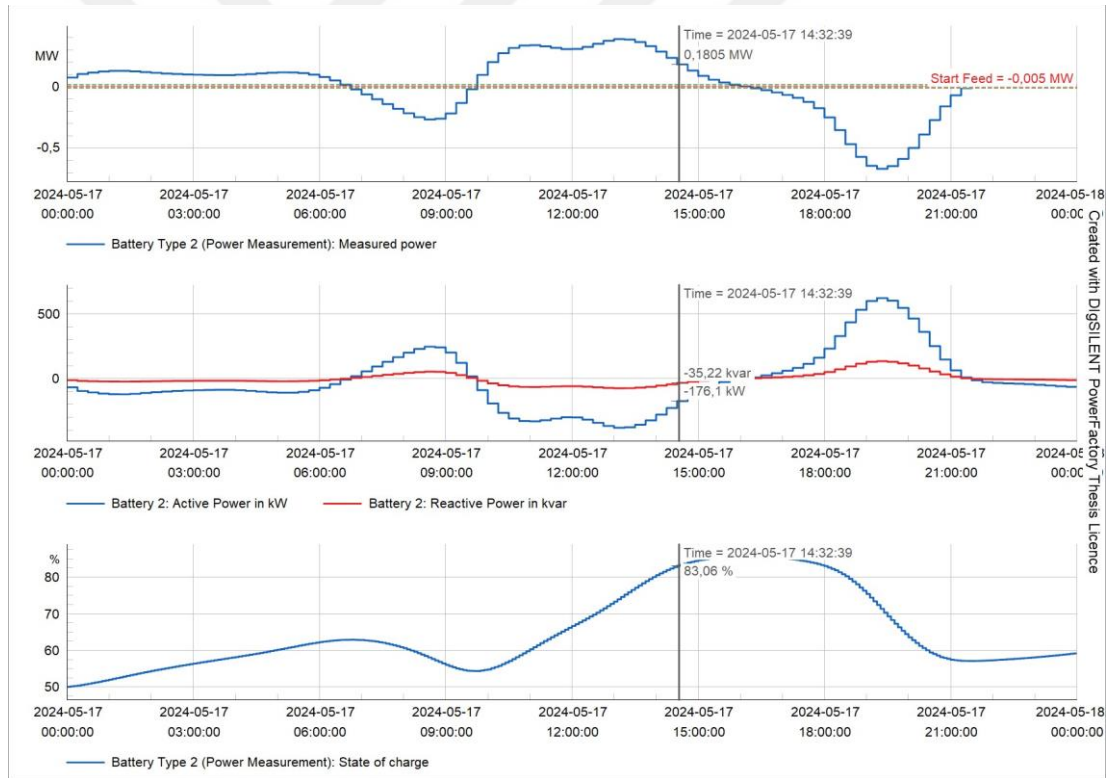
Şekil 4.13 Şebekeye bağlı GES ve BEDS tek hat şeması



Şekil 4.14 Bir günlük aktif güç tüketimi yapan yük karakteristiği

Şekil 4.15'te, örnek senaryo kapsamında kullanılan BEDS'in aktif güç, reaktif güç, güç ölçümleri ve doluluk durumu (SoC) zamana bağlı olarak analiz edilmiştir. Sabahın ilerleyen saatlerinde sistemdeki yük artışı ve GES üretiminin yetersizliği nedeniyle batarya deşarj moduna geçmiştir. Batarya 0,5 MW seviyelerine kadar aktif güç sağlamıştır.

Bu süre zarfında bataryanın doluluk oranı önce %60 ve sonrasında %50 seviyelerine kadar düşmüştür. GES üretiminin artmaya başladığı öğle saatlerinden itibaren yükteki değişimlere rağmen batarya yeniden şarj moduna geçmiş ve gün ortasında doluluk oranı %90'a çıkmıştır. Akşam saatlerine doğru yükteki artış ve GES üretiminin düşmesiyle birlikte batarya tekrar devreye girerek şebekeye aktif ve reaktif güç desteği sağlamıştır. Ölçülen güç değerleri üzerinden tanımlanan eşik seviyelerine bağlı olarak, batarya kontrol algoritması doğru zamanda şarj ve deşarj komutlarını başarıyla gerçekleştirmiştir. Ayrıca, bataryanın reaktif güç desteği de yaklaşık  $\pm 0,3$  MVAR civarında sabit tutularak gerilim profilinin desteklenmesine katkı sağlanmıştır. Bu bulgular, BEDS'in güç kontrollü stratejisiyle GES üretim kaynaklı gerilim dengesizliklerinin etkin biçimde giderilebileceğini ve sistemin gerilim kararlılığı açısından daha stabil bir yapıya kavuşturulabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.15 Güç kontrollü GES ve BEDS entegrasyonu için simülasyon sonuçları

## BEŞİNCİ BÖLÜM

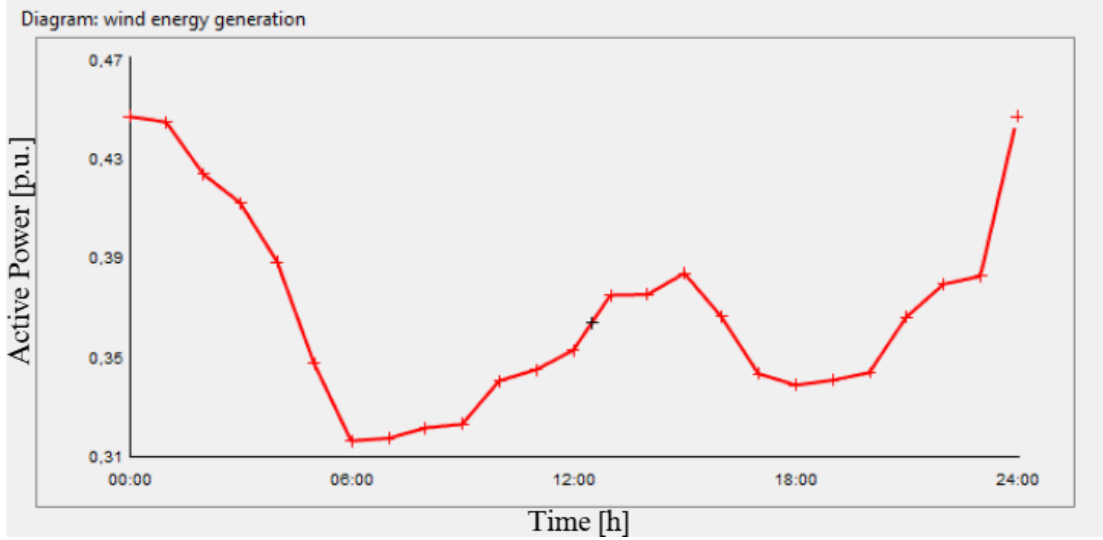
### 5 RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA ETKİSİ

Beşinci bölümde, rüzgar enerjisi santrallerinin güç değişimlerinin ve batarya enerji depolama santralleri ile entegre kullanılması sonucu iletim şebekesindeki gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

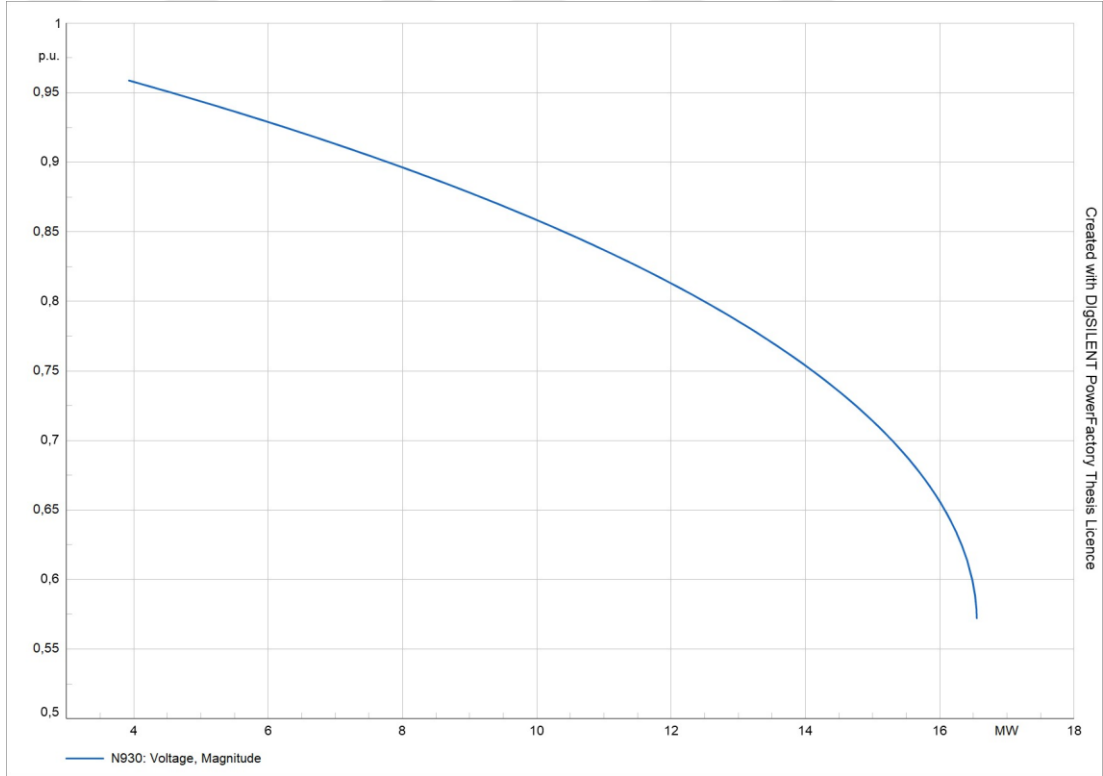
#### 5.1 RES Bağlantılı Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi

Rüzgar enerjisinin kesintili üretim karakteristiği ve meteorolojik koşullardan kaynaklanan belirsizlikler, özellikle düşük güçlü dağıtım sistemlerinde gerilim profili açısından önemli üretim dalgalanmalarına ve kararsızlıklara yol açabilmektedir. Bu kapsamda, analiz edilen dağıtım şebeke modelinde daha önce tespit edilen en kritik barada RES'in etkisi ile gerilim kararlılığının nasıl etkilendiği değerlendirilmiştir.

