



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GÜNEŞ
ENERJİ KAYNAĞINDAN REAKTİF GÜÇ
DESTEĞİ SAĞLANMASI**

Harun KÖROĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Harun KÖROĞLU tarafından hazırlanan “Elektrik Dağıtım Şebekesinde Güneş Enerji Kaynağından Reaktif Güç Desteği Sağlanması” adlı tez çalışması 05/06/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Başkan Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA
Danışman Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA
Üye Doç. Dr. Mustafa YAĞCI

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun / / gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Şerife Yurdagül KUMCU
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Harun KÖROĞLU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİNDE GÜNEŞ ENERJİ KAYNAĞINDAN REAKTİF GÜÇ DESTEĞİ SAĞLANMASI

Harun KÖROĞLU

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA

2024, 55 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA
Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA
Doç. Dr. Mustafa YAĞCI

ÖZET

Geleneksel enerji üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kompanzasyonu için yatırım yapılmaktadır. Bu işlemler yan hizmetler kavramı adı altında iletim seviyesinde yapılmaktadır. Günümüzde dağıtım şebekesine bağlı dağıtık enerji sistemlerin yaygınlaşması ile enerji akışı çift yönlü hale gelmiştir. Bu da bütün üretim dağıtım iletim parametrelerinin yeniden gözden geçirilmesine ve kavramların yeniden ele alınmasını gerektirmektedir. GES, RES vb. dağıtık üretim tesislerinin artması avantajlar getirirken üretim olmadığı saatlerde iletkenlerden kaynaklı kapasitif reaktif artmasına ve üretimin artması ile birlikte bölgede gerilim yükselmesine neden olduğu için bazı dezavantajlar oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında kompanzasyon yatırımlarını minimize etmek, dağıtık üretim kaynaklarının dezavantajlarını avantaja çevirmek için dağıtık üretim kaynaklarından olan Güneş Enerji Santrallerinin reaktif güç kompanzasyonu için kullanılabilirliği araştırılmış ve bölgesel analiz simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar Konya Meram Bölgesi için analizler sonucunda bir trafo merkezi için Güneş Enerji Santrali'nden reaktif güç desteği alınarak deneysel olarak desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Enerji Sistemleri, Güç Kalitesi, Kompanzasyon, Reaktif Güç Desteği, Teknik Kayıp, Verimlilik, Yan Hizmetler, Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ABSTRACT

MS THESIS

**PROVIDING REACTIVE POWER SUPPORT FROM SOLAR POWER
SOURCE IN ELECTRICITY DISTRIBUTION GRID**

Harun KÖROĞLU

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF ELECTRICAL ELECTRONIC
ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Sabri ALTUNKAYA

2024, 55 Pages

Jury

Prof. Dr. Nurettin ÇETİNKAYA

Asst. Prof. Sabri ALTUNKAYA

Assoc. Prof. Mustafa YAĞCI

Compensation investments are made for power compensation in traditional energy production, transmission and distribution systems. These operations are carried out at the transmission level under the concept of ancillary services. Nowadays, with the widespread use of distributed energy systems connected to the distribution grid, energy flow has become bidirectional. This caused all production, distribution and transmission parameters to be reviewed and concepts to be reconsidered. While the increase in distributed generation facilities brought advantages, it also created disadvantages.

In this thesis study, in order to minimize compensation investments and turn the disadvantages of distributed generation resources into advantages, the usability of reactive power compensation from Solar Power Plant, one of the distributed generation resources, was investigated and regional analysis simulation studies were carried out. These studies were experimentally supported by receiving reactive power support from Solar Power Plant for a substation as a result of analyzes for Konya Meram Region.

Keywords: Ancillary Services, Compensation, , Efficiency, Power Quality, Reactive Power Support, Renewable Energy Resources, Solar Energy Systems, Technical Loss

ÖNSÖZ

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından reaktif güç desteği alınması analiz çalışmaları yapılmıştır, deneysel olarak test edilmiştir ve fayda maliyet analizi yapılmıştır.

Bu çalışma sürecinde bilgi ve tecrübelerini aktaran, her aşamada görüşlerini paylaşan danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALTUNKAYA'ya, analiz çalışmalarında yön gösteren ve bana yardımcı olan Meram Elektrik Dağıtım A.Ş. personeli İsmail BAĞCI'ya teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca, desteklerinden ötürü eşime ve aileme teşekkür ediyorum.

Harun KÖROĞLU
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
ABSTRACT.....	viii
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	x
KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Yan Hizmetler Nedir?	1
1.2. Yan Hizmetlerin Dağıtım Şebekesinden Alınması.....	4
1.2.1. Dağıtık Üretim Kaynakları	7
1.3. Elektrik Dağıtım Şebekesinde Yan Hizmetler Kapsamında Reaktif Güç Desteğinin Alınması	8
1.4. İnvörtör Kullanarak Reaktif Güç Desteği	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. Güneş Enerji Santrali, İnvörtörler, SCADA Sistemi	25
3.2. Analiz Programı	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	28
4.1. Çalışma Sahası Seçimi.....	28
4.2. Sistem Simülasyonları	28
4.2.1. Reaktif Güç Analizi	29
4.2.2. Yatırım İhtiyacının Belirlenmesi	31
4.3. Pilot Uygulama Hazırlık Çalışmaları.....	32
4.4. Pilot Uygulamanın Gerçekleştirilmesi.....	33
4.5. Teknik Kayıp İçin Pilot Uygulama Çalışmaları	37
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	39
5.1. Mevcut Durum ve Potansiyel	39
5.2. Maliyet Analizi: 2023 Yılı Meram Elektrik Dağıtım Bölgesi Kompanzasyon İhtiyacının GES'lerden Karşılanması	39
5.3. Teknik Kayıp Analizi: 2023 Yılı Meram Elektrik Dağıtım Bölgesi Kompanzasyon İhtiyacının GES'lerden Karşılanması Teknik Kayıp Analizi	40
5.4. Sonuçlar	41
5.5. Öneriler	42
6. KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	47

KISALTMALAR

AVR: Otomatik Gerilim Düzenleyici	xiii, 5
DEK: Dağıtık Enerji Kaynağı.....	xiii, 1, 7
DSO: Dağıtım Sistem Operatörü	vii, viii, xiii, 1, 2, 7, 32
DÜK: Dağıtık Üretim Kaynakları.....	xiii
EA: Elektrikli Araçlar	xiii, 11, 12
ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity.....	2
EPDK: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu	xiii, 3, 11, 15
FERC: Federal Energy Regulatory Commission.....	xiii, 2, 14, 32
G2V: Şebekeden Araca.....	xiii, 11
MEDAŞ: Meram Elektrik Dağıtım A.Ş.....	xiii, 8, 11
PV: Fotovoltaik.....	xiii, 17, 18, 19, 25, 26, 28, 33, 34
SO: Sistem operatörü.....	xiii, 5, 22
TSO: İletim Sistem Operatörü	vii, viii, xiii, 1, 2, 3, 7, 14, 32
V2G: Araçtan Şebekeye.....	xiii, 11, 12, 16
VVC: Volt/VAr Kontrol	xiii, 18, 19
YEK: Yenilenebilir Enerji Kaynağı.....	2
YH: Yan Hizmetler	xiii, 1, 2, 15

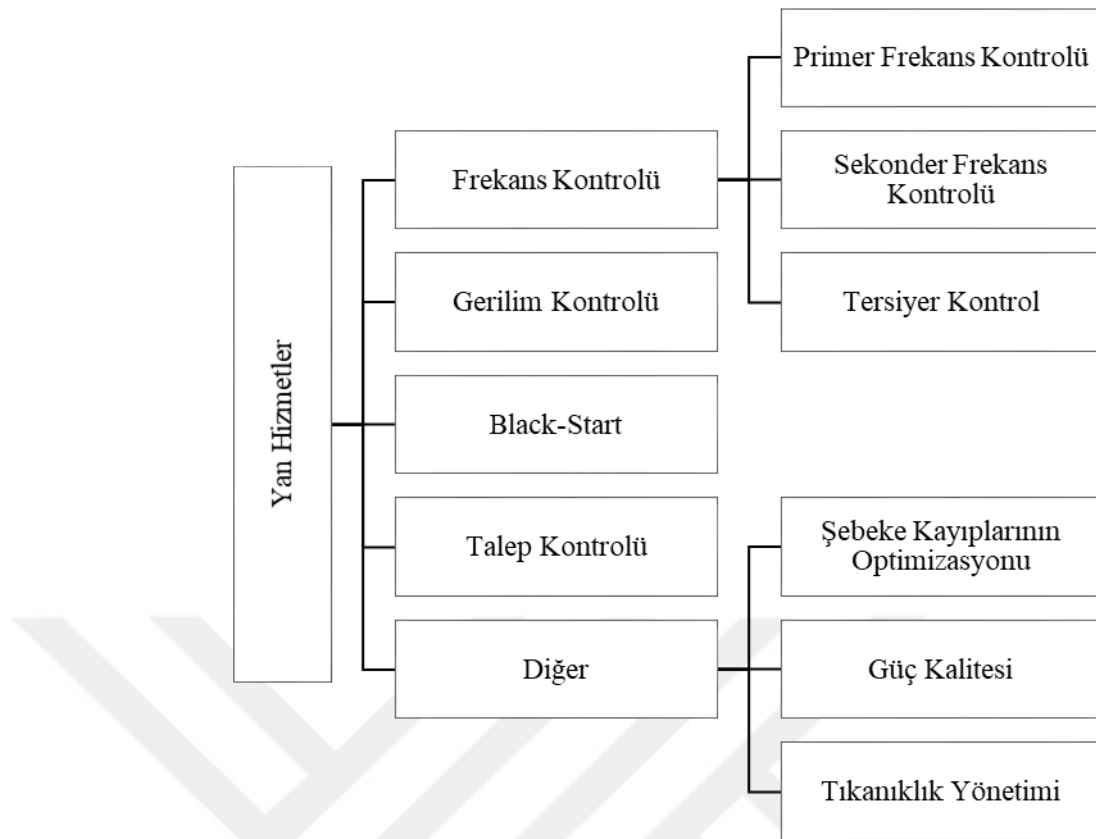
1. GİRİŞ

Elektrik iletim ve dağıtım şebekelerinde enerji kalitesinin temel parametreleri olan frekans ve gerilim değerlerinin belirlenen sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir. Elektrik güç sistemlerinin kararlı ve güvenilir bir biçimde işletimini sağlamak için iletim seviyesinde temin edilen hizmetler bütünüün tamamı yan hizmetler (YH) olarak tanımlanır. Güç akışının iletim sisteminden dağıtım sistemine doğru tek yönlü olduğu geleneksel elektrik güç sistemlerinde yan hizmetler (YH) iletim sistemine bağlı üretim santrallerinden sağlanmaktadır. Geleneksel elektrik sistemlerinde;

- İletim şebekesi, yüksek gerilimli (154 kV, 380 kV, vb.) paralel hatlarla birbirine bağlanmış yapıda ve çift yönlü enerji akışları ile karakterize edilmiş, büyük üretim tesisleri ve büyük yüklerin doğrudan bağlı olduğu bir sistemdir.
- Dağıtım şebekeleri ise orta ve düşük gerilimli (31,5 kV, 15,8 kV, vb.), radyal, iletim şebekesi bağlantı noktasından yüklere tek yönlü enerji akışıyla karakterize edilmiş, neredeyse herhangi bir üretim tesisiyle (tüm üretim tesislerine oranla çok kısıtlı üretim tesisleri) doğrudan bağlı olmayan ve yüklerin sadece istatistiksel olarak tahmin edilebilir olduğu bir sistemdir.
- Toptan piyasalara sadece büyük güçteki üretim santrallerinin katılmalarına izin verilmiş ve bunlar sisteme frekans ve gerilim kontrolü yan hizmetleri vermiştir.

1.1. Yan Hizmetler Nedir?

Elektrik enerjisinin üretiminden son tüketiciye kadar standart ve mevzuatlarla belirlenen kalitede sunulması gerekmektedir. Güç akışının tek yönlü olduğu geleneksel sistemlerde, frekans ve gerilim parametrelerinin belirlenen sınırlar içerisinde kalabilmesi için yan hizmetler, iletim sistem operatörü (TSO, Transmission System Operator)'ların kontrolünde bulunan üretim tesislerinden sağlanmaktadır. Farklı kurumlar yan hizmetleri, üzerinden tanımlar yaparak anlatmaya çalışırlar. Yan hizmet servisleri; üretim, iletim ve kontrol sistemi ekipmanları vasıtasıyla üretilen enerjinin tüketicilere güvenli ve sürekli bir şekilde sağlanması için temin edilir (Eurelectric, 2015). Yan hizmetler en genel haliyle Şekil 1'de gösterildiği gibi gruplanabilir.



Şekil 1. Temel olarak yan hizmetlerin sınıflandırılması (ENTSO-E, 2017), (FERC, 2018)

1.1.1. Frekans Kontrolü

Frekans kontrolü, iletim sistemi işletmecileri tarafından gerçekleştirilir. İletim Sistemi Operatörleri, elektrik üretimini ve tüketimini dengeli tutma zorunlulukları vardır ve bu da kaliteli enerji için şebeke işletimi için vazgeçilmez bir gerekliliktir. Elektrik güç sisteminde frekans değerini sürekli olarak ± 200 mHz frekans aralığında tutmak için; üretim ve tüketim aktif güç değerleri kontrol edilerek, elektrik enerjisi arz-talep dengesi sağlanmalıdır (Miguel ve ark., 2007). Frekans kontrolü gerçekleştirebilmek için belirli miktarda aktif güç yedeği tutulmaktadır. Frekans kontrol yedeği sistem frekansı belirlenen değer altına düştüğü durumlarda kullanılmaktadır. Güç sistemi frekansında salınımların yaşanması durumunda ilk olarak primer frekans kontrolleri devreye girmektedir. Frekans salınımı ± 200 mHz bandında ise primer kontrol rezervleri kullanılarak salınımların sabit kalması sağlanır. Daha sonra sekonder frekans kontrolü devreye girmekte, sistem frekansını nominal değere getirmektedir. Sekonder kontrole benzer bir biçimde tersiyer frekans kontrol devreye girmektedir. Tersiyer frekans kontrolü genelde yük alma ve yük atma talimatlarıyla üretim ve tüketim dengesini sağlamaktadır.

1.1.2. Gerilim Kontrolü ve Reaktif Güç Desteği

Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nde belirtilen “Şebeke bağlantı noktasında meydana gelen $\pm\%10$ 'a kadar olan gerilim dalgalanmaları (0,9pu – 1,1pu) normal işletme koşulları olup, ilgili üretim tesisleri E.18.6 Reaktif Güç Desteği Sağlanması bölümünde belirtilen esaslara uymalıdır.” Maddesi bulunmaktadır. Yönetmelikte de belirtildiği üzere gerilim kontrolü, elektrik güç sisteminin gerilim değerini belirlenen işletme gerilim sınırları içerisinde tutması için uygulanan zorunlu bir servistir. Elektrik güç sisteminde gerilim kontrolü büyük oranda reaktif güç kontrolü ile gerçekleştirilmektedir. Şebekenin ihtiyacı olan reaktif gücün uzun mesafelere iletilebilmesi için şebeke genelindeki reaktif güç üretim kaynaklarının lokasyonlarının belirlenip, uygun yerlerde kompanzasyon yatırımlarının yapılması gerekmektedir.

Gerilim kontrolü için gerekli reaktif güç yerel olarak ihtiyaç noktalarında sağlanmaktadır. Reaktif güç jeneratör, senkron kompanzator (STATCOM) gibi dinamik kaynaklardan ve kapasitör bankaları, statik gerilim kontrolörü ve esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS: Flexible Alternating Current Transmission Systems) statik kaynaklardan sağlanmaktadır.

1.1.3. Black Start

Black start (oturan sistemin toparlanması) elektrik güç sisteminin bozucu etki sonrasında geniş alanlı olarak veya tamamen çökmesi durumunda yeniden enerjilendirme süreçlerini ifade etmektedir. Yeniden enerjilendirme aksiyonları sistem kararlılığı sağlandıktan sonra, devreye alınabilen üretim tesisleri ile güç sisteminin devreye alınmasının sağlanmasıdır.

Güç sisteminin restorasyonu çöken sistemin yeniden enerjilendirilmesi, frekans stabilizasyonu ve yeniden senkronizasyonu aşamalarından oluşmaktadır.

1.1.4. Talep Kontrolü

Sistem operatörü (SO) ile tüketiciler arasında yapılan anlaşmalar doğrultusunda elektrik enerjisine olan talebin azaltılarak frekans kontrolünün sağlanması esasına dayanmaktadır. Talep kontrolü servise katılan tüketicilerin yüklerinin bir kısmının şebekeden ayrılması ile gerçekleştirilmektedir. Enerji arzının yetersiz olduğu ya da talebin fazla olduğu durumlar karşısında frekans kontrolünde kullanılacak anlık üretim artırma talepleri ya da anlık olarak tüketim azaltma talepleri oluşturulmaktadır. Tüketim talep kontrolüne büyük güçlü endüstriyel tesis katılımını hedeflemektedir.

Elektrik güç sistemlerine entegre yenilenebilir dağıtık üretim kaynaklarının artmasıyla ilerleyen yıllarda talep kontrolünün tüketimin artırılmasına yönelik olması beklenmektedir. Özellikle gece, hafta sonu ve bayramlar gibi uzun süreli zamanlarda mevsim ve iklimsel niteliklere bağlı olarak üretim fazlasının meydana gelmesi muhtemeldir.

1.1.5. Tıkanıklık Yönetimi

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlığının artması ve tüketim alışkanlıklarının değişmesi, tüketim miktarının artması ve dönemsel tüketim farklılıklarının oluşması gibi sebeplerden operasyonel zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar, üretim fazlalığı ve tüketim fazlalığından kaynaklı iletken kısıtı ve trafo kısıtı olarak karşımıza çıkmaktadır. Yan hizmetlerin uzun vadede dağıtım seviyesinde şebekeye bağlı üretim santrallerinden temin edileceği öngörülmektedir. Güç sistemindeki üretim tesisleri tarafından sağlanabilecek esneklik ve tüketim yapan büyük tesislerin yüklerinin kaydırılması için TSO ve DSO arasındaki iş birliğini sağlayacak mevzuat altyapısının oluşturulması önem arz etmektedir. Böylelikle tıkanıklık (congestion) durumları sistem operatörleri arasındaki kuvvetli iletişim ve iş birliği ile sistem esnekliğinden daha fazla faydalanılarak aşılabilecektir (Zipf ve Möst, 2016).

1.2. Yan Hizmetlerin Dağıtım Şebekesinden Alınması

Dağıtım şebekesine dâhil olan güneş ve rüzgâr gibi invertör sistemli yenilenebilir enerji üretim kaynakları, depolama sistemleri, elektrikli araçlar, akıllı sayaç sistemleri, vb. yeni teknolojiler, güç sisteminin mimarisini ve çalışmasını değiştirmektedir. Yukarıda örnekleri verilen Dağıtık Enerji Kaynaklarının (DEK) yaygınlaşması ile birlikte iletim ve dağıtım sistemlerinin dolayısıyla İletim Sistemi Operatörlerinin (TSO) ve Dağıtım Sistemi Operatörlerinin (DSO) mevcut rolleri gün geçtikçe değişmektedir.

DEK'lerin çoğalması, mevcut güç sistemlerinin işletilmesini, kontrolünü, korunmasını ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Aktif ve reaktif gücün tek yönlü akışı, rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarında (RES,GES) olduğu gibi artık geçerli değildir. RES ve GES enerji kaynaklarının kesintili doğası sebebiyle bu tip güç sistemlerinde ani değişikliklerle karşılaşılır. Ayrıca, dağıtık üretim tesislerinin şebeke koşullarından bağımsız olarak sabit güç faktörü ile çalışması, bağlantı noktalarında gerilim yükselmelerine neden olarak hat kayıplarının artmasına neden olur.

Dağıtım sistemine bağlı üretimin fazla olması durumlarında dağıtım sistemine sürekli aktif güç verilmesi ve dağıtım sisteminden iletme ters güç akışlarına yol açmaktadır.

Yukarıda saydığımız sebeplerden yan hizmetlerin yeniden şekillendirilerek hem iletim hem de dağıtım sistem operatörlerinden sağlanması gündeme gelmektedir. Ek olarak geleceğin akıllı şebekeler yapısının hayata geçirilmesi ile birlikte yan hizmetler günümüzün elektrik güç sistemlerinden esnek akıllı şebekelere geçişle mümkün olacaktır. Bu geçiş, yan hizmetlerle birlikte yeni fırsatlar içermektedir (Gustavsson ve ark., 2013). Akıllı şebeke konseptiyle birlikte güç sistemlerinde işletme, kontrol, koruma ve güvenilirlik kavramlarının gelişmesi gerekmektedir (Delfanti ve ark., 2014).

Özellikle dağıtım sistem operatörlerinde gün geçtikçe artmakta olan dağıtık üretim kaynaklarından yan hizmetlerin sağlanmasına yönelik; ön yeterlilik, tedarik, harekete geçirme ve uzlaştırma süreçleri ile TSO-DSO koordinasyonun belirlenmesi çalışmaları yapılmaktadır. Dağıtım şebekesinde yan hizmetler RES, GES, biyogaz, batarya depolama vb. kaynaklardan alınabilir.

Enerji depolama sistemleri, esneklik sağlama ve enerji sisteminde yenilenebilir enerji entegrasyonunu destekleme konusunda önemli bir teknolojidir. Depolama sistemleri, merkezi ve dağıtık elektrik üretimini dengeler, aynı zamanda arz güvenliğine katkıda bulunur. Enerji depolanmasının talep tarafı yönetimi, esnek üretim ve şebeke geliştirmeye tamamlayıcı etkisi vardır. Enerji depolanması ayrıca diğer ekonomik sektörlerin de-karbonizasyonuna katkıda bulunabilir ve ulaşım, bina veya endüstride depolama sayesinde yenilenebilir enerjinin negatif etkisi olan üretim dengesizliğinin etkisi azaltılarak, yenilenebilir entegrasyonunun payının artmasını destekleyebilir. Enerji depolama alanının elektrikle olan rolü, hangi teknolojilerin ve yenilikçi çözümlerin farklı amaçlar için daha uygun görüldüğü ve olası politika yaklaşımları, temiz enerji çerçevesinde değerlendirilmelidir.

Depolama teknolojileri günümüz teknolojileri göz önünde bulundurularak daha uygun maliyetli, geniş çaplı kullanımlı ve çok karlı şebeke katılımcısı olarak görünmeye başlamıştır. Aşağıda bazı enerji depolama sistemleri bulunmaktadır:

- Kimyasal Enerji Depolama Sistemleri
 - Lityum-iyon (Li-ion) bataryalar
 - Redoks akışlı bataryalar
 - Kurşun bataryalar
 - Nikel kadmiyum bataryalar
 - Sodyum sülfür bataryalar
 - Sodyum nikel klorür bataryalar

- Metal-hava bataryalar
- Ultra/Süper Kapasitörler
- Sıkıştırılmış Hava Enerji Depolama
- Hidrolu pompa
- Volan
- Yerçekimi elektrik depolama

Bazı depolama teknolojileri mükemmel frekans ve gerilim regülasyonu sağlayıcılarıdır, depolama tarafından sunulan hızlı yanıt ve hassas kontrol, birçok geleneksel üretim santralinin kontrol yeteneklerinden daha üstündür. Performanslarında bozulma olmaksızın tekrarlanan yüksek devirli depolama kapasitesini sağlayabilen teknolojiler en uygun frekans ve gerilim regülasyonu sağlayıcılarıdır (Kumar ve ark., 2022).

Enerji depolama sistemleri elektrik güç sistemlerinde yan hizmetler katılım bağlamında aşağıdaki hizmetleri sağlayabilir:

- Yük takibi (Load Following)
- Düzenleme (Regulation)
- Frekans Cevabı (Frequency Response)
- Yedek Kapasite
- Gerilim Desteği (Voltage Support)
- Oturan Sistemin Toparlanması (Black Start)

Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşmasının dağıtım ve iletim şebekelerine yeni bir yük ilave etmelerinin yanı sıra depolama kaynağı olarak kullanıldıkları için şebekenin güvenilirliği ve yük yönetimi ve enerji kalitesi bağlamında da değerlendirilebilir. Elektrikli araçların (EA) şebekede yan hizmetlere destek verebilmeleri için EA'ların bataryaları çift yönlü tasarlanmaktadır. Bu şekilde araçtan şebekeye (V2G) veya şebekeden araca (G2V) enerji aktarımı mümkün olacaktır (Sortomme ve El-Sharkawi, 2012). Elektrikli araçlar, şarj edilirken şebekeden enerji çekmesinin yanı sıra, şebekeye enerji basabilecek bir mobil depolama bileşeni olarak da değerlendirilebilir. Bunun için yeni mekanizmalar kurularak akıllı evler regülasyon planı hazırlanmalıdır (Tong ve ark., 2023). Böylece, şebeke işletmecisine farklı dengeleme servisleri ya da yan hizmetler sağlayabilir. Bunun yanı sıra, gerekli durumlarda mesken talebini karşılayan bir depolama unsuru görevini üstlenebilir. Yan hizmet olarak EA ların kullanılması teorik olarak yüksek fayda sağlasa da teknolojik kısıtlar nedeniyle V2G uygulamalarının yaygınlaştırılmasının önünde bazı engeller vardır. Bunlardan en önemlisi güç elektroniği teknolojisi bağlı olduğu için şarj-deşarj döngü sayısının artması

nedeniyle EA pil ömürleri çok hızlı bir şekilde azalacak olmasıdır. Bunlardan en önemlisi şarj-deşarj döngü sayısının artması nedeniyle EA pil ömürleri çok hızlı bir şekilde azalacak olmasıdır (Joos ve ark., 2000).