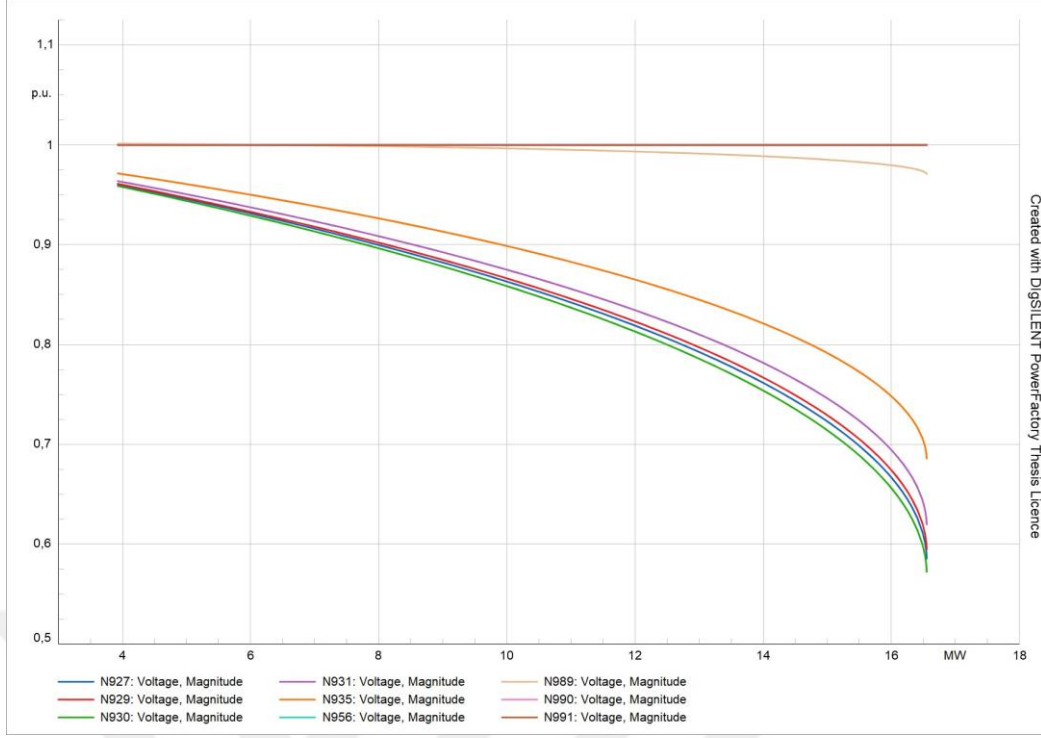
Bu çalışmada rüzgar enerji santraline ait üretim profili oluşturulurken, WindEurope platformu üzerinden paylaşılan 30 Temmuz 2025 tarihli Avrupa geneli saatlik rüzgar enerji üretim verisi referans alınmıştır [17]. Bu verilerden elde edilen oranlar ile 1 MW kapasiteli temsili bir rüzgar enerji santralinin günlük üretim profili modellenmiştir. Bu bağlamda, en kritik bara ile bağlantılı 1 MW gücünde bir RES için Şekil 5.1'deki gibi bir üretim karakteristiği modellenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sistemde RES etkili güç-gerilim eğrisi Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Tüm baralara ait güç-gerilim eğrisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Bir günlük aktif güç üretimi yapan RES üretim karakteristiği



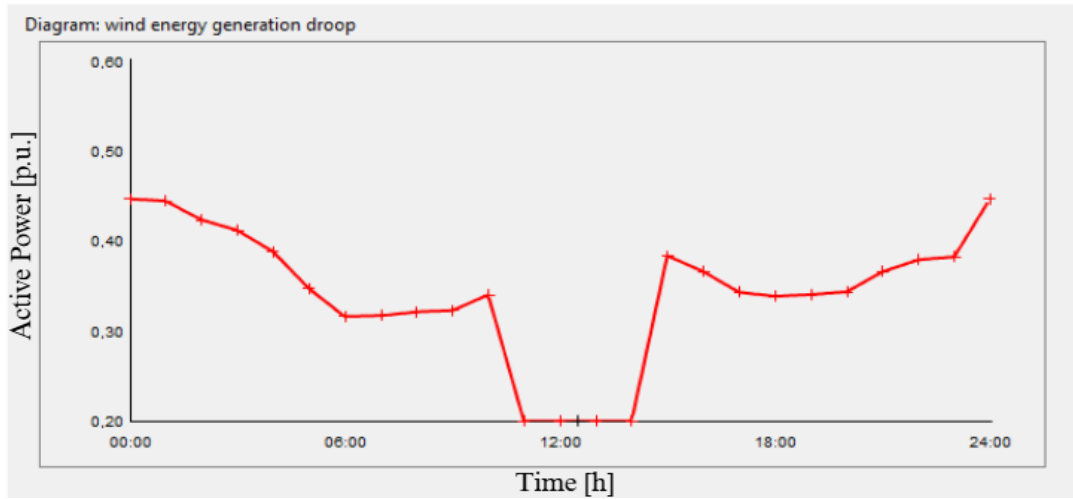
Şekil 5.2 En kritik bara ile bağlantılı RES için P-V eğrisi



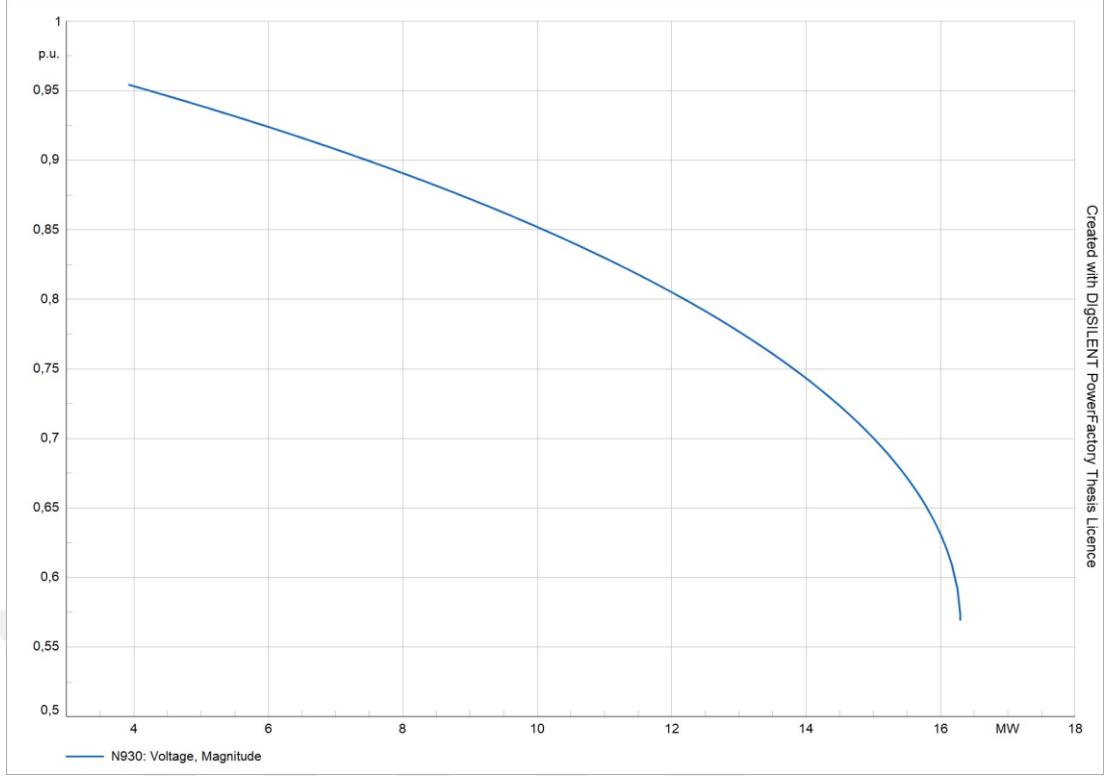
Şekil 5.3 Tüm baralar için P-V kritik nokta eğrisi (Sistemde RES var)

## 5.2 RES Bağlantılı ve Güç Düşümü Durumunda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi

RES'in üretim karakteristiğinde rüzgar hızında bir düşüş senaryosu oluşturulmuştur. RES için %20'lik üretim yapacak şekilde güçte düşüş karakteristiği Şekil 5.4'te gösterilmiştir. RES'in güç üretimindeki düşüşü sebebiyle oluşacak yeni güç-gerilim eğrisi Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4 RES günlük üretiminde düşüş karakteristiği



**Şekil 5.5** En kritik bara ile bağlantılı RES’de güç düşümü sonucu P-V eğrisi

Farklı senaryoların analizi sonucunda en kritik baraya bir RES bağlantısı yapılmıştır. RES için bir güç düşüşü senaryosu modellenmiştir. Her bir durumda güç-gerilim eğrisindeki değişimler gözlemlenmiştir. Tablo 5 ve Tablo 6’da RES için tasarlanan senaryolara ilişkin gözlemlenen değerler verilmektedir.

**Tablo 5** RES entegrasyonunda Bara N930’daki güç-gerilim eğrisi için limit değerleri

	Gerilim (p.u.)	Güç (MW)	Güç değişim oranı (%)
Mevcut Durum	0,95	4,154	-
Normal koşulda RES	0,95	4,557	9,70 ↑
Güç düşümünde RES	0,95	4,237	7,02 ↓

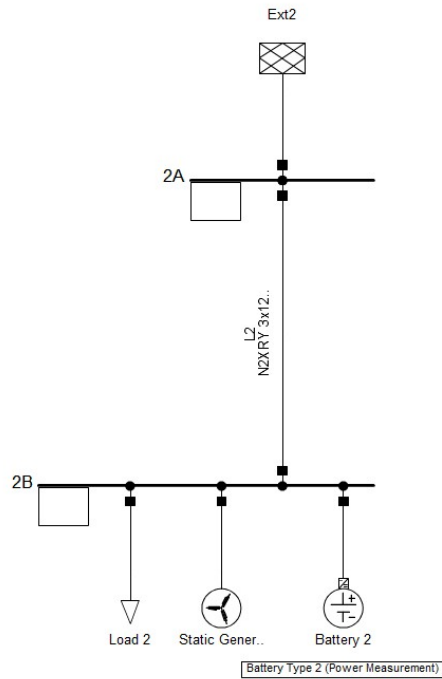
**Tablo 6** RES entegrasyonunda Bara N930’daki güç-gerilim eğrisi için kritik nokta değerleri

	Gerilim (p.u.)	Güç (MW)	Güç değişim oranı (%)
Mevcut Durum	0,5693	16,23	-
Normal koşulda RES	0,5722	16,55	1,97 ↑
Güç düşümünde RES	0,5695	16,3	1,51 ↓

### 5.3 RES ve BEDS'in Birlikte Çalıştırılması Durumunda Gerilim Davranışı

Bu bölümde, RES ile BEDS'in birlikte çalıştığı bir senaryo analiz edilmiştir. Örnek şebeke Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Amaç, dağıtım şebekesine entegre edilen RES kaynaklı gerilim dalgalanmalarının, güç kontrollü bir BEDS modeli ile nasıl yönetilebileceğini göstermektir. Çalışmada, dördüncü bölümde kullanılan zamana bağlı olarak değişen yük profili tanımlanmıştır.

Tasarlanan simülasyon senaryosunda, RES üretimi zamana bağlı olarak belirli bir karakteristiğe sahipken yük tarafında da değişken güç talep eden bir model oluşturulmuştur. Bu değişken yük profili sayesinde, sistemin değişken işletme koşullarına yakın davranışlar sergilemesi sağlanmıştır. Bu koşullar altında BEDS'in aktif güç ölçümüne dayalı kontrol algoritması devreye girerek belirlenen eşik değerleri doğrultusunda şarj ve deşarj işlemlerini gerçekleştirmiştir.

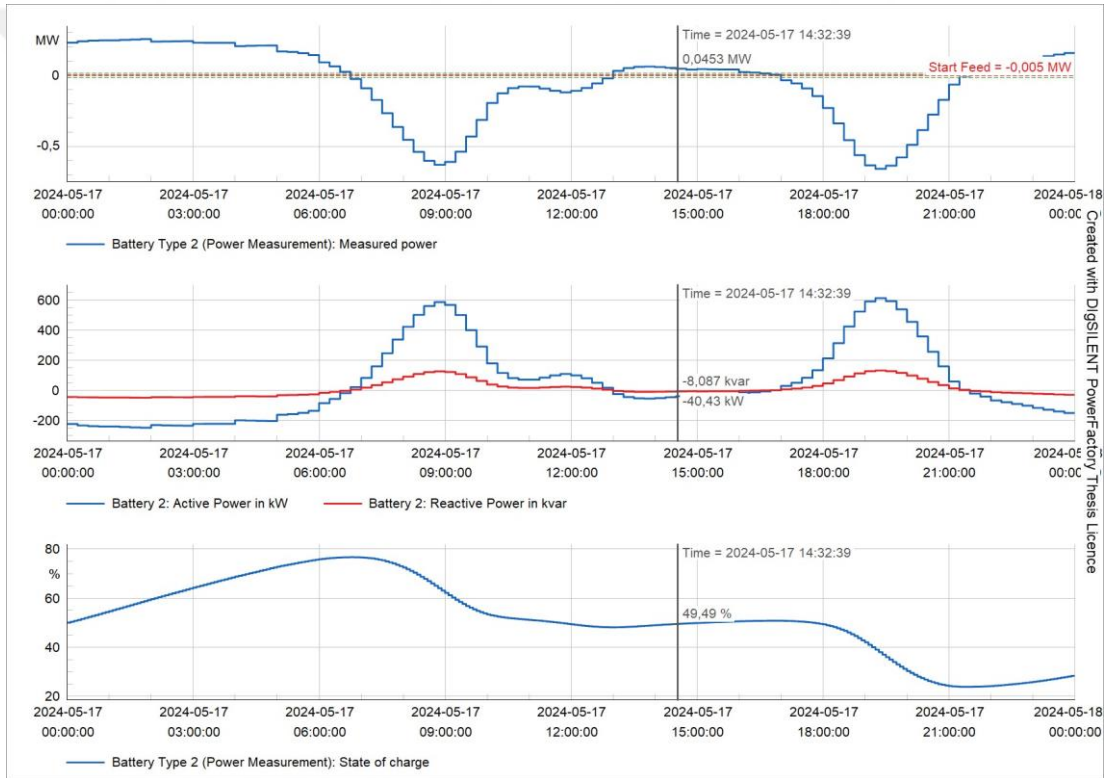


Created with DIGSILENT PowerFactory Thesis Licence

Şekil 5.6 Şebekeye bağlı RES ve BEDS tek hat şeması

Şekil 5.7'de, şebekeye bağlı RES ve BEDS senaryosu kapsamında aktif güç, reaktif güç, güç ölçümleri ve doluluk durumu (SoC) yarı dinamik simülasyon (QDS) ile analiz edilmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre batarya, sabah saatlerinde ölçüm noktasındaki güç artış doğrultusunda şarj moduna geçmiştir. Ölçülen güç, belirlenen üst eşik değeri aştığında aktif güç çekerek enerjiyi depolamıştır. Bu süreçte bataryanın SoC değeri yaklaşık %50 seviyelerinden %75 seviyelerine kadar yükselmiştir. Öğle saatlerine doğru şebeke iletim noktasındaki güçte meydana gelen düşüşe bağlı olarak batarya sistemine aktif güç sağlamaya başlamış ve deşarj moduna geçmiştir. Ayrıca, bataryanın reaktif güç desteği de  $\pm 0.3$  MVAR civarında sabit tutularak gerilim profilinin desteklenmesine katkı sağlanmıştır. Gün içerisinde iki farklı deşarj döngüsünün gerçekleştiği ve her iki döngüde de bataryanın sistemin güç dengesine etkin biçimde katkı sunduğu görülmektedir.



**Şekil 5.7** Güç kontrollü RES ve BEDS entegrasyonu için simülasyon sonuçları

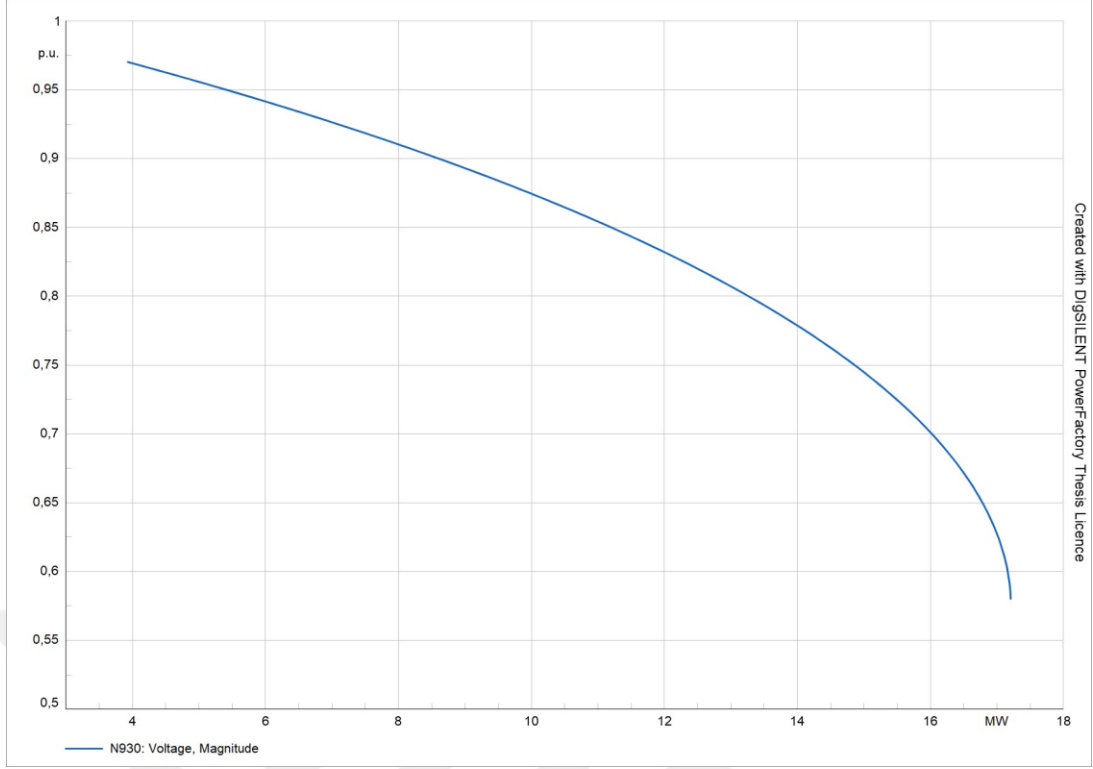
## ALTINCI BÖLÜM

### 6 GÜNEŞ VE RÜZGAR ENERJİ SANTRALİ ENTEGRASYONUNUN DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GERİLİM KARARLILIĞINA ETKİSİ

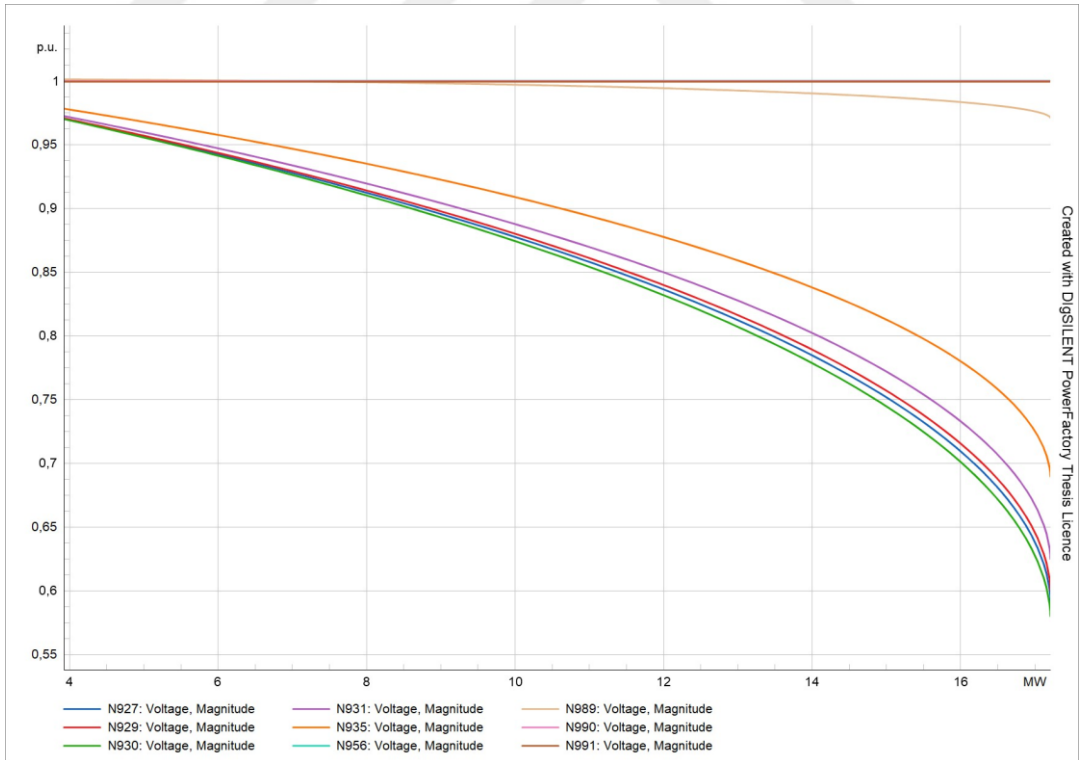
Altıncı bölümde, güneş enerji santrali ve rüzgar enerjisi santrallerinin güç değişimlerinin ve batarya enerji depolama santralleri ile entegre kullanılması sonucu dağıtım şebekesindeki gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

#### 6.1 GES ve RES Bağlantılı Durumda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi

Güneş enerjisi santralleri, doğrudan güneş ışınımına bağlı olarak üretim gerçekleştiren sistemler olduğu için genellikle gündüz saatlerinde yüksek üretim kapasitesine ulaşmakta ve gece saatlerinde üretim yapamamaktadır. Rüzgar enerjisi santralleri ise rüzgar hızının zamana ve mekana bağlı değişkenliğinden etkilenmektedir. Bu sistemlerin her ikisi de doğası gereği kesintili kaynaklar olduğu için dağıtım şebekesi üzerinde ani üretim artışları veya düşüşleri şeklinde etkiler oluşturabilir. Bu durum, özellikle düşük güçlü sistemlerde gerilim salınımlarına ve kararlılık sorunlarına yol açabileceğinden, bu tür kaynakların şebekeye entegrasyonu sırasında detaylı analizlerin yapılması büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, GES ve RES sistemleri şebekeye güç elektroniği tabanlı eviriciler aracılığıyla bağlandıkları sebebiyle yalnızca gerilim kararlılığı açısından değil, aynı zamanda gerilim dalga formu kalitesi bakımından da değerlendirilmelidir. YEK'lerin şebeke ile etkileşimi hem kararlılık hem de güç kalitesi boyutlarıyla ele alınmalıdır. Bu bölümde, analiz edilen dağıtım şebeke modelinde daha önce tespit edilen en kritik barada GES ve RES'in etkisi ile gerilim kararlılığı nasıl etkilendiği değerlendirilmiştir. Bu çalışmada dördüncü bölümde kullanılan GES üretim profili ile beşinci bölümde kullanılan RES üretim profili esas alınmıştır. Bu veriler ile 1 MW kapasiteli temsili GES ve RES sistemi kritik baraya entegre edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sistemde GES ve RES etkisi altında güç-gerilim eğrisi Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Tüm baralara ait güç-gerilim eğrisi ise Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