Diğer bir yan hizmet kaynağı ise elektrik dağıtım şebekesine bağlı dağıtık üretim santralleri, GES ağırlıklı olmak üzere, RES, biyogaz, HES vb. santrallerdir. Tez çalışmasında da kullanacağımız dağıtık üretim kaynaklarının yan hizmetlerde kullanılması aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

1.2.1. Dağıtık Üretim Kaynakları

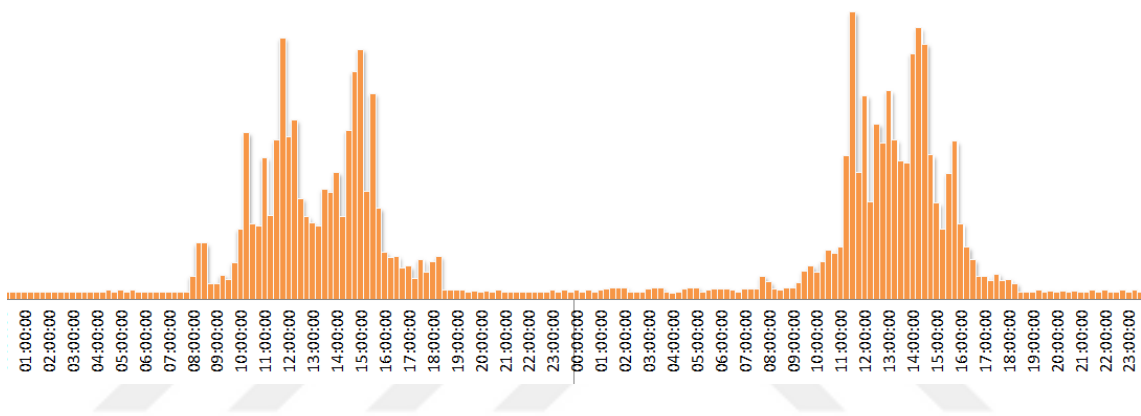
Ülkemizde, dağıtım şirketleri nominal gerilim seviyesi olan orta gerilimde 36 kV ve alçak gerilimde 400 V olan gerilim seviyelerinden sorumludur. Dağıtım şebekesine orta gerilimden veya alçak gerilimden bağlanan üretim santralleri bulunmaktadır. Bu üretim santrallerinin işletmesinden, şebekeye etkilerinden dağıtım şirketleri sorumludur.

Geleneksel üretim sistemlerinin bahsedilen bazı sorunlarından dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgâr, hidrolik, güneş, biokütle, jeotermal ve kojenerasyon enerji sistemleri tercih edilmektedir. Önümüzdeki dönem içerisinde de güneş, nehir tipi hidro, jeotermal ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretim santrallerinin daha da yaygınlaşacağı öngörülmektedir (Ahuja ve ark., 2017). Dağıtık üretim santrallerinin yaygınlaşması ile birlikte enerjinin taşınması ve taşınması sırasında karşılaşılan teknik kayıpların önüne geçilebilecektir.

YEK'lerin (Yenilenebilir Enerji Kaynağı) artışı üretimin fazla olduğu zamanlarda bölgede gerilim yükselmesi problemlerine neden olmaktadır (Kobayashi ve Hatta, 2011). Ayrıca, üretim santralinde üretilen enerjinin iletimi için yapılan büyük kesitli iletkenler, gece üretim olmadığında şebekede kapasitif etkiye neden olmaktadır. Alçak ve orta gerilim seviyesinde günün belirli saatlerinde aşırı aktif güç üretimi/tüketimi, gerilim yükselmesine/düşmesine neden olabilmekte ve teknik kayıp oranları artmaktadır.

Yerel bölgede üretim yoksa elektrik enerjisi tüketiciye ulaştırılana kadar mesafe arttıkça gerilim iletim hattının uzunluğuyla orantılı olarak düşer. Bir hattın sonunda dağıtık üretim miktarı yüksek ve bu üretimi kullanacak yük olmadığında ciddi bir gerilim limitinin aşılması sorununa yol açarak (Wang, 2020) ters yönde (dağıtımdan iletme) güç akışı gerçekleşerek gerilim yükselir. Sonuç olarak, gerilim çok yüksek seviyelere yükselebilir veya gerilim alt sınırlarına inebilir. DSolar, gerilim düşümlerini (<1 pu) kompanzasyon yatırımları ile en aza indirmeye çalışmaktadır. Gerilim yükselmesine (>1 pu) ise çok fazla etki edememektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artış göstermesinin zorluklarından biri de güneşin konumuna, rüzgâr hızına göre vb. nedenlerden dolayı anlık olarak gerilim değişimi problemleri yaşanmaktadır (Glende ve ark., 2018; Vietnam ve Tien, 2018). Gerilim değişimlerinin tüketicilere ve dağıtım şebekesi operatörüne ciddi zorluklara neden olmaktadır. Aşağıdaki şekilde Meram Elektrik Dağıtım Şirketi bölgesinden seçilmiş bir güneş santraline ait rastgele 2 gün için üretim profili görülmektedir. Şekil 2’de de görüldüğü üzere öğle saatlerinde üretim artmakta ancak saat 13.00’de güneşin önüne bulut gelmesi veya başka bir nedenden dolayı anlık olarak üretim değişebilmektedir (Koroğlu ve ark., 2022).



Şekil 2. Rastgele seçilmiş 2 gün için aktif üretim profili

1.3. Elektrik Dağıtım Şebekesinde Yan Hizmetler Kapsamında Reaktif Güç Desteğinin Alınması

Elektrik dağıtım şirketlerinin temel görevi, iletim seviyesinden alınan enerjiyi son kullanıcıya kaliteli ve sürdürülebilir bir şekilde taşımaktır. Elektrik güç sistemindeki tüm gerilim seviyelerinde, gerilim değerinin belirlenen işletme aralığında kalması gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının artan nüfuzu ile elektrik şebekesinde artan değişkenlik ve sonrasında ortaya çıkan belirsizlik, çeşitli operasyonel kaygılara neden olmaktadır (Sreekumar ve ark., 2020). Dağıtık enerji kaynaklarının sayısı ve kapasitesi arttıkça dağıtım şebekesinde yukarıda bahsettiğimiz gerilim değişimi problemleri artacaktır. Elektrik dağıtım şebekelerinin daha kararlı ve güvenli işletilebilmesi için günümüzde dağıtım şebekesine bağlanan yenilenebilir enerji kaynaklarından yan hizmetler alınması konsepti yenilenebilir enerji potansiyelinin artması ile daha çok gündeme gelmiştir. Mevcutta bulunan yenilenebilir enerji

kaynaklarından (GES, Biyogaz vb.) reaktif güç desteği alınması trendi dünyada giderek yaygınlaşmaktadır. Elektrik üretimi için kurulmuş dağıtım şebekesine bağlı üretim santrallerinden yan hizmet alınması teknik ve ekonomik fayda sağlayacaktır (Tankut, 2019). Dağıtık üretim sistemleri ve çatı üstü güneş sistemleri ile kurulan invertörler (Jahangiri, 2013), reaktif güç kompanzasyonu, gerilim regülasyonu, fliker kontrolü, aktif güç filtrelemesi ve harmoniklerin azaltılması gibi yan hizmetlere destek verebilirler (Zhong ve ark., 2022; Tarek ve ark., 2018). Değişken hızlı jeneratörler ile rüzgâr türbinleri şebekeye atalet katma, güç kayıplarını azaltma, sistemin gerilim regülasyonunu sağlama ve frekans kontrolünde yardımcı olma potansiyeline sahiptir (Lalor ve ark., 2005; Lamadrid ve Mount, 2012; Roy ve ark., 2013).

Bu yüzden kompanzasyon yatırımları ile dağıtım şebekesine bağlı yenilenebilir santrallerin etkilerini kompanse etmek için gerilimin kontrol edilmesi için öncelikle invertör kontrollü santrallerin reaktif güç özelliklerinin kullanılması, sonrasında diğer seçeneklerinin kontrol edilmesi gerekmektedir. İntertör kaynaklı santraller reaktif güç taleplerindeki düzenlemelere şebeke geriliminde bozulmalara çok hızlı yanıt verebilmektedir (Chatterjee ve ark., 2017). Reaktif güç kontrol edilmesiyle her yıl gerçekleştirilen kompanzasyon yatırımlarını önemli oranda azalacaktır (Howlader ve ark., 2018). Ayrıca gerilimin kontrol edilmesiyle teknik kayıplar azalmış olacak ve enerji verimliliği arttırılacaktır. Böylelikle şebeke güvenliğinin iyileştirilmesi, gerilim limiti, hat kapasitesi, YEK penetrasyonu, kondansatör penetrasyonu arttırılmış olacaktır (Kayal ve Chanda, 2016).

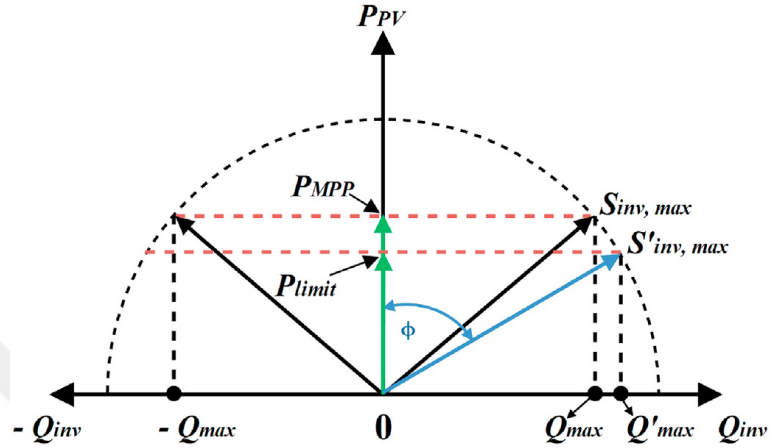
Dağıtık üretim santrallerinden yan hizmet olarak reaktif güç desteği alınırken ihtiyaç hangi fider üzerinde ise o fider üzerinden gerekli reaktif güç desteği alınmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Örneğin iletim trafosu ihtiyacı kapasitif reaktif olduğunda, kapasitif reaktif yüklü bir fiderden bu destek alınmamalı, ayrıca endüktif yüklü fiderden alınması dikkat edilirse fider bazlı teknik kayıplar azalmış olacaktır. Aynı şekilde dağıtık üretim kaynakları reaktif güç kontrol değerlerinde yapılan değişiklikler şebekenin gerilim kalitesini ve güvenliğini önemli ölçüde arttıracaktır (Joseph ve ark., 2020).

1.4. İntertör Kullanarak Reaktif Güç Desteği

Reaktif güç sorununu çözmeye yoluna bağlı olarak çok çeşitli kompanzasyon ürünleri vardır. Bu kompanzasyon sistemleri arasında olan invertörler, güç faktörünün değiştirilmesi ile talebe göre reaktif güç sağlayabilir (Bernáth ve Mastný, 2012). Bu

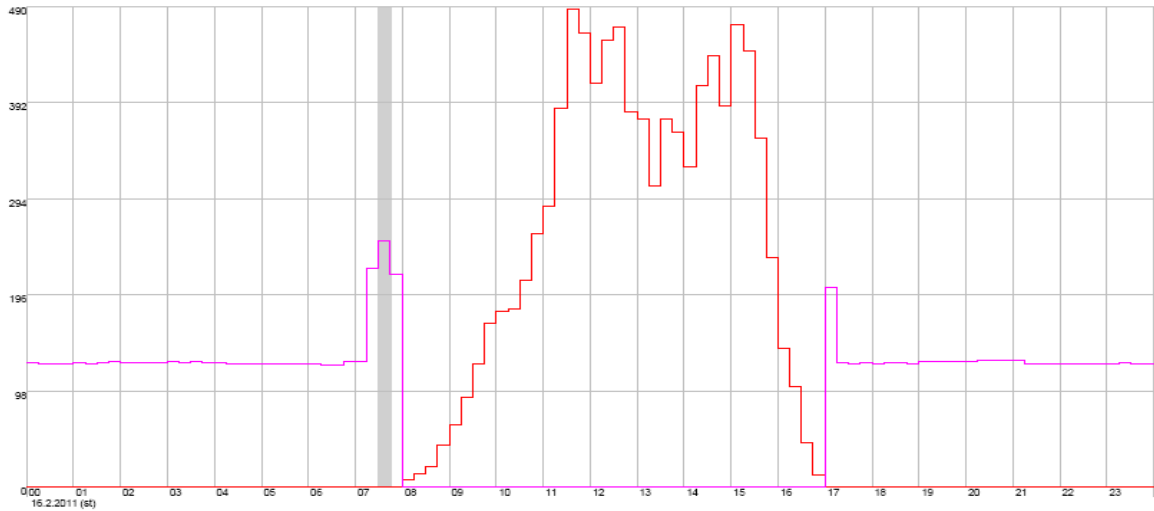
reaktif güç talebi Şekil 3'teki grafikte olan kurala göre sağlanmaktadır. İntertörden reaktif güç desteği almak için üretim santralinde aktif üretim olan P var ise aşağıdaki denkleme göre Q_{max} değeri olan reaktif güç desteği alınabilir.