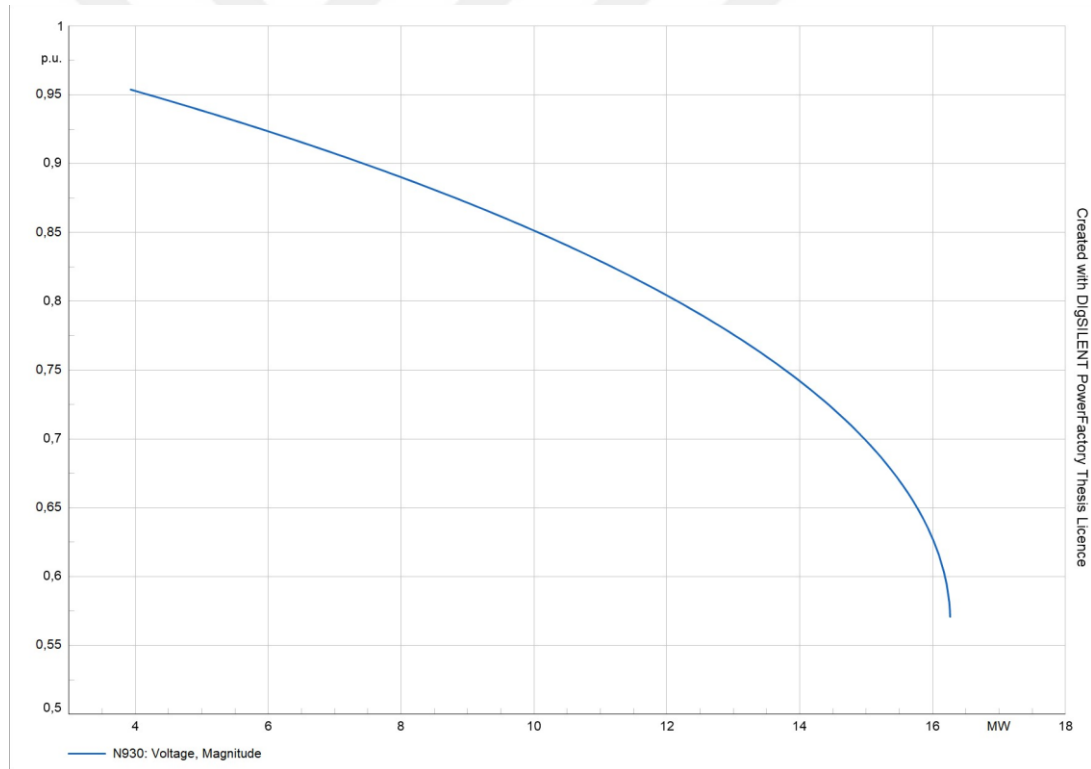
Şekil 6.1 GES ve RES bağlantılı bara için mevcut durum P-V eğrisi



Şekil 6.2 Tüm baralar için P-V kritik nokta eğrisi (Sistemde GES ve RES var)

## 6.2 GES ve RES Bağlantılı ve Güç Düşümü Durumunda Güç-Gerilim (P-V) Eğrisi Analizi

Güneş ışınımı ve rüzgar hızındaki azalmaya bağlı olarak, önceki bölümlerde GES ve RES üretimlerinde meydana gelebilecek düşüş durumları için senaryolar oluşturulmuştur. Her iki yenilenebilir enerji kaynağının da 1MW'lık nominal güçlerinin %20'si oranında üretim yaptığı bu senaryolarda, ilgili güç düşüş karakteristikleri sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 5.4'te sunulmuştur. Bu doğrultuda hem GES hem de RES'in aynı anda düşük üretim seviyesinde şebekeye entegre olduğu durumda sistemin gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, GES ve RES bağlantılı ve güç düşümü durumunda yeni güç-gerilim eğrisi Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 En Kritik Barada GES ve RES'de Güç Düşümü sonucu P-V Eğrisi

Farklı senaryoların analizi sonucunda en kritik baraya bir GES ve bir RES bağlantısı yapılmıştır. Hem GES hem de RES için bir güç düşüşü senaryosu modellenmiştir. Her bir durumda güç-gerilim eğrisindeki değişimler gözlemlenmiştir.

Tablo 9 ve Tablo 10’da GES ve RES için tasarlanan senaryolara ilişkin gözlemlenen değerler verilmektedir.

**Tablo 7** GES ve RES entegrasyonunda Bara N930’daki güç-gerilim eğrisi için limit değerleri

	Gerilim (p.u.)	Güç (MW)	Güç değişim oranı (%)
Mevcut Durum	0,95	4,15	-
Normal koşulda GES+RES	0,95	5,41	30,36 ↑
Güç düşümünde GES+RES	0,95	4,2	22,36 ↓

**Tablo 8** GES ve RES entegrasyonunda Bara N930’daki güç-gerilim eğrisi için kritik nokta değerleri

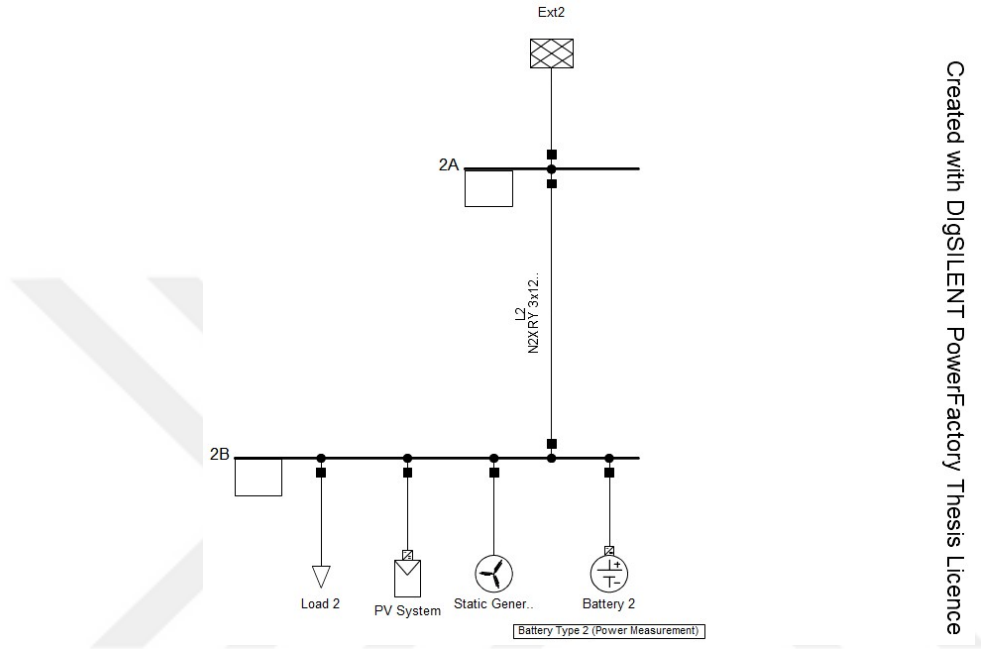
	Gerilim (p.u.)	Güç (MW)	Güç değişim oranı (%)
Mevcut Durum	0,5722	16,23	-
Normal koşulda GES+RES	0,5842	17,21	6,04 ↑
Güç düşümünde GES+RES	0,5707	16,27	5,46 ↓

### 6.3 GES, RES ve BEDS’in Birlikte Çalıştırılması Durumunda Gerilim Davranışı

Bu bölümde, GES ve RES’in birlikte dağıtım şebekesine entegre edildiği ve bu sistemlerin güç kontrollü bir BEDS modeli ile desteklendiği senaryo analiz edilmiştir. Tasarlanan model kapsamında, örnek dağıtım sistemi üzerinde GES ve RES üretim karakteristikleri dördüncü ve beşinci bölümde kullanılan profiller ile zamana bağlı olarak belirlenmiş, buna paralel olarak zamanla değişen bir yük profili tanımlanmıştır. Sistem topolojisinin genel yapısı Şekil 6.4’te gösterilmiştir.

Analiz senaryosunda, GES’in gündüz saatlerinde artan üretimi ile RES’in değişken rüzgar koşullarına bağlı üretim profili birlikte değerlendirilmiş ve sistemin gerilim profiline etkisi incelenmiştir. Bu karma üretim yapısı altında, yük tarafında ise günün farklı saatlerinde artan ve azalan talepleri yansıtan zamana bağlı değişken bir model kullanılmıştır. Bu koşullar altında BEDS modeli, güç ölçümüne dayalı kontrol algoritması doğrultusunda hem şarj hem de deşarj işlemlerini gerçekleştirmiştir.

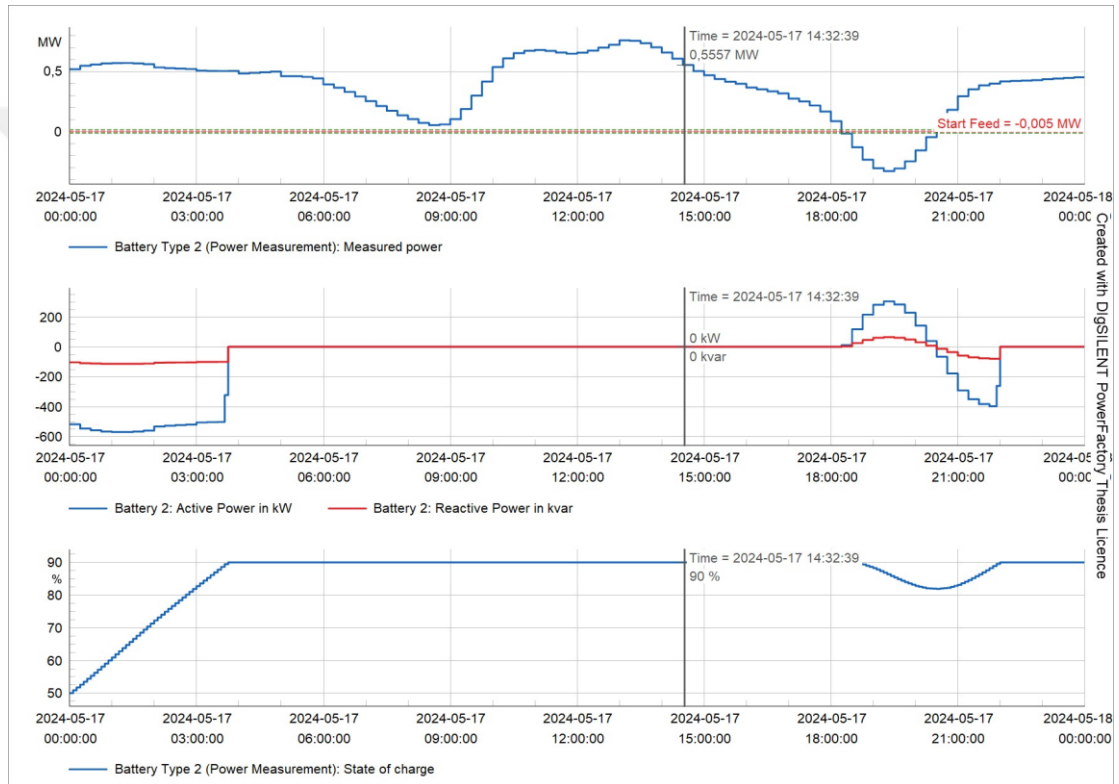
Buradaki amaç, kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının neden olduğu gerilim dalgalanmalarının, akıllı bir enerji depolama sistemi aracılığıyla nasıl dengelenebileceğini gözlemlemektir. Simülasyon sonuçları, BEDS'in sistemin gerilim profiline olumlu katkı sunduğunu ve üretim değişimlerinin etkisini azaltarak daha kararlı bir işletme ortamı sağladığını göstermiştir.



Şekil 6.4 Şebekeye bağlı GES, RES ve BEDS tek hat şeması

Şekil 6.5'te, GES, RES ve BEDS'in birlikte çalıştığı senaryo kapsamında aktif güç, reaktif güç ve batarya doluluk durumu (SoC) verileri yarı dinamik simülasyon (QDS) ile analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, batarya sistemi gece saatlerinde düşük üretim ve düşük talep nedeniyle pasif durumda kalmıştır. Sabah saatlerinde GES ve RES üretimlerinin artmaya başlamasıyla birlikte ölçüm noktasında tespit edilen güç artışı doğrultusunda batarya şarj moduna geçmiş ve yaklaşık dört saatlik sürede SoC değeri %90 seviyesine kadar ulaşmıştır. Gün ortasında, GES üretiminin yüksek ve RES üretiminin dalgalı olduğu saatlerde batarya sistemine yeni bir şarj komutu verilmemiştir. SoC değeri bu süre zarfında sabit kalmıştır.

Akşam saatlerine doğru ise yük artışı ve üretim düşüşü nedeniyle ölçüm noktasındaki net gücün eşik değerin altına inmesi sonucunda batarya aktif ve reaktif güç desteği sağlayarak deşarj moduna geçmiştir. SoC değeri %90'dan %80 seviyelerine kadar azalmıştır. Bataryanın reaktif güç desteği ise yaklaşık  $\pm 0.3$  MVAR sınırlarında seyretmiş ve gerilim profilinin desteklenmesine katkı sunmuştur. GES ve RES üretimlerinin birlikte çalıştığı bu senaryoda bataryanın hem şarj hem de deşarj döngüleriyle sistemin güç dalgalanmalarına karşı bir yanıt verdiği ve gerilim kararlılığı açısından olumlu etkiler verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 6.5 Güç kontrollü RES ve BEDS entegrasyonu için simülasyon sonuçları

## YEDİNCİ BÖLÜM

### 7 SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, aktif bir dağıtım şebekesinde evirici tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarının (GES ve RES) ve batarya enerji depolama sistemlerinin (BEDS) gerilim kararlılığı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Gerilim kararlılığı değerlendirmesi, P-V eğrileri üzerinden PowerFactory yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sistemin en kritik barası olan N930 barası üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, hem limit değerler (0,95 p.u. gerilim seviyesi) hem de kritik noktalar (gerilimin en düşük olduğu nokta) için sistemin aktif güç taşıma kapasitesinde değişimler gözlemlenmiştir. GES'in sisteme entegrasyonu, mevcut duruma göre %20,58 oranında bir güç artışı sağlayarak gerilim kararlılığına önemli bir katkı sunmuştur. Bununla birlikte, güneş üretiminin düştüğü senaryoda dahi mevcut durumuna göre %4'lük bir iyileşme sağlanmıştır. Benzer şekilde, RES'in entegrasyonu da %9,70'lik bir artış ile sistem kararlılığını olumlu yönde etkilemiştir. RES'in güç düşümü durumunda dahi %2'lik bir kazanç sağlanmıştır. Bu durum, her iki kaynağın da sistemin gerilim sınırları içerisinde daha fazla yük taşımasını mümkün kılmıştır.

GES ve RES'in birlikte çalıştığı senaryo, sistemin kararlılığı açısından en verimli sonucu vermiştir. Bu durumda, kritik bara üzerindeki maksimum güç aktarımı %30,36 oranında artmıştır. Güneş ve rüzgar üretiminin düşmesi halinde dahi %1,2'lik bir iyileşme sağlanmıştır. Kritik nokta gerilim seviyelerinde de benzer eğilimler görülmüştür. Bu entegrasyon hem gerilim seviyesinin yükselmesine hem de sistemin daha geç kararsızlık bölgesine geçmesine olanak tanımıştır. Özellikle çift kaynaklı senaryolarda kritik noktanın daha yüksek gerilim seviyesine kayması, sistemin daha güvenli bir işletme bölgesine taşındığını göstermektedir.

Tüm bu bulgular, şebeke operatörleri açısından dikkate alınması gereken önemli teknik sonuçlar sunmaktadır. YEK'lerin dağıtım sistemlerine entegrasyonu planlanmadan önce, sistemin kritik noktalarında detaylı gerilim kararlılığı analizlerinin yapılması gerekliliği elzemdir. P-V eğrileri üzerinden yapılan bu analizler, hangi senaryolarda sistemin ne ölçüde güç taşıma kapasitesi kazandığını sayısal olarak ortaya koymaktadır. Ayrıca, yarı dinamik simülasyonlar ile gerçekleştirilen senaryolarda BEDS'in güç ölçümüne dayalı kontrol stratejisinin, GES ve RES kaynaklı üretim dalgalanmalarına karşı etkin bir dengeleme sistemi sunduğu görülmüştür. GES ile BEDS'in birlikte çalıştığı durumda bataryanın gün içerisindeki yük değişimlerine duyarlı olarak zamanında şarj ve deşarj işlemlerini gerçekleştirmiştir. GES, öğle saatlerinde şarj, akşam saatlerinde ise deşarj moduna geçerek sistemin güç dengesini desteklediği görülmüştür. RES ile BEDS'in birlikte çalıştığı senaryoda da benzer şekilde batarya sistemi iki döngüde başarılı bir şekilde devreye girerek üretim-tüketim farklarını dengelemiştir. En kapsamlı senaryo olan GES, RES ve BEDS entegrasyonunda ise, batarya sistemi üretim fazlasının olduğu sabah ve öğle saatlerinde şarj moduna geçmiş, akşam saatlerinde ise üretim düşüşü ve yük artışı nedeniyle deşarj moduna geçerek sistemin gerilim profilini dengelemiştir. Tüm bu senaryolar, batarya sisteminin aktif ve reaktif güç desteği ile gerilim kararlılığı açısından sistemin güvenliğine katkı sağlayan bir bileşen olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda, evirici tabanlı kaynakların yaygınlaştığı modern dağıtım şebekelerinde BEDS'in sisteme entegre edilmesi, sistem güvenilirliğini güçlendiren tamamlayıcı bir çözüm yaklaşımı olarak değerlendirilebilir.

## SEKİZİNCİ BÖLÜM

### 8 REFERANSLAR

- [1] Maharjan, S., Kumar, D. S., & Khambadkone, A. M. (2020). Enhancing the voltage stability of distribution network during PV ramping conditions with variable speed drive loads. *Applied energy*, 264, 114733.
- [2] Sakipour, R., & Abdi, H. (2022). Voltage stability improvement of wind farms by self-correcting static volt-ampere reactive compensator and energy storage. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 140, 108082.
- [3] Charlangsut, N., & Rugthaicharoencheep, N. (2025). Enhancing Voltage and Power Stability in Distribution System with Photovoltaic from the Benefits of Battery Energy Storage. *Energies*, 18(3), 577.
- [4] Kamaruzzaman, Z. A., & Mohamed, A. (2015). Static voltage stability analysis in a distribution system with high penetration of photovoltaic generation. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY ISSN*, 0033-2097.
- [5] Trindade, F. C., Ferreira, T. S., Lopes, M. G., & Freitas, W. (2016). Mitigation of fast voltage variations during cloud transients in distribution systems with PV solar farms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2), 921-932.
- [6] Kumar, D. S., Maharjan, S., & Srinivasan, D. (2022). Ramp-rate limiting strategies to alleviate the impact of PV power ramping on voltage fluctuations using energy storage systems. *Solar Energy*, 234, 377-386.
- [7] Kuang, H., Zheng, L., Li, S., & Ding, X. (2019). Voltage stability improvement of wind power grid-connected system using TCSC-STATCOM control. *IET Renewable Power Generation*, 13(2), 215-219.
- [8] Muyeen, S. M., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J., & Ali, M. H. (2009). Application of STATCOM/BESS for wind power smoothening and hydrogen generation. *Electric Power Systems Research*, 79(2), 365-373.
- [9] Malik, F. H., Khan, M. W., Rahman, T. U., Ehtisham, M., Faheem, M., Haider, Z. M., & Lehtonen, M. (2024). A comprehensive review on voltage stability in wind-integrated power systems. *Energies*, 17(3), 644.
- [10] Ghaffarianfar, M., & Hajizadeh, A. (2018). Voltage stability of low-voltage distribution grid with high penetration of photovoltaic power units. *Energies*, 11(8), 1960.

- [11] Ahmed, F., Tasnim, S., & Aura, S. R. (2022). A comparative study of the influence of BESS and STATCOM on Post-Fault voltage recovery in microgrid. *European Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 6(4), 35-43.
- [12] Guo, Q., Shan, B., Zheng, W., Cai, H., Gu, H., Chen, W., & Chen, Z. (2023, August). Analysis of Short-Term Voltage Stability Influencing Factors and Mechanisms in Low Inertia Active Distribution Networks. In *2023 3rd Power System and Green Energy Conference (PSGEC)* (pp. 774-778). IEEE.
- [13] Yadav, V. V., & Saravanan, B. (2022). Technical advances and stability analysis in wind-penetrated power generation systems—a review. *Frontiers in Energy Research*, 10, 1091512.
- [14] Bakır, H., & Kulaksız, A. A. (2018). Performance Analysis and Simulation of Solar PV-Wind Hybrid Energy System with STATCOM using Matlab/Simulink. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 135-144.
- [15] Van Cutsem, T., & Vournas, C. (2007). Voltage stability of electric power systems. Springer Science & Business Media.
- [16] Chua, L. O., Desoer, C. A., & Kuh, E. S. (1987). *Linear and nonlinear circuits*. McGraw-Hill.
- [17] WindEurope, “Hourly generation,” *WindEurope*. [Online]. Available: <https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/hourly-generation>. [Accessed: Jul. 30, 2025].