$$\text{Maksimum Reaktif Güç Desteği} = Q_{max} = \sqrt{S_{inv}^2 - P_{limit}^2} \quad (1)$$



Şekil 3. PV santrali invertörü için Aktif Güç- Reaktif Güç kapasite tablosu (Kumar ve Singh,2021)

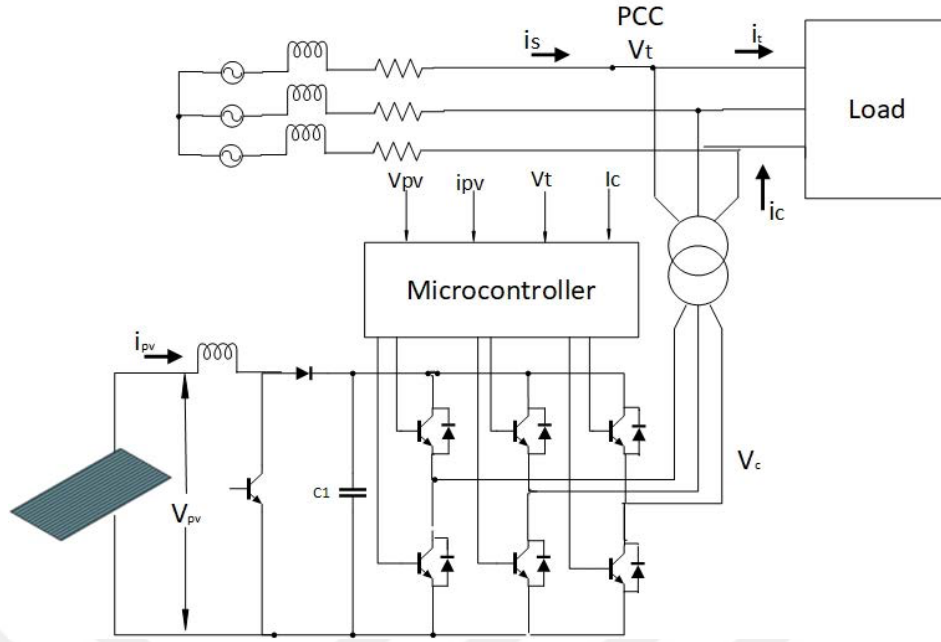
Şekil 4'te tipik bir invertörün reaktif güç desteği alma ve reaktif güç desteğinin bırakıldığı andaki yük profili eğrisi bulunmaktadır. Normal çalışma anında invertörden sadece aktif üretim desteği alındığı anda Şekil 4'te görünen pembe eğri invertörün şebekeye verdiği reaktif gücü göstermektedir. Kırmızı eğri ise invertörden reaktif güç desteği alındığı anda ki tepkisidir.



Şekil 4. Klasik bir invertörün reaktif gücünün tipik karakteristiği (pembe eğri) – İntertörden reaktif güç destek alma başlatma ve destek durdurma işlemi sırasında kapasitif güç eğrisi (Bernáth ve Mastný, 2012)

Şekil 5'te şebekeye bağlı PV sisteminin eşdeğer devresi gösterilmektedir. PV sistemi ana anahtar olarak bir diyot kullanan PV panellerine ve PV panellerine paralel bağlı bir kapasitörden meydana gelir.. Kondansatör invertörün güç girişine bağlanır. İntertör çıkışı, RL filtresi aracılığıyla şebekeye bağlanır. PV santralin eşdeğer devresi aşağıdaki bölümlerden oluşmaktadır (Banuelos ve ark., 2023):

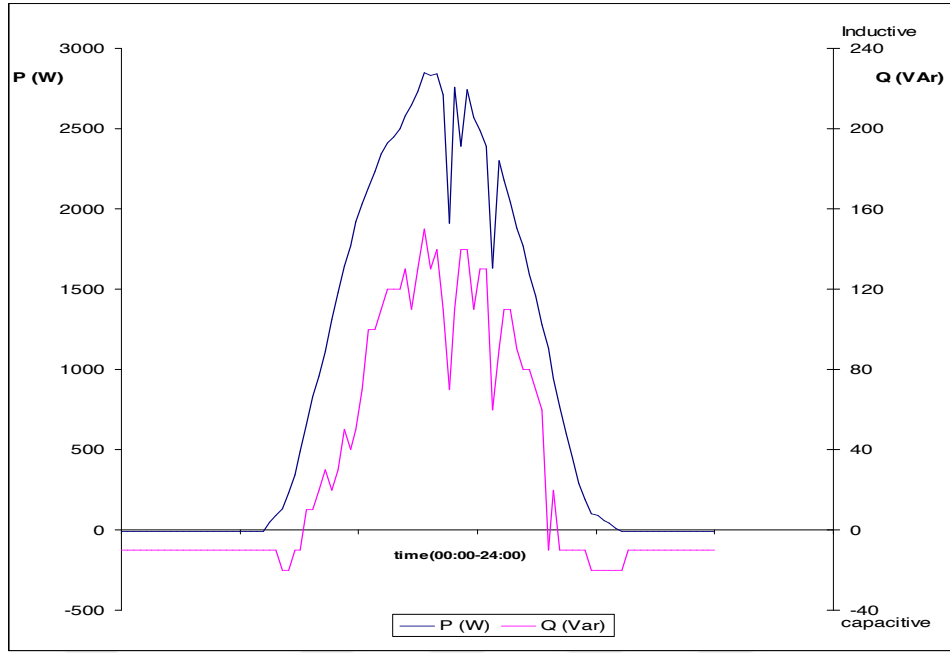
- Güç kaynağı PV panelleridir.
- Panellere paralel bağlı olan diyot ve kapasitör, elektrik akımının şebeke akımından PV panellerine geri dönmesini önler. Kapasitör, PV santralin aktif olmadığı dönemlerde sanal güç kaynağıdır.
- İntertör DC'den AC'ye gerilim dönüşümünü sağlar ve kontrol edilebilir akım çıkışı üretir.
- Anahtarlama harmoniklerini iptal etmek için invertör çıkışı ile şebeke arasına endüktif bir filtre olan RL bağlanır.
- İntertörün referans akımı kontrolünün kalitesine bağlıdır. İntertörün entegre bir şebeke devresinde uygulanmasının amacı, referans akımıyla birlikte alternatif bir çıkış akımı elde etmektir.
- Referans olarak endüktif bir yük ortak bağlantı noktasına bağlıdır.
- i_s 'yi elde etmek için, PV santralin enerjisi olmadığı zamanlarda kapasitör gerilimini korumak için PV panellerinden ve gerilim döngüsünden bir aktif güç tahmincisi kullanılır. Bu aktif güç tahmincisi maksimum aktif güç algoritması (MPPT) tarafından elde edilir.
- İntertör tarafından üretilen aktif güç, uygun bir PWM tekniği ile kısa hesaplama süresinde üretilir. Bu üretilen güç, düşük kayıplı, yüksek verimli, düşük distorsiyonlu ve minimum harmoniklidir. Uygun bir modülasyon yöntemi ile invertör topolojilerinde dönüştürücü yapısında herhangi bir değişiklik yapılmadan reaktif güç üretimi sağlanır.



Şekil 5. Şebekeye bağlı üç fazlı invertör PV sistemi (Dhaneria, 2020)

Bütün PV santrallerinde, tesisin nihai karakterini belirleyen çeşitli envanterler vardır. Bu envanterler; invertörler, alçak gerilim iletkenleri, orta gerilim iletkenleri, trafolar ve PV santrali için kurulan kapasitif kompanzasyonlar sistemlerini içerir. Bu envanterlerin teknik özellikleri tesisin nihai reaktif gücünü oluşturmaktadır.

İnvertörlerin reaktif gücünün değerlendirilmesi, PV santralin üreticisinin belirlemesine göredir. PV santral projelendirme aşamasında kullanılan kablolar mesafeleri, trafonun doluluk oranı vb. durumlar santralin nominal çalışma anında reaktif gücünü belirler. Alçak gerilim ve orta gerilim kabloları kapasitiftir ve mesafeler arttıkça kapasitif reaktif değeri daha da artar. Trafolar ise yüksüz durumda endüktif yüklüdür, yüklenme arttıkça endüktif reaktans da artar. Şekil 6'da yapılan çalışmaya göre 3 MW güce sahip bir PV santralin, trafonun orta gerilim tarafından alınan yük profili grafiğine göre puant aktif güç üretiminin yaklaşık 3 MW olduğu anda hiçbir etki olmadan 160 KVAR reaktif ürettiği görülmektedir (Bernáth ve Mastný, 2012).



Şekil 6. Bir PV santrali güçlerinin tipik karakteristiği (Bernáth ve Mastný, 2012).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

R.K. Ahuja ve arkadaşları, dağıtık üretimin, yeni bir enerji üretim aracı olarak hızlı bir gelişme kaydettiğine değinmiştir. Güç elektroniği sistemleri, tipik bir dağıtık üretim sisteminin toplam sermaye maliyetinin önemli bir bölümünü oluşturabilir. Şebekeye bağlı dağıtık üretim sistemlerinde, tek fazlı veya üç fazlı darbe genişlik modülasyonu (PWM) gerilim kaynaklı invertörler, aktif reaktif güç kontrolünü aşağıdakiler aracılığıyla düzenlemek amacıyla, dağıtım şebekesini dağıtık üretim kaynağıyla senkronize etmek için sıklıkla kullanılır. Gerilim ve frekans kontrolü güç kalitesinin iyileştirilmesi. Şebekeye bağlı invertörlerin akım kontrolü, şebekenin yüksek kalitede güçle beslenmesinde baskın bir rol oynamaktadır. Bu makalede, güç kalitesini arttırmak ve dinamik performansı arttırmak amacıyla, üç fazlı gerilim kaynaklı invertör aracılığıyla şebekeye beslenen aktif ve reaktif gücün kontrol edilmesini sağlayan kontrol şeması incelenmiştir (Ahuja ve ark., 2017).

A. Chatterjee ve arkadaşları, tek fazlı şebekeye entegre fotovoltaik sistemlerin tasarımı, analizi ve kontrolüne odaklanmaktadır. Bu yazıda, MATLAB/SIMULINK yazılımı kullanılarak çift aşamalı bir fotovoltaik invertör sistemi simüle edilmiştir. Fotovoltaik jeneratörü şebekeye entegre eden tek fazlı gerilim kaynaklı invertörün çıkış akımı kontrolü için gecikme kompanzasyon tekniği ile model tahminli kontrol teorisine dayalı bir dijital öngörülü akım kontrolörü tanıtılmıştır. Önerilen kontrol stratejisi, mükemmel kararlı durum performansı sergilemiş ve yüksek bir çıkış güç faktörüne ulaşmıştır. Ayrıca, reaktif güç taleplerindeki değişiklik ve şebeke gerilimi bozulmaları sırasında çok hızlı geçici yanıt sağlamıştır. Önerilen denetleyicinin etkinliği, dijital sinyal işlemcisi kullanan deneysel bir uygulama üzerinde doğrulanmıştır (Chatterjee ve ark., 2017).

M. Delfanti ve arkadaşları, dağıtım şebekesinde dağıtık üretim tesislerinin yaygınlık oranının artmasının mevcut güç sistemlerinde işletme, kontrol, koruma ve güvenilirlik kavramları üzerine etkileri olduğunu söylemektedir (Delfanti ve ark., 2014).

European Network of Transmission System Operators for Electricity (Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşleticileri Ağı, ENTOS-E), yan hizmetleri TSO'nun sistem güvenliğini sağlamak için çeşitli fonksiyonların uygulanması olarak tanımlamaktadır. Bu kapsamdaki yan hizmetler; frekans tepkisi, hızlı yedek, reaktif güç sağlanması, oturan sistemin toparlanması ve çeşitli diğer servisler olarak tanımlamaktadır (ENTSO-E, 2017)

Eurelectric yan hizmetleri; iletim ve dağıtım sistem operatörlerinin elektrik güç sisteminin bütünlüğünün ve kararlılığının korunması ve güç kalitesinin belirlenen

düzyeyde sağlanması için gerekli servisler olarak tanımlanmaktadır. Yan hizmet servisleri; üretim, iletim ve kontrol sistemi ekipmanları vasıtasıyla üretilen enerjinin tüketicilere güvenli ve sürekli bir şekilde sağlanması için temin edilir (Eurelectric, 2015).

M. Farrivar ve arkadaşları, fotovoltaik üretimin yüksek penetrasyonu ve bunun sonucunda ters güç akışı nedeniyle hızlı ve büyük gerilim dalgalanmalarını azaltmak için hızlı bir zaman ölçeğinde invertör değişken kontrolünün faydalarını göstermektedir. Bunun için, gerilim büyüklükleri üzerindeki kısıtlamalara tabi olarak hat kayıplarını ve enerji tüketimini en aza indirmek için volt/VAr kontrolünü bir radyal optimal güç akışı (OPF) problemi olarak formüle etmiştir. Radyal OPF problemine etkili bir çözüm sunulur ve şebeke ile eşit olmayan güç faktöründe çalışırken sürücü kayıplarının ek maliyetini hesaba katarak optimum invertör değişken enjeksiyonunun yapısını ve net faydalarını incelemek için kullanılmaktadır. Bu makale, devre topolojisine ve yükleme durumuna bağlı olarak, invertörün optimal reaktif güç enjeksiyonunun gerçek güç çıkışına göre nasıl monoton olmadığını gösterecektir. Sonuçlar, çok hafif bir yüke ve trafo merkezinden uzağa kurulmuş 5 MW'lık bir fotovoltaik sisteme sahip olan Güney Kaliforniya Edison sistemindeki bir dağıtım fiderinde gösterilmektedir (Farrivar ve ark., 2012).