**EK 1 - Kayıpsız bir sistemde ve sabit güç faktörü altında ( $\tan\phi=0,2$ ), yük direncine bağlı güç, gerilim ve akım değişim eğrileri için Matlab Kodu**

```
clc;
clear;

% Sistem parametreleri
X = 1;
E = 1;
tan_phi = 0.2;
phi = atan(tan_phi);

% RL/X aralığı
RL_over_X = linspace(0.01, 10, 500);
RL = RL_over_X * X;

% Normalize edilmiş güç
P_normalized = (RL * E^2) ./ (RL.^2 + (X + RL * tan_phi).^2);

% Normalize edilmiş akım
I_normalized = E ./ sqrt(RL.^2 + (X + RL * tan_phi).^2);

% Normalize Gerilim: V/E
V_over_E = (RL * E) ./ sqrt((RL.^2) + (X + RL * tan_phi).^2);

% Grafik
figure;
plot(RL_over_X, P_normalized, 'b', 'LineWidth', 2); hold on;
plot(RL_over_X, V_over_E, 'r', 'LineWidth', 2);
plot(RL_over_X, I_normalized, 'g', 'LineWidth', 2);
% Maksimum güç noktası çizgisi
xline(1, '--k', 'R_{lmaxP}/X', 'LabelVerticalAlignment','bottom', ...
      'LabelHorizontalAlignment','center', 'LineWidth', 1.5);
grid on;

xlabel('R_L / X');
ylabel('p.u.');
```

legend('P \cdot X / E^2','V / E','I \cdot X / E','Location','Best');

## EK 2 - Bir yük akışı çözümünün çözülebilir yük noktalarının alanı için Matlab

### Kodu

```
% Parametreler
E = 1; X = 1;

% P-Q düzlemi
P = linspace(-0.8, 0.8, 400);
Q = linspace(-0.3, 0.3, 400);
[PP, QQ] = meshgrid(P, Q);

% Diskriminant koşulu (denklem 2.12 eşdeğeri)
D = (2*QQ*X - E^2).^2 - 4*X^2 .* (PP.^2 + QQ.^2);

% Grafik
figure;
contourf(P, Q, D, [0 0], 'k', 'LineWidth', 2);
hold on;
xlabel('P.X/E^2');
ylabel('Q.X/E^2');
text(-0.65, -0.20, '2 çözüm var', 'FontSize', 11);
text(-0.65, 0.23, 'Çözüm yok', 'FontSize', 11);
axis tight;
grid on;
```

**EK 3 - Yükün aktif ve reaktif güçlerinin bir fonksiyonu olarak gerilim eğrisi için Matlab Kodu**

```
clc;
clear;

E = 1;
X = 1;
theta = linspace(0.001, pi - 0.001, 1000);
tan_phi_values = [-0.41, -0.20, 0.00, 0.20, 0.41, 0.67, 1.00, 1.50, 2.41, 5.03];
figure; hold on; grid on;
xlabel('P X / E^2');
ylabel('Q X / E^2');
zlabel('V / E');
xlim([0 0.8]);
ylim([-0.4 0.4]);
zlim([0 1.2]);
view(135, 25);
crit_P = [];
crit_Q = [];
crit_V = [];
for k = 1:length(tan_phi_values)
    tan_phi = tan_phi_values(k);
    P_vals = zeros(size(theta));
    Q_vals = zeros(size(theta));
    V_vals = zeros(size(theta));
    for i = 1:length(theta)
        th = theta(i);
        cos_th = cos(th);
        sin_th = sin(th);
        A = -1/X;
        B = (E/X)*(cos_th - tan_phi*sin_th);
        V = -B/A;
        P = (E*V/X) * sin_th;
        Q = P * tan_phi;
        P_vals(i) = P * X / E^2;
        Q_vals(i) = Q * X / E^2;
        V_vals(i) = V / E;
    end
end
```

```

% Eğriyi çizimi
plot3(P_vals, Q_vals, V_vals, 'LineWidth', 1.3, ...
      'DisplayName', sprintf('tan\phi = %.2f', tan_phi));

% Kritik nokta: Maksimum P noktası
[~, idx] = max(P_vals); % Bu gerçek çöküş noktasıdır
critP = P_vals(idx);
critQ = Q_vals(idx);
critV = V_vals(idx);
crit_P(end+1) = critP;
crit_Q(end+1) = critQ;
crit_V(end+1) = critV;

% Düzgün dik kesikli çizgi
plot3([critP, critP], [critQ, critQ], [critV, 0], 'k--', 'LineWidth', 1.2);
end

% Tüm kritik noktaların izdüşümü
plot3(crit_P, crit_Q, zeros(size(crit_P)), 'ro-', 'LineWidth', 1.5, ...
      'DisplayName', 'Kritik Nokta İzdüşümleri');
legend show;
title('P-V Eğrilerinin Kritik Noktaları ve İzdüşümleri');

```

#### EK 4 - P-V (Güç-Gerilim) eğrileri için Matlab Kodu

```
clc;
clear;

E = 1;
X = 1;
theta = linspace(0.001, pi-0.001, 1000); % 0 ile pi arasında açı değerleri
tan_phi_values = [-0.41, -0.20, 0.00, 0.20, 0.41, 0.67, 1.00, 1.50, 2.41, 5.03];
figure; hold on; grid on;
xlabel('PX/E^2'); ylabel('V/E');
xlim([0 0.8]); ylim([0 1.2]);
for k = 1:length(tan_phi_values)
    tan_phi = tan_phi_values(k);
    P_vals = zeros(size(theta));
    V_vals = zeros(size(theta));
    for i = 1:length(theta)
        th = theta(i);
        cos_th = cos(th);
        sin_th = sin(th);
        % Q = P * tan(phi)
        % Denklemden V'yi çözüyoruz:
        % V = (X*Q + sqrt((X*Q)^2 + 4*X*P*E*cos(theta))) / (2*E*cos(theta))
        % Ancak burada P = E*V/X * sin(theta), ve Q = E*V/X * cos(theta) - V^2/X
        % Denklem dönüşümünden şu çıkar:
        % V = E * sin(theta) / (P * X)
        % Ama daha net olan doğrudan theta üzerinden V bulup P hesaplamak
        % Denklemler:
        % P = (E*V/X) * sin(theta)
        % Q = (E*V/X) * cos(theta) - V^2/X
        % tan(phi) = Q/P => Q = P * tan(phi)
        % => (E*V/X) * cos(theta) - V^2/X = ((E*V/X) * sin(theta)) * tan(phi)
        % Bu denklem çözülür: A*V^2 + B*V = 0 formuna gelir
        A = -1/X;
        B = (E/X)*(cos_th - tan_phi*sin_th);
        V = -B/A; % A*V^2 + B*V = 0 => V = -B/A
        P = (E*V/X) * sin_th;
        V_vals(i) = V;
        P_vals(i) = P;
    end
    plot(P_vals, V_vals, 'DisplayName', sprintf('tan\phi = %.2f', tan_phi));
end
legend('show');
```

**EK 5 – Dağıtım şebekesinin yük parametreleri**

Yük adı	Bağlı olduğu bara	Aktif güç [kW]	Reaktif güç [kVAR]
LO1001	N782	27	0
LO1003	N783	13,5	0
LO1005	N784	13,5	0
LO1009	N786	10,5	0
LO1013	N788	13,5	0
LO1286	N939	13,5	0
LO1288	N941	13,5	0
LO1290	N943	13,5	0
LO1296	N947	27	0
LO1298	N949	27	0
LO1304	N953	27	0
LO657	N610	24,8	0
LO659	N611	15,6	0
LO661	N612	77,8	0
LO663	N613	34,3	0
LO665	N614	15	0
LO667	N615	37,6	0
LO669	N616	43,2	0
LO671	N617	46,2	0
LO673	N618	173,7	0
LO675	N609	29,4	0
LO677	N620	28,1	0
LO679	N651	69,1	0
LO681	N622	44,5	0
LO683	N623	67,5	0
LO685	N624	12	0
LO699	N631	35,9	0
LO701	N632	27	0
LO707	N635	67	0
LO743	N653	10,5	0
LO745	N654	4,7	0
LO747	N655	27	0
LO749	N656	13,5	0
LO751	N657	43,2	0
LO753	N658	27	0
LO755	N659	33,8	0
LO757	N660	13,5	0
LO759	N661	8,7	0
LO761	N662	10,8	0
LO763	N663	19,4	0
LO765	N664	13,3	0

LO767	N665	7,8	0
LO769	N666	23,6	0
LO771	N667	13,5	0
LO773	N668	44,1	0
LO775	N669	9,8	0
LO777	N670	25,8	0
LO779	N671	22	0
LO781	N672	27	0
LO783	N673	27	0
LO785	N674	27	0
LO787	N675	13,5	0
LO789	N676	13,5	0
LO791	N677	20,9	0
LO793	N678	17,5	0
LO795	N679	67,5	0
LO797	N680	13,5	0
LO799	N681	13,5	0
LO801	N682	5,5	0
LO803	N638	11,4	0
LO805	N684	27	0
LO807	N685	9,3	0
LO809	N686	21,4	0
LO811	N687	27	0
LO813	N688	13,5	0
LO815	N689	13,9	0
LO817	N690	13,5	0
LO823	N693	13,5	0
LO825	N694	43,2	0
LO827	N695	13,5	0
LO829	N696	29,7	0
LO831	N697	9,6	0
LO833	N698	13,5	0
LO835	N699	10,2	0
LO837	N700	13,5	0
LO839	N701	56	0
LO841	N702	13,5	0
LO843	N703	23,7	0
LO845	N704	13,5	0
LO847	N705	16,5	0
LO849	N706	67,5	0
LO851	N707	13,5	0
LO853	N708	43,2	0
LO855	N709	15,3	0
LO857	N710	13,5	0
LO859	N711	13,5	0

LO861	N712	38,6	0
LO863	N713	27	0
LO865	N714	13,2	0
LO867	N715	36,1	0
LO869	N716	34,3	0
LO873	N718	43,2	0
LO875	N719	13,5	0
LO877	N720	43,2	0
LO879	N721	10,2	0
LO881	N722	22	0
LO883	N723	12,1	0
LO885	N724	13,5	0
LO887	N725	28,8	0
LO889	N726	12,4	0
LO891	N727	13,5	0
LO893	N728	20,4	0
LO895	N729	20,4	0
LO897	N730	13,5	0
LO899	N731	33,8	0
LO901	N732	17,4	0
LO903	N733	11,4	0
LO905	N734	85	0
LO907	N735	27	0
LO909	N736	11	0
LO911	N737	8,7	0
LO913	N738	13,5	0
LO915	N739	13,5	0
LO917	N740	13,5	0
LO919	N741	16,3	0
LO921	N742	13,5	0
LO923	N743	13,5	0
LO925	N744	23	0
LO927	N745	27	0
LO929	N746	63,8	0
LO931	N747	13,5	0
LO933	N748	13,5	0
LO935	N749	27	0
LO937	N750	27	0
LO939	N751	27	0
LO941	N752	13,5	0
LO943	N753	13,5	0
LO945	N754	27	0
LO947	N755	43,2	0
LO949	N756	13,5	0
LO951	N757	43,6	0

LO953	N758	13,5	0
LO955	N759	43,2	0
LO957	N760	27	0
LO959	N761	55,4	0
LO961	N762	27	0
LO963	N763	97,6	0
LO965	N764	27	0
LO967	N765	19,4	0
LO969	N766	21,2	0
LO971	N767	67,5	0
LO973	N768	7,8	0
LO975	N769	10,5	0
LO977	N770	13,5	0
LO979	N771	13,5	0
LO981	N772	13,5	0
LO983	N773	13,5	0
LO985	N774	17	0
LO987	N775	13,5	0
LO989	N776	22	0
LO991	N777	13,5	0
LO993	N778	13,5	0
LO995	N779	13,5	0
LO997	N780	43,2	0
LO999	N781	13,5	0