Federal Enerji Düzenleme Komisyonu – (Federal Energy Regulatory Commission, FERC), yan hizmetleri; kontrol alanlarının yükümlülükleri göz önüne alındığında, satıcıdan alıcıya elektrik enerjisinin iletilmesini desteklemek ve bu kontrol alanlarında, birbirine bağlı iletim sisteminin güvenilir operasyonlarını sürdürmek için gerekli hizmetler olarak tanımlamaktadır. Üretimle birlikte sağlanan yan hizmetler, yük takibi, reaktif güç gerilim regülasyonu, sistem koruma hizmetleri, kayıp telafi hizmeti, sistem kontrolü, yük tevzi hizmetleri ve enerji dengesizliği servislerini içermektedir (FERC, 2018).

E. Glende ve arkadaşları, yayınladıkları makalede dağıtık üretimin büyük bir kısmı, düşük, orta veya yüksek gerilim seviyesinde bağlı olan rüzgâr veya güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretir. Yenilenebilir enerjilerin değişken doğası, şebeke parametreleri üzerinde olumsuz etkilere sahip olabilir. Bu yayında, enerji kaynağındaki değişiklikleri karşılamak için gerilim kontrolüne yönelik bir algoritma sunulmaktadır. Dağıtılmış üretimin reaktif veya aktif gücü kullanılarak gerilim sabitlenecek ve tanımlanan gerilim aralığında tutulacaktır. Algoritma, yüksek oranda yenilenebilir, dağıtık üretim içeren tasarlanmış bir şebeke modeliyle doğrulanmıştır (Glende ve ark., 2018).

R. Gustavsson ve arkadaşları, gelecekteki akıllı şebekelerdeki yan hizmetlerin rollerini ve modellerini ele almaktadır. Geleceğin akıllı şebekelerinin hayata geçirilmesinin günümüzün ağırlıklı olarak hiyerarşik ve düzenlenmiş güç sistemlerinden açık piyasa bazlı esnek akıllı şebekelere geçişle mümkün olacağı vurgulanmaktadır. Bu geçiş, yan hizmetlerle ilgili yeni paydaşları ve pazar fırsatlarını içermektedir (Gustavsson ve ark., 2013).

S. Hikosaka ve arkadaşları, yayınlamış oldukları makalede üç fazlı dört telli dağıtım besleyicilerindeki aktif güç hattı düzenleyicisi için yeni bir sabit kapasitör gerilim kontrolü tabanlı reaktif güç kontrol stratejisi önermektedir (Hikosaka ve ark., 2018).

A. M. Howlader ve arkadaşları, PV jeneratörlerde kullanılan akıllı bir PV invertörün, Volt-VAr kontrol işlevini kullanarak şebekeden/şebekeye reaktif güç (VAr) çekerek veya vererek gerilimin düzenlenmesine katkısını gerilim regülasyonu için invertör Volt-VAr kontrol yönteminin deneysel bir analizini yaparak sunmaktadır. Akıllı bir invertör kullanmanın kapasitif ve endüktif etkileri ve bu etkilerin dağıtım seviyesindeki gerilimi düzenleme yeteneği bu yazıda araştırılmaktadır. Akıllı bir PV invertörün reaktif güç çektiğinde, dağıtım gerilimini yükselttiği reaktif gücü emdiğinde ise gerilimi azalttığı görülmüştür. Sonuç olarak elektrik dağıtım şirketlerinin, güç şebekesine ek cihazlar kurmadan dağıtım gerilimini bu yolla kontrol edebileceği gösterilmektedir (Howlader ve ark., 2018).

P. Jahangiri, tamamen dağıtık iki seviyeli bir Volt/VAr kontrol (VVC) algoritması ile gerilim regülasyonu için PV invertörlerini bir araya getirmeyi ve kullanmayı amaçlamıştır. Düşük ve yüksek seviyeli olmak üzere iki VVC şeması kullanmıştır. Düşük seviyeli VVC şemasında konsensüs algoritmaları yardımıyla PV invertörleri bir araya getirilmiş ve orta gerilim ağlarındaki düşüş kontrolleri tarafından yönetilmiştir. Daha düşük seviyeli çatı tipi PV invertör sayesinde şebekesindeki gerilim düşüşleri kontrol edilmektedir. Gerilim düşüş kontrolörü, her bir PV toplayıcının reaktif güç çıkışını, bara gerilimi değişikliklerine bağlı olarak gönderilen değerinden gerçek zamanlı olarak ayarlar (Jahangiri, 2013).

G. Joos ve arkadaşları elektrik enerjisi kalitesi ve kullanılabilirliğine ilişkin artan endişelerin daha fazla dağıtık üretimin kurulmasına yol açtığını vurgulamaktadır. Bu makalede, dağıtık üretimin bu hizmetlerden bazılarını sağlama potansiyeli tartışılmaktadır. Özellikle dağıtık üretim, yerel olarak AC sistemlerin dönme rezervine ve gerilim desteğine eşdeğer olarak hizmet edebilir. Güç elektroniği ara yüzüne ve yan hizmetleri sağlamaya uygun konfigürasyonlara vurgu yapan ana dağıtık üretim türleri

gözden geçirilmektedir. Güç elektroniği ara yüzünün sağladığı esneklik ve özellikler gösterilmektedir. Gerçek gücün kontrolüne ek olarak, reaktif güç ve güç kalitesiyle ilgili kaynaklar gibi hizmetleri sağlamak için ara yüzün tasarımına başka işlevler de dahil edilebilir. Bunlar arasında gerilim düşüşü kompanzasyonu ve harmonik filtreleme yer alır. Güç dönüştürücü ara yüzünün tasarımı üzerindeki çıkarımlar tartışılmıştır (Joos ve ark., 2000).

A. Joseph ve arkadaşları, yayınladıkları makalede rüzgâr, güneş ve batarya üniteleri gibi dağıtık enerji kaynaklarının (DEK) dağıtım şebekesindeki penetrasyonunun hızla artışından bahsetmiştir. Elektrik şebekesi güvenilirliği ve verimliliği açısından bu birimlerin siber ve fiziksel güvenliği, güç sistemi operasyonlarını doğrudan etkileyebileceğinden son derece önemlidir. Bu makale, DEK ünitelerinde reaktif güç kontrolüne yönelik siber, fiziksel ve doğal saldırılar sırasında güç dağıtımının dinamik davranışını incelemektedir. Eğrinin eğimi, ölü bant gibi gerilim-reaktif güç (Volt-VAr) eğrisi düzenindeki değişiklikleri içeren çeşitli arıza senaryoları ve güç şebekesine kapasitif ve/veya endüktif reaktif güç dağıtımındaki değişiklikler sunulmaktadır. Ayrıca sistemde dinamik VAr kompanzasyon ünitelerinin bulunmasıyla arıza senaryoları incelenmiştir. Test sistemi olarak Güney Kaliforniya'daki 140 baralı ticari dağıtım güç sistemi seçilmiş ve arızalar hem Matlab/Simulink hem de ETAP simülasyon platformlarında analiz edilmiştir. Sonuçlar, DEK ünitelerinde reaktif güç kontrol değerlerinde yapılan değişikliklerin sistemin gerilim kalitesini/güvenliğini önemli ölçüde etkilediğini ve gerilim regülatörlerinin anahtarlama eylem sayısını etkilediğini kanıtlamaktadır. Buna karşılık, kompanzasyon ünitelerine bağlanan dinamik VAr üniteleri, gerilim kalitesini artırır ve gerilim regülasyonların anahtarlama eylemlerinin sayısını azaltır, ayrıca arızalar sırasında gerilim kalitesi/güvenliği korunur (Joseph ve ark., 2020).

P. Kayal ve C.K. Chanda bu makalede, sürekli artan yük talebini sürdürülebilir bir şekilde karşılamak için, dağıtım şebekesinde fotovoltaiik (PV) dizisinin, rüzgâr türbininin ve kapasitör bankasının güçlendirilmesini önermiştir. Ağır yük büyüme durumu altında bir elektrik güç dağıtım şebekesindeki çoklu PV dizisi, rüzgâr türbini ve kapasitör ünitelerinin yerini ve gerekli kurulum kapasitesini belirlemek için kapsamlı bir planlama modeli sunulmuştur. Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK'ler) aralıklı güç üretimi, uygun olasılık dağılım fonksiyonları ile nitelendirilir ve planlama modeline dâhil edilir. Planlama yaklaşımı, dağıtım sistemlerindeki çeşitli refah alanlarını göz önünde bulundurur; kâr marjının arttırılması, karbon dioksit emisyonunun azaltılması, dağıtım

güç kayıplarının en aza indirilmesi, gerilim kararlılık seviyesinin artırılması ve güç akışını göz önünde bulundurarak şebeke güvenliğinin iyileştirilmesi, gerilim limiti, hat kapasitesi, YEK penetrasyonu, kondansatör penetrasyonu ve dağıtım ekonomi kısıtlaması gibi konular planlamaya dâhil edilir (Kayal ve Chanda, 2016).

H. Kobayashi ve H. Hatta, karbondioksit emisyonunu azaltmak için fotovoltaik sistemler gibi dağıtılmış enerji üretiminin (DÜ) penetrasyonu artmakta olduğunu dile getirmiştir. Büyük penetrasyon, ters güç akışı nedeniyle şebeke dağıtım hattında aşırı gerilim yükselmesine yol açabilir. DÜ genellikle Japon şebeke ara bağlantı kurallarına göre gerilim artışı sınırlamak için aktif çıkış gücünü azaltır. Bunun sonucunda geniş penetrasyonda büyük enerji kayıpları meydana gelebilir. DÜ'nün reaktif güç kontrol yöntemi, aktif güç azaltımını sınırlamaya yönelik bir önlemdir. Ancak dağıtım hattı geriliminin izlenmesi yoluyla DÜ'nün geleneksel yerel otonom kontrolü ile yeterli reaktif güç elde edilemeyebilir, çünkü gerilim genellikle konuma göre farklılık gösterir. Bu çalışmada aktif gücün azalmasını önlemek için DÜ'ler arasında uygun bir reaktif güç paylaşım yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemin kullanılabilirliği ve etkisi gösteri testi ve simülasyon analizleri ile doğrulanmıştır (Kobayashi ve Hatta, 2011).

H. Köroğlu ve arkadaşları tarafından, elektrik dağıtım şebekesindeki yan hizmetler ile ilgili literatür gözden geçirilmektedir. Çalışmalarında elektrik dağıtım sistem operatörlerinin yeni rolleri için bir öneri listesi sunarak yan hizmetlerin mevcut durumunu açıklamaktadır (Köroğlu ve ark., 2022).

G. C. Kryonidis ve arkadaşları, yayınladıkları makalede dağıtık yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek penetrasyonuna sahip dengesiz düşük gerilim dağıtım şebekelerinin gerilim regülasyonu için yeni bir kontrol stratejisi önermektedir. Önerilen yöntem, gerilim regülasyonu için birincil araç olarak dağıtık yenilenebilir enerji kaynakların mevcut reaktif gücünü kullanır. Ayrıca, ayırt edici özelliği, şebeke gerilimlerini izin verilen sınırlar içinde tutmak ve şebeke kayıplarını en aza indirmek için dağıtık yenilenebilir enerji kaynakları tepkisini önceliklendiren dağıtık bir kontrol mimarisinin kullanılmasıdır. Önceliklendirme süreci, iki tür bilgiyi birleştiren her dağıtık yenilenebilir enerji kaynakları tarafından yerel olarak uygulanır: (a) reaktif güç değişimlerinin şebeke gerilimleri üzerindeki etkisini nicelleştiren duyarlılık matrisi ve (b) elektrik şebeke boyunca gerilim ölçümleri IEEE Avrupa alçak gerilim test besleyicisinde zaman alanı ve zaman serisi simülasyonları, önerilen yöntemin performansını mevcut merkezi olmayan, dağıtılmış ve merkezi, optimizasyona dayalı yöntemlere göre değerlendirmek için gerçekleştirilir (Kryonidis ve ark., 2020).

D. Kumar ve arkadaşları, elektrik enerjisi depolama sistemi (ESS), frekans düzenlemesine ve şebeke stabilitesine yardımcı olarak şebekeye yardımcı destek olarak dünya çapında kullanılmakta olduğuna değinmişlerdir. Aralıklı yenilenebilir enerji kaynakları (YEK'ler), farklı enerji depolama türlerini kullanarak güç dengesini koruyarak şebekeye etkili bir şekilde entegre edilebilir. Ancak yük talebindeki küçük, sık ve büyük kalıcı güç değişimleri sırasındaki güç ihtiyacı, farklı enerji depolarının çalışma özelliklerine göre birleştirilmesiyle daha etkin bir şekilde kontrol edilebilir. Bu makale, şebekeye bağlı mikro şebeke sistemine entegre edilmiş çift enerji depolama sisteminin şebekesine yan hizmetler sağlamak için uygunluğunu değerlendirmektedir (Kumar ve ark., 2022).