**EK 6 – Dağıtım şebekesinin transformatör parametreleri**

Trafo adı	Yüksek gerilim tarafının bağlı olduğu bara adı	Alçak gerilim tarafının bağlı olduğu bara adı	Kurulu görünür güç [MVA]	HV kademe alt gerilim sınırı [p.u.]	HV kademe üst gerilim sınırı [p.u.]
2T998	N351	N781	0,05	0,95	1,05
2T996	N349	N780	0,16	0,95	1,05
2T994	N348	N779	0,05	0,95	1,05
2T992	N346	N778	0,05	0,95	1,05
2T990	N345	N777	0,05	0,95	1,05
2T988	N344	N776	0,05	0,95	1,05
2T986	N343	N775	0,05	0,95	1,05
2T984	N341	N774	0,05	0,95	1,05
2T982	N339	N773	0,05	0,95	1,05
2T980	N337	N772	0,05	0,95	1,05
2T978	N336	N771	0,05	0,95	1,05
2T976	N333	N770	0,05	0,95	1,05
2T974	N331	N769	0,05	0,95	1,05
2T972	N329	N768	0,05	0,95	1,05
2T970	N327	N767	0,25	0,95	1,05
2T968	N325	N766	0,05	0,95	1,05
2T966	N324	N765	0,05	0,95	1,05
2T964	N322	N764	0,1	0,95	1,05
2T962	N321	N763	0,25	0,95	1,05
2T960	N320	N762	0,1	0,95	1,05
2T958	N319	N761	0,1	0,95	1,05
2T956	N317	N760	0,1	0,95	1,05
2T954	N315	N759	0,16	0,95	1,05
2T952	N313	N758	0,05	0,95	1,05
2T950	N312	N757	0,1	0,95	1,05
2T948	N311	N756	0,05	0,95	1,05
2T946	N309	N755	0,16	0,95	1,05
2T944	N307	N754	0,1	0,95	1,05
2T942	N305	N753	0,05	0,95	1,05
2T940	N303	N752	0,05	0,95	1,05
2T938	N301	N751	0,1	0,95	1,05
2T936	N299	N750	0,1	0,95	1,05
2T934	N297	N749	0,1	0,95	1,05
2T932	N295	N748	0,05	0,95	1,05
2T930	N296	N747	0,05	0,95	1,05

2T928	N294	N746	0,1	0,95	1,05
2T926	N291	N745	0,1	0,95	1,05
2T924	N289	N744	0,063	0,95	1,05
2T922	N288	N743	0,05	0,95	1,05
2T920	N286	N742	0,05	0,95	1,05
2T918	N284	N741	0,05	0,95	1,05
2T916	N281	N740	0,05	0,95	1,05
2T914	N278	N739	0,05	0,95	1,05
2T912	N279	N738	0,05	0,95	1,05
2T910	N277	N737	0,05	0,95	1,05
2T908	N930	N736	0,05	0,95	1,05
2T906	N274	N735	0,1	0,95	1,05
2T904	N275	N734	0,315	0,95	1,05
2T902	N273	N733	0,04	0,95	1,05
2T900	N272	N732	0,05	0,95	1,05
2T898	N271	N731	0,05	0,95	1,05
2T896	N270	N730	0,05	0,95	1,05
2T894	N269	N729	0,05	0,95	1,05
2T892	N268	N728	0,05	0,95	1,05
2T890	N267	N727	0,05	0,95	1,05
2T888	N266	N726	0,04	0,95	1,05
2T886	N265	N725	0,05	0,95	1,05
2T884	N264	N724	0,05	0,95	1,05
2T882	N263	N723	0,05	0,95	1,05
2T880	N262	N722	0,05	0,95	1,05
2T878	N261	N721	0,05	0,95	1,05
2T876	N260	N720	0,16	0,95	1,05
2T874	N259	N719	0,05	0,95	1,05
2T872	N258	N718	0,16	0,95	1,05
2T868	N255	N716	0,05	0,95	1,05
2T866	N53	N715	0,05	0,95	1,05
2T864	N55	N714	0,05	0,95	1,05
2T862	N253	N713	0,1	0,95	1,05
2T860	N251	N712	0,05	0,95	1,05
2T858	N250	N711	0,05	0,95	1,05
2T856	N249	N710	0,05	0,95	1,05
2T854	N248	N709	0,05	0,95	1,05
2T852	N247	N708	0,16	0,95	1,05
2T850	N246	N707	0,05	0,95	1,05
2T848	N245	N706	0,25	0,95	1,05
2T846	N244	N705	0,05	0,95	1,05
2T844	N243	N704	0,05	0,95	1,05
2T842	N242	N703	0,05	0,95	1,05

2T840	N241	N702	0,05	0,95	1,05
2T838	N240	N701	0,1	0,95	1,05
2T836	N239	N700	0,05	0,95	1,05
2T834	N238	N699	0,05	0,95	1,05
2T832	N237	N698	0,05	0,95	1,05
2T830	N236	N697	0,04	0,95	1,05
2T828	N235	N696	0,05	0,95	1,05
2T826	N233	N695	0,05	0,95	1,05
2T824	N234	N694	0,16	0,95	1,05
2T822	N232	N693	0,05	0,95	1,05
2T816	N225	N690	0,05	0,95	1,05
2T814	N224	N689	0,05	0,95	1,05
2T812	N222	N688	0,05	0,95	1,05
2T810	N223	N687	0,1	0,95	1,05
2T808	N221	N686	0,05	0,95	1,05
2T806	N220	N685	0,05	0,95	1,05
2T804	N219	N684	0,1	0,95	1,05
2T802	N218	N638	0,04	0,95	1,05
2T800	N217	N682	0,05	0,95	1,05
2T798	N216	N681	0,05	0,95	1,05
2T796	N42	N680	0,05	0,95	1,05
2T794	N215	N679	0,25	0,95	1,05
2T792	N214	N678	0,05	0,95	1,05
2T790	N213	N677	0,05	0,95	1,05
2T788	N212	N676	0,05	0,95	1,05
2T786	N211	N675	0,05	0,95	1,05
2T784	N210	N674	0,1	0,95	1,05
2T782	N209	N673	0,1	0,95	1,05
2T780	N208	N672	0,1	0,95	1,05
2T778	N207	N671	0,05	0,95	1,05
2T776	N206	N670	0,05	0,95	1,05
2T774	N205	N669	0,05	0,95	1,05
2T772	N204	N668	0,05	0,95	1,05
2T770	N203	N667	0,05	0,95	1,05
2T768	N202	N666	0,1	0,95	1,05
2T766	N201	N665	0,05	0,95	1,05
2T764	N200	N664	0,05	0,95	1,05
2T762	N199	N663	0,05	0,95	1,05
2T760	N198	N662	0,04	0,95	1,05
2T758	N197	N661	0,05	0,95	1,05
2T756	N196	N660	0,05	0,95	1,05
2T754	N195	N659	0,05	0,95	1,05
2T752	N194	N658	0,1	0,95	1,05

2T750	N193	N657	0,16	0,95	1,05
2T748	N192	N656	0,05	0,95	1,05
2T746	N191	N655	0,1	0,95	1,05
2T744	N190	N654	0,05	0,95	1,05
2T742	N189	N653	0,05	0,95	1,05
2T706	N108	N635	0,4	0,95	1,05
2T700	N133	N632	0,1	0,95	1,05
2T698	N152	N631	0,16	0,95	1,05
2T684	N137	N624	0,1	0,95	1,05
2T682	N135	N623	0,25	0,95	1,05
2T680	N93	N622	0,16	0,95	1,05
2T678	N131	N651	0,16	0,95	1,05
2T676	N127	N620	0,1	0,95	1,05
2T674	N124	N609	0,1	0,95	1,05
2T672	N122	N618	0,4	0,95	1,05
2T670	N117	N617	0,1	0,95	1,05
2T668	N116	N616	0,16	0,95	1,05
2T666	N94	N615	0,1	0,95	1,05
2T664	N24	N614	0,1	0,95	1,05
2T662	N113	N613	0,1	0,95	1,05
2T660	N110	N612	0,16	0,95	1,05
2T658	N106	N611	0,05	0,95	1,05
2T656	N105	N610	0,1	0,95	1,05
2T1353	N990	N991	25	0,97	1,03
2T1352	N990	N989	50	0,97	1,03
2T1305	N954	N953	0,1	0,95	1,05
2T1299	N950	N949	0,1	0,95	1,05
2T1297	N948	N947	0,1	0,95	1,05
2T1291	N944	N943	0,05	0,95	1,05
2T1289	N942	N941	0,05	0,95	1,05
2T1287	N940	N939	0,05	0,95	1,05
2T1012	N927	N788	0,05	0,95	1,05
2T1008	N929	N786	0,05	0,95	1,05
2T1004	N355	N784	0,05	0,95	1,05
2T1002	N357	N783	0,05	0,95	1,05
2T1000	N354	N782	0,1	0,95	1,05

**EK 7 – Dağıtım şebekesinin transformatör tipi özellikleri**

Transformatör tipi	Transformatör Gücü [kVA]	Nominal frekans [Hz]	Yüksek gerilim seviyesi [kV]	Alçak gerilim seviyesi [kV]	uk [%]	Yüksek gerilim bağlantısı	Alçak gerilim bağlantısı
2-WT 100kVA Type 34_5 to 0_4	100	50	34,5	0,4	4	Y	YN
2-WT 160kVA Type 34_5 to 0_4	160	50	34,5	0,4	4	Y	YN
2-WT 25 MVA Type 10_5 to 154	25000	50	154	10,5	12	Y	Y
2-WT 250kVA Type 34_5 to 0_4	250	50	34,5	0,4	4	D	YN
2-WT 315kVA Type 34_5 to 0_4	315	50	34,5	0,4	4	D	YN
2-WT 400kVA Type 34_5 to 0_4	400	50	34,5	0,4	4	D	YN
2-WT 40kVA Type 34_5 to 0_4	40	50	34,5	0,4	4	Y	YN
2-WT 50 MVA Type 154 to 34_5	50000	50	154	34,5	11,7	YN	YN
2-WT 50kVA Type 34_5 to 0_4	50	50	34,5	0,4	4	Y	YN
2-WT 63kVA Type 34_5 to 0_4	63	50	34,5	0,4	4	Y	YN

### EK 8 – Dağıtım şebekesinin hat parametreleri

Hat adı	Hat tipi	Hangi baradan	Hangi baraya	Hat uzunluğu [m]
L100	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N84	N85	1651,3
L101	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N86	N85	1525,9
L102	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N85	N87	509,1
L103	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N85	N88	122,9
L104	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N88	N89	558,4
L105	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N37	N89	2053,2
L106	36kV_3x3/0_Askı.TypLne	N231	N91	9929,7
L107	36kV_3x3/0_Askı.TypLne	N91	N92	1527,9
L108	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N17	N93	248,6
L109	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N24	N94	1050,4
L116	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N101	N102	308,6
L117	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N101	N103	1939,9
L118	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N15	N105	305,5
L119	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N15	N106	357,9
L120	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N107	N108	61,1
L121	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N109	N107	253,3
L122	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N110	N109	35,8
L123	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N111	N110	25,6
L124	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N112	N111	386,2
L125	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N113	N14	37,6
L126	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N113	N112	48,2
L127	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N114	N113	16,5
L128	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N117	N114	314,3
L1283	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N936	N226	131,8
L1284	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N938	N1013	823
L1285	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N283	N938	25,1
L129	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N94	N116	421,4
L1292	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N944	N946	1649,6
L1293	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N945	N940	119
L1294	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N945	N946	151,3
L1295	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N946	N942	70,1
L1300	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N951	N353	426,7
L1301	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N951	N948	29,7
L1302	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N952	N927	296,4
L1303	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N950	N952	205,2
L1306	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N6	N955	273
L1307	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N955	N954	149,9
L1308	36kV_3(1x240+25)_Cu.TypLne	N956	N991	182,2
L1309	36kV_3(1x240+25)_Cu.TypLne	N956	N991	183,1