G. Lalor ve arkadaşları, rüzgâr türbinlerinin artması ile birlikte artan üretimin, güç sistemlerinin frekans kontrolü üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine acil ihtiyaç duyulduğunu vurgulamıştır. Güç sistemlerine dengeli olan konvansiyonel üretim santralleri bağlı iken, rüzgâr türbini gibi dengeli üretim olmayan kaynaklar bağlanmıştır. Rüzgâr türbini teknolojisinden bağımsız olarak, geleneksel üretimin rüzgârla değiştirilmesi, sistem frekansındaki değişim oranlarının artmasına neden olacaktır. Üretim kaybının ardından frekans değişikliğinin büyüklüğü de artabilir. Rüzgâr kaynaklı üretimin entegrasyonu artışı için rezerv politikalarının değiştirilmesi veya rüzgâr türbini atalet tepki özelliklerinin değiştirilmesi gerekli olabilir (Lalor ve ark., 2005).

A.J. Lamadrid ve T. Mount, yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) son on yılda gözlemlenen yükseliş eğilimini sürdürmesi muhtemel olduğunu aktarmıştır. Dağıtık üretimden, Bağımsız Sistem Operatörlerinin (ISO'lar), Bölgesel İletim Operatörlerinin (RTO'lar), Yük Hizmet Kuruluşlarının (LSE'ler) ve tüketicilerin sistemdeki koşullara dinamik olarak yanıt verdiği ve RES ile bağlantılı belirsizliğin hafifletilmesine yardımcı olduğu bir ortama geçiş için uygulanan farklı politikaların sosyal faydalarını ve maliyetlerini değerlendirmek için uygun araçlar gerekmektedir. Bu makale, yukarıda belirtilen etkileri bir mühendislik ve ekonomik optimizasyon modeli kullanarak değerlendirmek için bir çerçeve sunmaktadır. Önerilen çerçeve, tipik bir günü simüle eden bir test ağı üzerindeki operasyonlarla stilize edilmiş bir vaka çalışmasına uygulanmıştır. Sonuçlar, kontrol edilebilir talebin tıkanıklığı hafifleterek ve rüzgâr değişkenliğini azaltarak üç kriterin tamamını iyileştirdiğini (azalttığını) göstermektedir (Lamadrid ve Mount, 2012).

A.S. Leone ve arkadaşları, yayınlamış oldukları makalede, işletim parametrelerini tanımlamak ve sağlanan gücün kalitesini korumak için bir kontrol cihazı tasarlamak amacıyla, dağıtılmış üretimle bağlanan üç fazlı 75 kVA mikro şebekenin çalışmasını sunmaktadır. Bu sayede gün içindeki yük koşullarınız, gerilim profili ve reaktif güç akışı gözlemlenerek kritik noktalar tanımlanır ve değerlendirilir. Yakın mesafede birbirine bağlanan birden fazla mikro şebekenin etkilerine ilişkin bir çalışma da geliştirildi. Mikro şebeke, vektör kontrollü üç fazlı bir invertöre bağlı 50 kVA'lık bir fotovoltaik kaynak bulunmaktadır. Sonuçlar, Matlab yazılımının Simulink aracı kullanılarak simülasyon yoluyla elde edilecektir. Gerilim düşmesi, aşırı yük ve reaktif güç akışı gibi işletmedeki olası sorunlar analiz edilir (Leone ve ark. 2018).

E. L. Miguelez ve ark., yan hizmetler, bir güç sisteminin güvenliği ve güvenilirliği ile ilgili olan, enerji üretiminden ayrılan ürünler kümesi olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada yan hizmetler aktif güç yan hizmetleri (yük, frekans kontrolü, primer kontrol, otomatik üretim kontrolü, tersiyer kontrol, dengeleme hizmeti ve oturan sistemin toparlanması) ve reaktif güç yan hizmetler (gerilim kontrolü) olarak ikiye ayırmıştır. Sistem operatörü, güç sisteminin güvenli bir şekilde işletilmesinden sorumlu olan kuruluştur ve bu şekilde tüm YH'lerin yönetimi, sistem operatörünün özel bir işlevi olarak kabul edilir. İspanyol elektrik işindeki acenteler ve sistem operatörleri tarafından kullanılan farklı optimizasyon algoritmaları ve araçlarının kapsamlı bir incelemesi sunulmaktadır (Miguelez ve ark., 2007).

N. K. Roy ve arkadaşları bu makalede, dağıtık rüzgâr üretimi ile dağıtım şebekelerinin dinamik gerilim kararlılığını artırmak için reaktif güç marjına dayalı statik ve dinamik VAR planlaması önermektedir. İlk olarak, yüksek rüzgâr penetrasyonunun sistemin statik gerilim kararlılığı üzerindeki etkisi analiz edilmekte ve daha sonra, doğru bir zaman alanı analizi ile bileşik yüklerin sistem dinamiği üzerindeki etkisi sunulmaktadır. Şebekenin gerilim çökmesine karşı savunmasızlığını ölçmek için yeni bir indeks olan reaktif güç yüklenebilirliği (Q-yüklenebilirlik) kullanılır. Kompanzasyon yerleşimi, sistem gerilimi kararlılık sınırını artırmak için Q-yüklenebilirliği kullanılarak yerleştirilir. Son olarak, farklı rüzgâr penetrasyon seviyeleri için ani bir kesintiden sonra sistemin gerilim kararlılığını sağlamak için statik ve dinamik analizler yoluyla şönt kapasitör bankası ve dağıtık statik kompansatöründen (D-STATCOM) uygun maliyetli bir kombinasyon belirlenir. Bu çalışma, geçici gerilim geri kazanım olgusunu etkileyen asenkron motor dinamik özelliklerini dikkate almaktadır. Sonuçlar, önerilen yaklaşımın gerekli kompanzasyon cihazı boyutlarını azaltabileceğini ve bunun da maliyetleri

düşürebileceğini göstermektedir. Ayrıca güç kayıplarını azaltır ve sistemin gerilim regülasyonunu iyileştirmektedir (Roy ve ark., 2013).

E. Sortomme ve M.A. El-Sharkawi, elektrikli bir araçtan (EV) şebekeye enerji ve yan hizmetlerin sağlanması olan araçtan şebekeye (V2G), EV sahiplerine finansal faydalar ve kamu hizmetlerine sistem faydaları sunma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada enerji ve yan hizmet planlamasını optimize etmek için bir V2G algoritması geliştirilmiştir (Sortomme ve El-Sharkawi, 2012).

S. Sreekumar ve arkadaşları, yayınladıkları makalede yenilenebilir kaynakların artan nüfuzu ile güç sisteminde artan değişkenlik ve ortaya çıkan belirsizlik, çeşitli operasyonel kaygıları ele almak için güç akışı stabilitesi çalışmalarına, analizlerine ve beklenmedik durum yanıtlarına olan ihtiyacı gerektirmekte olduğunu aktarmıştır. Son şebeke entegrasyon standartlarında, gerilim ihlallerini azaltmak için invertörlerin Volt-VAr (VV) fonksiyonlarının kullanılması gündeme gelmiştir. Şebekeye bağlı tüm yeni senkronize olmayan jeneratörlerin, sürekli nominal çıkış gücünde güç dağıtımını sağlamaları ve güç faktörünü kabul edilebilir bir aralıkta tutarken dinamik reaktif güç kompanzasyonuna katılmaları beklenmektedir. Mevcut vaka çalışması, aynı zamanda dünya çapındaki güç sistemi kesintilerinin temel nedenlerinden biri olarak tanımlanan, elektrik şebekesinde kısmi kesintiye yol açan bir gerilim dengesizliği olayına dayanmaktadır. Elektrik şebekesi vaka çalışması, tüm 400 ve 220 kV şebekeler için PMU'lar/SCADA sisteminden toplanan gerçek zamanlı elektrik şebekesi verileri kullanılarak simüle edilmiştir. Güneş PV yenilenebilir enerjisinin elektrik şebekesine entegre edilmesinin yeri, analitik bir metodoloji kullanılarak, iyileştirilmiş güç stabilite endeksi olarak temsil edilen bir değerlendirme endeksinin türetilmesiyle belirlenir. Konvansiyonel şebekede meydana gelen gerilim dengesizliği sorununu çözmeye yönelik bir çözüm olarak, invertör bazlı şebekeye bağlı güneş fotovoltaik sisteminin Volt-VAr işlevselliğini kullanmaya yönelik bir yaklaşım detaylandırılmıştır (Sreekumar ve ark., 2020).

B.E. Tankut, dağıtım şebekelerinin geleneksel kontrolü genellikle insan tarafından kontrol edilir, bu da yavaş tepki süresi gibi birçok sınırlamaya sahip olduğunu aktarmıştır. Bu noktada gerçek zamanlı bir kontrolör kullanmak önemlidir. Bu yüksek lisans tez araştırmasında, hâlihazırda mevcut olan altyapılar (yük altında kademe değiştirici trafolar ve statik VAr kompanzator'ler gibi), reaktif güç yoluyla gerilim regülasyonuna katkıda bulunmak için PV kaynakları ile birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen çözüm, bazı cihaz arızalarını ortadan kaldırarak bütçeden tasarruf sağlayacak ve hem tüketici hem de

dağıtım şebekesi operatörü için yeniden kullanılabilirliği artırması öngörülmüştür. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için 8 baralı bir dağıtım sistemi üzerinde bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, gerilim ve reaktif güç sorununun zamanında ve ekonomik bir şekilde nasıl çözülebileceğini göstermiştir. Bu yüksek lisans tezinde küçük ölçekli bir mikro şebeke simüle edilmiş ve sonuçlar dağıtım şebekelerinin karşılaştırılmasına yardımcı olmuştur (Tankut, 2019).

M.Ş. İ. Tarek ve arkadaşları, yayınlamış oldukları makalede günümüzde çok seviyeli invertörler, düşük maliyetleri ve yüksek verimlilikleri nedeniyle şebekeye bağlı fotovoltaiik (PV) sistemler için daha popüler olduğuna değinmişlerdir. Toplam harmonik distorsiyonu (THD) ve elektromanyetik paraziti etkili bir şekilde azaltarak daha düşük kaçak akım sağlarlar. Geleneksel çok seviyeli invertörler yalnızca kaliteli çıkış gücü sağlayamayan gerçek gücü enjekte edebilir. Yeni bir uluslararası standart olan VDE-AR-N4105, 3,6SkVA'nın altındaki güç değerine sahip şebekeye bağlı bir invertör için, 0,95 gecikmeye yol açan 0,95'lik bir güç faktörü elde edilmesi gerektiğini belirtir (Tarek ve ark., 2018).

M. Tekin doktora tez çalışmasında; şebeke bağlı bir güneş enerji santrali invertör kullanılarak şebekede oluşan reaktif güçlerin kompanse edilmesi çalışması yapılmıştır. Bu çalışma için; Matlab/Simulink ortamında analiz çalışması yapılmıştır. Sistemin kontrolünde Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)-PI tipi kontrolcü kullanılarak akım kontrolü yapılmıştır. Tasarlanan analiz çalışması ile aktif ve reaktif güçlerin istenen değerlerde üretilmesi sağlanmış ve simülasyon çalışmaları deneysel çalışmalarla desteklenmiştir (Tekin, 2019).

Z. Tong ve arkadaşları yenilenebilir enerji kaynaklarının ve elektrikli araçların akıllı evlerle modern şehirlere bağlantısının artırılması, belirsiz davranışlar nedeniyle bunları iletim ve dağıtım şebekelerinin işleyişiyle koordine edecek yeni mekanizmalara olan ihtiyacı kaçınılmaz kılmakta olduğunu aktarmıştır. Yukarıda belirtilen kaynakların kullanımı, operatörler için çeşitli teknik ve ekonomik zorluklar yaratabilmektedir. Bu nedenle, bu makale, rüzgâr ve güneş yenilenebilir kaynakları, akıllı evler ve elektrikli araçlar dikkate alınarak, enerji ve yan hizmetler piyasalarının koordineli iletim ve dağıtım şebekesinde ortak yönetimi için üç aşamalı bir mekanizma tanıtmaktadır. Bu mekanizmanın ilk aşamasında akıllı evler regülasyon piyasasına katılma imkânı ile günlük planlamalarını yapıp dağıtım şebekesi operatörüne göndermektedir. İkinci aşamada dağıtım şebekesi operatörü, akıllı evlerden aldığı programlara göre enerji ve yan hizmetler piyasalarına katılım stratejisini belirleyerek iletim şebekesi operatörüne

gönderir. Son olarak üçüncü aşamada iletim şebekesi operatörü, dağıtım şebekesi operatörlerinden aldığı planlara göre piyasaları düzenler (Tong ve ark., 2023).

D. T. Vietnam ve P. C. Tien, günümüzde güneş ve rüzgâr enerjisi üretimi dünyanın birçok ülkesinde enerji kaynaklarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Ancak, bu kaynakların değişkenliği ve belirsizliği nedeniyle, geniş güneş ve rüzgâr enerjisi penetrasyonuna sahip güç sisteminin istikrarlı çalışması, sistem operatörleri için büyük bir zorluktur. Enerji piyasasında güneş ve rüzgâr enerjisinin katkı verimliliğini artırmak için güçlü bir yan hizmet sistemi esastır ve makul fiyatlı olmalıdır. Bu yazıda ele alınan yan hizmetler için kaynak rezervi ve kaynak dışı rezervdir. Ayrıca, enerji piyasasına güneş ve rüzgâr enerjisinin girmesiyle ve girmemesiyle enerji ve yan hizmetlere ilişkin üretim maliyetlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması için bir model önerilmiştir. Sonuç olarak bu model geliştirilmiş ve bir örnek olay çalışmasıyla doğrulanmıştır. Sonuçlar, güneş ve rüzgâr enerjisinin büyük oranda entegre olduğu bir güç sisteminde, enerji sistemi için enerji ve yan hizmet üretim maliyetlerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Ayrıca, güneş ve rüzgâr enerjisinin garantili tarifeleri geleneksel elektrik üretimine göre daha pahalıdır, bu da elektrik piyasasında yüksek yerel marjinal fiyatlara yol açmaktadır (Vietnam ve Tien, 2018).

Y. Wang, modern elektrik dağıtım şebekelerinde fotovoltaik (PV) penetrasyonu seviyesi artmaya devam ettiğini ve bu da çeşitli ciddi gerilim limiti ihlal sorunlarına yol açmaktadır. Bu makale, tamamen dağıtık iki seviyeli bir Volt/VAR kontrol (VVC) şemasıyla gerilim regülasyonu için PV invertörlerini bir araya getirmeyi ve kullanmayı amaçlamaktadır. Daha düşük seviyeli VVC'de (gerçek zamanlı ölçek), çatı tipi PV invertörler, konsensüs algoritmaları aracılığıyla toplanmakta ve daha sonra orta gerilim şebekelerinde düşüş kontrolörleri tarafından yönetilir (Wang, 2020).

B.B. Zad ve arkadaşları, yayınlamış oldukları makalede sistem gerilimlerini önceden tanımlanmış sınırlar içinde tutmak için orta gerilim (OG) dağıtım sistemlerinde dağıtık üretim (DÜ) ünitelerinin reaktif güç kontrolü problemini ele almaktadır. DÜ'lerin mevcut reaktif güç kapasiteleri dikkate alınarak ihlal edilen baraların gerilimini izin verilen limitler içerisine döndürürken DÜ ünitelerinin reaktif güç değişimlerini en aza indirmeyi amaçlayan bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. Burada sistem gerilimlerini değerlendirmek için yeni bir yük akış algoritması kullanılmıştır. Bu yük akışı algoritması basit bir teoriye sahip olup şebekenin topolojik yapısını kullanır. Ayrıca bu bildiride, şebekenin topolojik yapısını da temel alan ve şebeke çalışma noktalarından bağımsız yeni bir gerilim duyarlılığı analiz yöntemi sunulmaktadır. Bu nedenle gerilim

duyarlılığı matrisi yük akış programıyla eş zamanlı olarak oluşturulur. Simülasyon sonuçları, önerilen algoritmanın sistem gerilimlerini ve akımlarını izin verilen sınırlar içinde tutabildiğini ortaya koymaktadır (Zad ve ark., 2014).

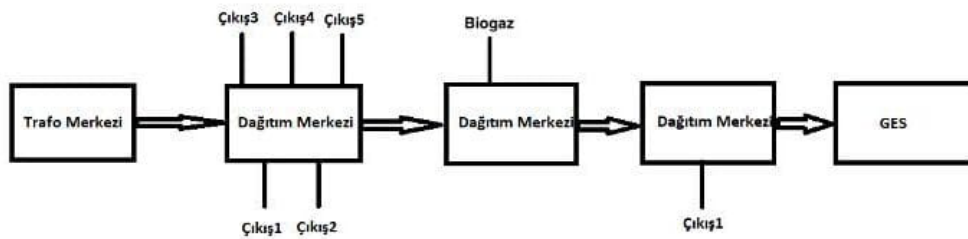
W. Zhong ve arkadaşları yayınlamış oldukları makalede, dönüştürücü tabanlı Dağıtılmış Enerji Kaynaklarının otomatik düzenleyicileri aracılığıyla güç sistemlerinin dinamik tepkisini iyileştirmek için bir kontrol şeması önermektedir. Bu şemada, frekans ve gerilim kontrolörlerinin ayrıldığı mevcut uygulamanın aksine, DEK'lerin hem aktif hem de reaktif güç kontrolü hem frekansı hem de gerilimi düzenleyecek şekilde değiştirilir. Önerilen kontrolü mevcut teknolojiye göre değerlendirmek için makale aynı zamanda şebekenin herhangi bir veri yolundaki frekans/gerilim yanıtının birleşik etkisini yakalayan bir ölçüm de tanımlar. Sonuçlar, önerilen kontrol stratejisinin genel güç sisteminin kararlılığı ve performansında önemli bir iyileşmeye yol açtığını göstermektedir. Bu sonuçlar, senkron makinelerin bir kısmının dönüştürücü ara yüzü DEK'ler ile değiştirildiği, IEEE 39 veri yolu kıyaslama sisteminin değiştirilmiş bir versiyonu kullanılarak gerçekleştirilen kapsamlı bir vaka çalışmasına dayanmaktadır. Yük modellerinin önerilen kontrolü üzerindeki etkisi, DEK'in şebekeye nüfuz etme düzeyi uygun şekilde değerlendirilir ve sonuçlar usulüne uygun olarak çıkarılır (Zhong ve ark., 2022).

M. Zipf ve D. Möst, günümüzde tıkanıklık yönetimi gibi yan hizmetler temel olarak iletim şebekesinde bulunan büyük enerji santralleri tarafından sağlandığını, Almanya'daki enerji dönüşümü nedeniyle üretim kapasiteleri iletimden dağıtım seviyesine kayacağını belirtmiştir. Dolayısıyla gelecekte özellikle yan hizmetlerin sağlanması konusunda iletim ve dağıtım sistemi operatörlerinin rolünün değişeceğinden bahsetmiştir. Bu nedenle dağıtım sistemi operatörlerinin iletim sistemindeki sistem istikrarına ne ölçüde aktif olarak katkıda bulunabilecekleri ve toplam sistem sorumluluğunun dağıtım sistemi operatörleri tarafından nasıl üstlenilmesi gerektiğinin belirlenmesinin öneminden bahsetmiştir (Zipf ve Möst, 2016).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bir dağıtım şebekesi iletim operatörüne bağlı trafo merkezinden enerji alır. Bu trafo merkezinde bulunan trafolardan çıkan 31,5 kV gerilim seviyesinde fiderler dağıtım şirketine ait dağıtım merkezi giriş hücrelerine girmektedir. Dağıtım merkezinden çıkan fiderler ya başka bir dağıtım merkezine ya da son kullanıcıya iletmek üzere bir trafoya gider. Bu trafoda da 31,5 kV gerilim seviyesinden 400 V gerilim seviyesine dönüştürülerek elektrik tüketicilerine iletilir.

Çalışmamızda seçtiğimiz pilot bölge için trafo merkezinden çıkan fidere ait tek hat şeması Şekil 7’de görünmektedir. Bu fider toplamda 15 kilometrelik bir iletkenin mesafesi sonrası GES binasına ulaşmaktadır.



Şekil 7. Destek alınan GES'e ait tek Hat şeması

3.1. Güneş Enerji Santrali, İnvörtörler, SCADA Sistemi

Tipik bir PV enerji santrali çok sayıda üretim ünitesi içerir ve her ünite, yerel Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) kontrolü için bir DC/DC dönüştürücü ve şebeke bağlantıları için bir DC/AC invertör içermektedir. Tüm üretim üniteleri alçak gerilim güç kabloları aracılığıyla Ortak Bağlantı Noktası'na (PCC) bağlanır ve daha sonra yükseltici trafo aracılığıyla yüksek gerilim dağıtım veya iletim şebekesini besler. Alçak gerilim kablolarındaki güç kaybını en aza indirmek için, alçak gerilim kablolarının uzunluğunu en aza indirmek amacıyla üretim üniteleri trafo etrafına eşit olarak dağıtılmaktadır (Yang ve ark., 2019).

PV santrallerden maksimum fayda sağlamanın bir yolu, invertör tarafından gerçekleştirilen fonksiyonları arttırmaktır. İnvörtörün birincil görevi olan dönüştürmenin yanı sıra hem reaktif hem de gerçek güç kontrolünü içeren birden fazla işlevi yerine getirmektedir. İnvörtör, yüklerden üretilen talebi karşılamak üzere reaktif güç üretmek için statik kompensatör (STATCOM) cihazı olarak çalışır ve şebekeye aktif güç verir. Yenilenebilir bir kaynak mevcut olmadığında ise invertör yalnızca reaktif güç (VAR)

kompanstatörü olarak görev yapar ve güç faktöründe iyileşme sağlar (Banuelos ve ark., 2023).

Reaktif güç desteği alınacak santralde 6 adet 1 MWp gücünde santral bulunmaktadır ve toplamda 6 MWp kurulu gücü vardır. Bu her bir santralde 335 Wp gücünde 3572 adet güneş enerji paneli bulunmaktadır. Her bir santralde ABB firmasına PVS800 model 1 MWp gücünde merkezi tip invertör bulunmaktadır ve reaktif destek almaya uygun invertörlerdir. Meram bölgesindeki saha tipi GES'ler incelendiği zaman tipik kurulu gücü 1 MWp olan GES'lerde 1.250 kVA transformatör ve toplam gücü 1 MWp olan invertörler kullanılmaktadır. GES'ler tam yükte üretim yaparken; $\pm 0,8$ güç faktörü ile reaktif güç kontrolü alınması için transformatör gücü yeterli olmasına rağmen invertör güçleri ise yetersiz kalabilmektedir. Bu tip GES'lerden tam yükte üretim yapmadıkları durumlarda reaktif güç desteği yan hizmeti alınabilecektir.

GES bağlı olduğu fider üzerinden reaktif desteği alabilmek için operatör tarafından, SCADA sistemine gelen TEİAŞ fider çıkışlarındaki reaktif güç ölçümleri saatlik ortalaması değerlendirilerek SCADA sisteminden ilgili fiderlere bağlı GES RTU'ları (Remote Terminal Unit) üzerinden invertör kontrolcüsüne reaktif güç set değeri komutu gönderilir. Reaktif güç set değerine göre her bir invertör durgun durum (steady-state) anma değerlerini aşmadan, gerekirse nominal akımın %100'üne varacak seviyelerde, endüktif veya kapasitif yönde maksimum reaktif akım desteği sağlar.

GES'ten reaktif güç desteği hizmeti, merkezi operatör tarafından kontrollü bir şekilde alınması ve uygulaması sırasında, aşağıda belirtilen sinyallere ait kayıtlar alınmaktadır:

- İletim şirketi trafo merkezindeki OG çıkış noktası reaktif güç akışı saatlik ortalaması (MVar),
- GES sahasındaki RTU üzerinden kontrolcüye merkezden operatörün uyguladığı reaktif güç set değeri (MVar),
- Reaktif güç set değerinin algılanması ve uygulanması gecikme süresi (sn)
- İlgili GES bağlantı noktasında ölçülen reaktif güç (MVar)
- İlgili GES bağlantı noktasında ölçülen gerilim (kV)
- İlgili fider uç noktasında ölçülen gerilim (kV)
- İnverter kontrolcü açık / kapalı sinyali

GES'lerden reaktif destek almak için, şebekedeki aktif ve reaktif güç akışının etkin bir şekilde izlenebilmesi ve haberleşme altyapısının oluşturulması gerekmektedir. Haberleşme alt yapısının kesintisiz ve kaliteli olması dağıtık enerji kaynaklarının daha esnek işletilmesine olanak sağlayacaktır. Meram Elektrik Dağıtım Şirketi bölgesindeki saha tipi GES'lerden RTU kurulumları gerçekleştirilmiş durumdadır. Sahaya kurulan RTU'ların Meram Elektrik Dağıtım Şirketi'nin SCADA kontrol merkezine bağlanmasıyla etkin bir izleme yapılabilmektedir. Çalışma kapsamında GES invertörleri bağlı bulunduğu fider üzerindeki trafo merkezindeki reaktif güç ihtiyacına göre SCADA sisteminden manuel olarak kontrol edilmiştir.