L131	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N117	N23	23,7
L133	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N117	N119	22,5
L134	36kV_3x3/0_Ask1.TypLne	N119	N120	1009,8
L1349	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N986	N250	67,2
L135	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N121	N122	22,3
L136	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N121	N124	224,2
L1379	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N1013	N945	890
L138	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N125	N124	25
L1387	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N27	N1015	774
L139	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N126	N125	378,1
L140	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N127	N126	39,1
L1400	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N1016	N3	776
L141	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N128	N127	17,6
L142	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N129	N128	942,3
L143	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N120	N929	50
L144	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N129	N929	40
L145	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N131	N130	1036,7
L146	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N929	N130	15
L147	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N132	N133	27,3
L148	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N134	N132	1056
L149	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N134	N929	17,6
L150	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N93	N135	765
L151	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N136	N137	25,5
L152	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N17	N136	130,8
L153	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N16	N929	15,8
L167	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N151	N152	486,3
L168	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N133	N151	20,6
L209	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N38	N189	309
L210	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N38	N190	1393,3
L211	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N33	N191	22,6
L212	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N34	N192	44,1
L213	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N193	N34	210
L214	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N194	N37	72,4
L215	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N195	N89	189
L216	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N88	N196	238
L217	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N197	N86	73
L218	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N86	N198	1215,1
L219	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N87	N199	192,9
L220	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N87	N200	915,1
L221	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N201	N84	239,3
L222	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N202	N80	202,4
L223	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N203	N81	178,1

L224	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N81	N204	360,1
L225	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N29	N82	1438,2
L226	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N205	N29	1212,7
L227	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N206	N83	2004,4
L228	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N207	N83	437,6
L229	36kV_3xSW_Ask1.TypLne	N48	N208	36,8
L230	36kV_3xSW_Ask1.TypLne	N48	N209	92,9
L231	36kV_3xSW_Ask1.TypLne	N210	N30	435
L232	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N46	N211	216,1
L233	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N45	N212	833,2
L234	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N44	N213	282,6
L235	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N43	N214	68,7
L236	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N40	N215	271
L237	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N216	N42	99,4
L238	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N41	N217	58
L239	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N218	N40	1445,7
L240	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N69	N219	34,6
L241	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N69	N220	733
L242	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N68	N221	169,9
L243	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N222	N223	252,9
L244	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N67	N222	1344,8
L245	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N67	N224	116,3
L246	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N26	N225	334,1
L247	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N226	N26	300,7
L254	36kV_3x3/0_Ask1.TypLne	N989	N957	27123,6
L255	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N252	N7	15
L256	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N27	N232	25
L257	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N66	N234	929,7
L258	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N66	N233	375,6
L259	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N65	N235	156,9
L260	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N65	N236	1470,1
L261	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N64	N237	626,7
L262	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N64	N238	1495,5
L263	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N62	N239	54,1
L264	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N62	N240	1553,6
L265	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N9	N241	40,9
L266	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N8	N242	167,8
L267	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N61	N243	11,2
L268	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N60	N244	1124,7
L269	36kV_3xSW_Ask1.TypLne	N59	N245	219,9
L270	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N58	N246	391,3
L271	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N9	N936	390,4
L272	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N957	N935	18,6

L273	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N52	N247	2243
L274	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N52	N248	144,9
L275	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N52	N249	1112,8
L276	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N50	N986	1195,4
L277	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N50	N251	414,1
L278	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N51	N7	15
L279	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N252	N253	1577,9
L28	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N1	N2	339,1
L280	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N7	N935	15
L282	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N54	N255	219,1
L283	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N56	N935	51,6
L284	36kV_3x3/0_Ask1.TypLne	N91	N931	33,4
L286	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N257	N929	14,2
L287	36kV_3x3/0_Ask1.TypLne	N92	N257	2781,2
L288	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N57	N935	20
L289	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N72	N258	563,8
L29	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N3	N4	168,8
L290	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N72	N259	147,8
L291	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N5	N260	30,4
L292	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N6	N261	53,5
L293	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N73	N262	94,1
L294	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N74	N263	2457,4
L295	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N4	N264	293
L296	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N4	N265	936,8
L297	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N3	N266	604,1
L298	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N267	N75	449
L299	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N76	N268	322,5
L30	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N5	N6	3911,9
L300	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N269	N2	179
L301	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N270	N2	938,9
L303	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N78	N271	351
L304	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N272	N78	649,4
L305	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N273	N79	883,6
L306	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N79	N82	1531
L307	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N274	N275	16,2
L308	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N71	N274	1355,5
L309	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N930	N70	23,4
L31	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N231	N935	25
L310	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N276	N277	917,3
L311	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N278	N279	37
L312	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N276	N278	1980,1
L313	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N280	N276	568,2
L314	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N280	N281	103

L315	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N280	N282	844
L316	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N284	N938	60,9
L317	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N282	N283	1087,1
L318	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N282	N285	937,6
L319	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N285	N286	91,4
L32	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N8	N9	645,9
L320	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N287	N285	2192,7
L321	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N287	N288	358,7
L322	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N287	N289	206,2
L323	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N290	N287	830
L324	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N290	N291	22,7
L325	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N292	N290	653
L326	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N293	N294	1050,3
L327	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N295	N296	1310,7
L328	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N297	N295	1034,6
L329	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N298	N297	68,3
L330	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N298	N299	184,3
L331	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N300	N298	273
L332	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N300	N301	449,4
L333	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N302	N300	338,1
L334	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N302	N303	404,3
L335	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N293	N302	526,3
L336	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N304	N293	433,2
L337	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N305	N304	26,7
L338	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N306	N304	242
L339	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N306	N307	322,4
L340	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N308	N306	1565,6
L341	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N308	N309	588,9
L342	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N292	N308	1116
L343	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N930	N292	136,8
L344	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N310	N930	21,6
L345	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N310	N311	287,4
L346	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N312	N310	826,2
L347	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N312	N313	480,3
L348	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N313	N314	419
L349	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N315	N314	6,5
L35	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N14	N15	68,9
L350	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N314	N316	335
L351	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N316	N317	14,7
L352	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N316	N318	222,4
L353	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N318	N319	54,1
L354	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N320	N318	205,7
L355	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N320	N321	381

L356	36kV_3(1x95+16)_Cu.TypLne	N322	N321	510,5
L357	36kV_3x1/0_Mesnet.TypLne	N322	N930	783,9
L358	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N927	N930	5352,8
L359	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N927	N929	2546,3
L36	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N16	N17	937,7
L360	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N323	N324	2724,6
L361	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N323	N325	230,1
L362	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N323	N326	43
L363	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N326	N327	334,8
L364	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N328	N326	3955,8
L365	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N328	N329	177,7
L366	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N328	N330	2343,4
L367	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N330	N331	2159,9
L368	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N330	N332	1083,5
L369	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N332	N333	347,5
L37	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N18	N931	15,1
L370	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N334	N332	1097,3
L371	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N336	N335	1347,2
L372	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N335	N337	428,5
L373	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N335	N338	1249
L374	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N339	N338	317,1
L375	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N338	N334	458
L376	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N334	N340	2102,2
L377	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N340	N341	282,7
L378	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N340	N342	67,3
L379	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N342	N343	861
L380	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N342	N103	923,8
L381	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N103	N344	431,4
L382	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N102	N345	354,5
L383	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N102	N346	374,4
L384	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N104	N101	1993
L385	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N927	N104	1866
L386	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N347	N348	1200,6
L387	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N347	N349	17,5
L388	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N350	N347	120,7
L389	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N350	N351	101,6
L390	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N352	N350	120
L391	36kV_3x3/0_Mesnet.TypLne	N354	N353	47,3
L392	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N352	N355	22,6
L393	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N356	N352	211,8
L394	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N356	N357	283,1
L395	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N353	N356	231,2
L396	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N952	N951	263,5

L41	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N23	N24	326,5
L42	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N26	N25	502,2
L43	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N936	N27	109,1
L44	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N29	N28	104
L45	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N31	N30	1210,5
L47	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N33	N34	426
L48	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N35	N33	705,6
L49	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N35	N36	86,4
L50	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N931	N36	399,6
L51	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N35	N37	1559,4
L52	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N36	N38	891,9
L53	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N39	N40	298,3
L54	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N42	N41	991,5
L55	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N39	N41	17,5
L56	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N39	N43	1960,7
L57	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N43	N44	1313
L58	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N44	N45	99,9
L59	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N45	N46	52,9
L60	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N46	N47	298,1
L61	36kV_3xSW_Ask1.TypLne	N47	N48	536
L62	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N31	N47	931,9
L63	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N49	N50	203,1
L64	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N51	N49	1509,1
L65	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N49	N52	1774,4
L66	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N54	N53	490,1
L67	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N53	N55	539,4
L68	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N56	N55	177,6
L69	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N57	N58	2145,1
L70	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N58	N59	337,9
L71	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N59	N60	139,8
L72	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N60	N61	227,5
L73	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N61	N8	736,6
L74	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N936	N62	115,8
L75	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N63	N64	1132,5
L76	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N63	N65	31,1
L77	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N66	N63	1318,6
L78	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N1015	N66	1241,2
L79	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N25	N67	327,5
L80	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N25	N68	1063,6
L81	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N68	N31	563,5
L82	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N31	N69	364
L83	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N30	N18	1724,9
L84	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N70	N71	522,1

L85	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N71	N72	1516,3
L86	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N72	N5	125,6
L87	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N955	N73	904,9
L88	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N73	N74	151,8
L89	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N74	N1016	857,7
L90	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N75	N3	462,6
L91	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N75	N76	265,2
L92	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N77	N1	27,1
L93	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N77	N76	2103,8
L94	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N77	N78	1094,2
L95	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N78	N79	1485,6
L96	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N81	N80	806,5
L97	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N82	N80	1022,9
L98	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N83	N28	114,7
L99	36kV_3xSW_Mesnet.TypLne	N28	N84	1464,8

### EK 9 – Dağıtım şebekesinin hat tipi özellikleri

Hat tipi	Anma gerilimi [kV]	Toprakta anma akımı [A]	Havada anma akımı [A]	Hat ortamı	Hat frekansı [Hz]	AC Direnci [R', Ohm/km]	Reaktans [X', Ohm/km]	Kapasitans [C', nF/km]	Anma kesit alanı [mm <sup>2</sup> ]
36kV_3(1x240+25)_Cu	36	557	673	Cable	50	0,075	0,167	209	240
36kV_3(1x95+16)_Cu	36	363	329	Cable	50	0,193	0,19	153	95
36kV_3x1/0_Mesnet	36	260	1000	Overhead Line	50	0,536	0,355	9,1	62,4
36kV_3x3/0_Ask1	36	421	421	Overhead Line	50	0,337	0,382	9,46	99,3
36kV_3x3/0_Mesnet	36	315	1000	Overhead Line	50	0,337	0,341	9,46	99,3
36kV_3xSW_Ask1	36	363	1000	Overhead Line	50	1,074	4,18	8,61	31,1
36kV_3xSW_Mesnet	36	180	1000	Overhead Line	50	1,074	0,377	8,61	31,3

### EK 10 – Dağıtım şebekesinin generatör parametreleri

Generatör adı	Bağlı olduğu bara	Kurulu gücü [MVA]	Aktif güç [MW]	Sk'' [MVA]	R/X	Nominal gerilim [kV]
G1314	N956	10,5	10,5	-	0,1	10,5
I1282	N990	SL bus type	-	2387,3	0,3	154

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sait TAŞKESER  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Özel Özgür Zafer Tek Yıldız Temel Lisesi, 2018  
Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2023  
Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2025

### Mesleki Deneyim

Biruni Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği - Araştırma Görevlisi 2024-2025  
Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği - Araştırma Görevlisi 2025-Halen