3.2. Analiz Programı

Bu çalışma kapsamında güç sistemleri analiz programı olan DigSilent programı kullanılmıştır. Analiz programı kullanılarak trafo merkezi sayaç verileri kullanılarak dağıtım şirketi fideri üzerinde yük koşturulmuştur ve programın sonuçlarının yaklaşım oranı tespit edilmiştir. Trafo merkezi sayaç verileri ve güç sistemi analiz programına göre reaktif güç desteği ihtiyaç olan trafo merkezi tespit edilmiştir. Bu trafo merkezi üzerinde bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının etkisi ve bu kaynaklardan alınacak reaktif güç desteği analiz çalışmaları deneysel çalışma başlığı altında bulunmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Çalışma Sahası Seçimi

Bu çalışmanın temel amacı dağıtık üretim santrallerinden reaktif güç alımı gerçekleştirilerek reaktif güç kompanzasyon yatırımı yapmadan şebekenin ihtiyacı olan sistem dengesini kurmaktır. Bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için öncelikle Meram bölgesinde yerel dağıtık üretim tesisi olan ve reaktif güç kompanzasyon problemi bulunan bir trafo merkezi araştırılmıştır.

“Elektrik Şebeke Yönetmeliği ”nde Madde 14’e göre aylık olarak sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı %20’yi, aylık olarak sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise %15’i geçemez ifadesi bulunmaktadır (Tarek ve ark; 2018). Meram Elektrik Dağıtım Şirketi’nin enerji aldığı trafo merkezleri içerisinde, mevzuatında bulunan reaktif güç sınır değerler içerisinde kalmadığı tespit edilen bir trafo merkezi seçilmiştir. Bu trafo merkezinde 2 adet 100 MVA trafo bulunmaktadır ve dönemsel tüketimin yoğun olduğu bir bölgedir ve dağıtık üretim kaynakları yaygındır. Bu trafo merkezinde bulunan bir trafoya sonradan 10 MW Kurulu gücü olan bir biyogaz üretim tesisi eklenmiştir. Bu üretim tesisi dağıtım şebekesinden trafo merkezine bağlanması ile sistem reaktif güç akışı bozulmuş ve reaktif güç kompanzasyon ihtiyacı doğmuştur.

4.2. Sistem Simülasyonları

Seçtiğimiz trafoya ait fiderlerin üç durum için sistem simülasyonları DigSilent güç sistemleri analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. İlk iki simülasyonda sistemin biyogaz üretim tesisi eklemeyen önce ve sonraki reaktif güç ihtiyaçları analiz edilirken üçüncü simülasyonda biyogaz üretim tesisi bağlandıktan sonra ne kadarlık bir reaktör ihtiyacı olması gerektiği analiz edilmiştir. İlk simülasyonda biyogaz üretim tesisi bağlanmadan önceki mevcut reaktif güç simülasyonları gerçekleştirilerek sistemin reaktif ihtiyacı olup olmadığı ve Meram Elektrik Dağıtım Şirketi taleplerini karşılayıp karşılamadığı, ikinci simülasyonda biyogaz üretim tesisi bağlandıktan sonraki reaktif güç simülasyonları gerçekleştirilerek oluşan yeni durumdaki reaktif güç talepleri incelenmiştir. Üçüncü simülasyon biyogaz üretim tesisi bağlandıktan sonra ihtiyaç duyulan reaktör gücünü bulabilmek için 8760 saatlik yük verileri kullanılarak tespit edilmiştir.

4.2.1. Reaktif Güç Analizi

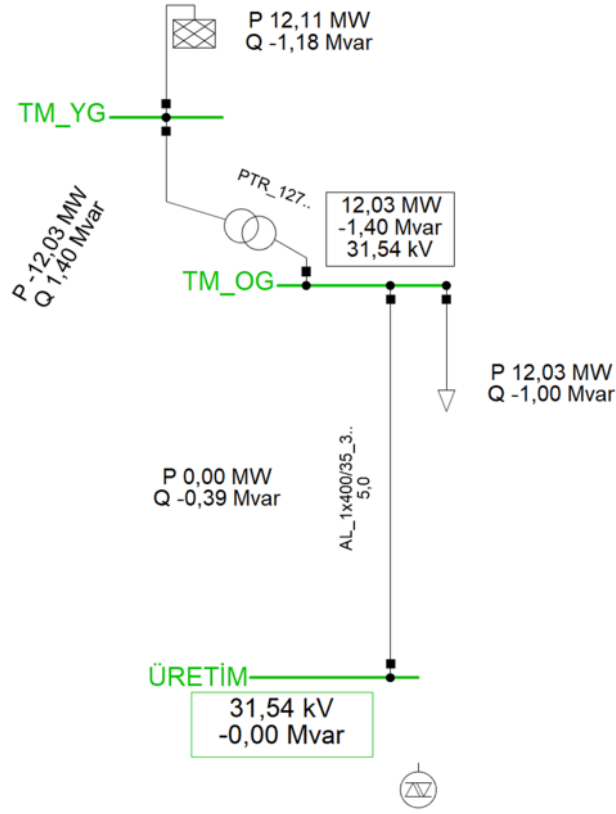
AG ve OG seviyesinden dağıtım şebekesine bağlı dağıtık üretim kaynakları sadece aktif güç ürettikleri için iletim seviyesinden çekilen aktif enerji miktarının azalmasına neden olmaktadır. Çekilen reaktif enerji miktarı ise sabit kalmaktadır. Özellikle DEK yaygınlık oranının yüksek olduğu trafo merkezi bölgelerinde dağıtım şirketleri reaktif enerji aşımı durumları ile karşı karşıya kalmaktadır. Ayrıca, tüketimin az, üretimin fazla olduğu durumlarda aşırı gerilimler, tüketimin çok üretimin az olduğu durumlarda ise gerilim düşümleri oluşmaktadır. Dağıtım şirketleri, şebeke gerilimindeki düşüş yönündeki (<1 pu) değişimleri kompanzasyon yatırımları ile çözmektedir. Şebeke geriliminin artış yönündeki (>1 pu) değişimlerine ise müdahale edememektedir.

Bu kapsamda Meram bölgesinde bulunan yukarıda belirlediğimiz iletim trafosuna bağlı üretim santralinde pilot uygulama çalışmaları yapılmıştır. Bu trafoya ait yük profili verilerine göre güç sistemleri analiz programı kullanılarak yük koşturulmuştur (Şekil 8). Üretim santrali devrede değilken iletim trafosu yük profili verilerinde gördüğümüz reaktif güç oranı ile güç sistemleri analiz programı sonucu karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonucunda iletim trafosunda aktif çekilen güç 12,03 MWp iken kapasitif reaktif güç 1,4 MVar görünmektedir.

İletim trafosuna ait reaktif güç oranı (2)'ye göre hesaplandığında %11 oranında kapasitif reaktif görünmektedir. Yönetmeliğe göre %15 olan sınır aralığından düşük bir değere sahip olduğu için ilave bir kompanzasyon yatırımına ihtiyacı olmadığı görülmektedir.

$$\text{Reaktif Güç Oranı} = \text{tg}\delta = \frac{Q}{P} = \frac{1,4}{12,03} = 0,11 \quad (2)$$

Bölgede daha sonra inşaatı tamamlanan 10 MWp gücünde bir biyogaz üretim santrali devreye girmiştir. Üretim kapasitesi yüksek bir santral olduğu için zaman zaman ters güç akışlarına ve gerilim dalgalanmalarına neden olmaktadır (Farrivar ve ark., 2012). Bu biyogaz üretim santrali mevcut sisteme bağlanarak tekrar yük koşturulmuştur.



Şekil 8. İletim trafosuna ait üretim santrali devrede değilken analiz çalışması

Biyogaz üretim santrali devreye girdiğinde analiz sonuçlarına göre iletim trafosunda 2,09 MW aktif ve 1,33 MVAR kapasitif reaktif güç çekildiği anlaşılmaktadır (Şekil 9). Reaktif güç oranı (3)'e göre hesaplandığında üretim santrali devreye girince reaktif güç oranının %64 olduğu görülmektedir. Hesaplanan bu değer yönetmelik kapsamında sınır değer olan %15 değerinin üzerindedir.

$$\text{Reaktif Güç Oranı} = \text{tg}\delta = \frac{Q}{P} = \frac{1,33}{2,09} = 0,64 \quad (3)$$

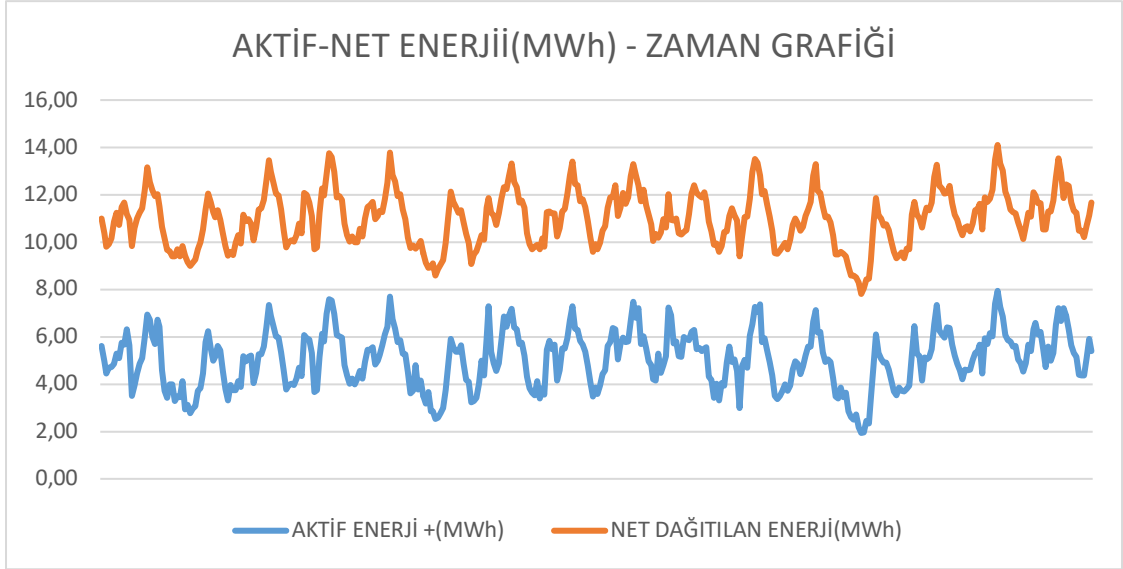
Seçtiğimiz iletim trafosuna bağlı 6 adet GES sahası bulunmaktadır. Bu GES sahası toplamda 6000 kWp'lik bir kurulu gücü olup her GES sahasındaki merkezi tip invertörlerin gücü 1000 kWp'dır ve her biri 1250 kVA gücünde trafolarla bağlıdır. Bu her bir invertörün haberleşmesi ve SCADA entegrasyonu sağlanmıştır. Şekil 11'de SCADA entegrasyonu tamamlanması sonrası oluşan SCADA ekran görüntüsü verilmiştir. Her bir invertör için reaktif güç set değerleri bu ekran üzerinden yapılmıştır.

GES DM INVERTERLER						
	INVERTER 1	INVERTER 2	INVERTER 3	INVERTER 4	INVERTER 5	INVERTER 6
Van	378.0 V	395.0 V	397.0 V	395.0 V	414.0 V	395.0 V
Vbn	376.0 V	394.0 V	396.0 V	394.0 V	412.0 V	394.0 V
Vcn	380.0 V	395.0 V	396.0 V	395.0 V	411.0 V	393.0 V
Ia	1208.0 A	1155.0 A	1073.0 A	1073.0 A	91.0 A	1139.0 A
Ib	1177.0 A	1151.0 A	1103.0 A	1103.0 A	85.0 A	1136.0 A
Ic	1196.0 A	1163.0 A	1065.0 A	1065.0 A	76.0 A	1127.0 A
F	50.03 Hz	49.93 Hz	49.96 Hz	49.98 Hz	49.98 Hz	49.97 Hz
P	786.1 kW	801.5 kW	740.0 kW	740.0 kW	32.4 kW	758.9 kW
Q	-1.9 kVAR	0.6 kVAR	1.1 kVAR	-0.5 kVAR	0.8 kVAR	-1.1 kVAR
S	0.0 kVA	0.0 kVA	0.0 kVA	0.0 kVA	0.0 kVA	0.0 kVA
	INV_1	INV_2	INV_3	INV_4	INV_5	INV_6
Vdc	0.0 V	0.0 V	0.0 V	0.0 V	0.0 V	0.0 V
Idc	1204.0 A	1235.0 A	1274.0 A	1270.0 A	57.0 A	1227.0 A
Pdc	795.0 kW	822.0 kW	797.0 kW	737.0 kW	36.0 kW	802.0 kW
IGBT Sıcaklık	+71.0 C	+68.0 C	+63.0 C	+64.0 C	+32.0 C	+68.0 C
Jeneratör Ger.	644.0 V	683.0 V	637.0 V	598.0 V	677.0 V	676.0 V
REAKTİF GÜÇ SET	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR
FONKSİYON SET	2	2	2	2	2	2
GECE KOMUTU	2	2	2	2	2	2
REAKTİF GÜÇ SET DEĞER	2	2	2	2	2	2
FONKSİYON DURUM	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR	0 kVAR
GECE KOMUTU DURUM	1	1	1	1	1	1

Şekil 11. GES saha bilgileri

4.4. Pilot Uygulamanın Gerçekleştirilmesi

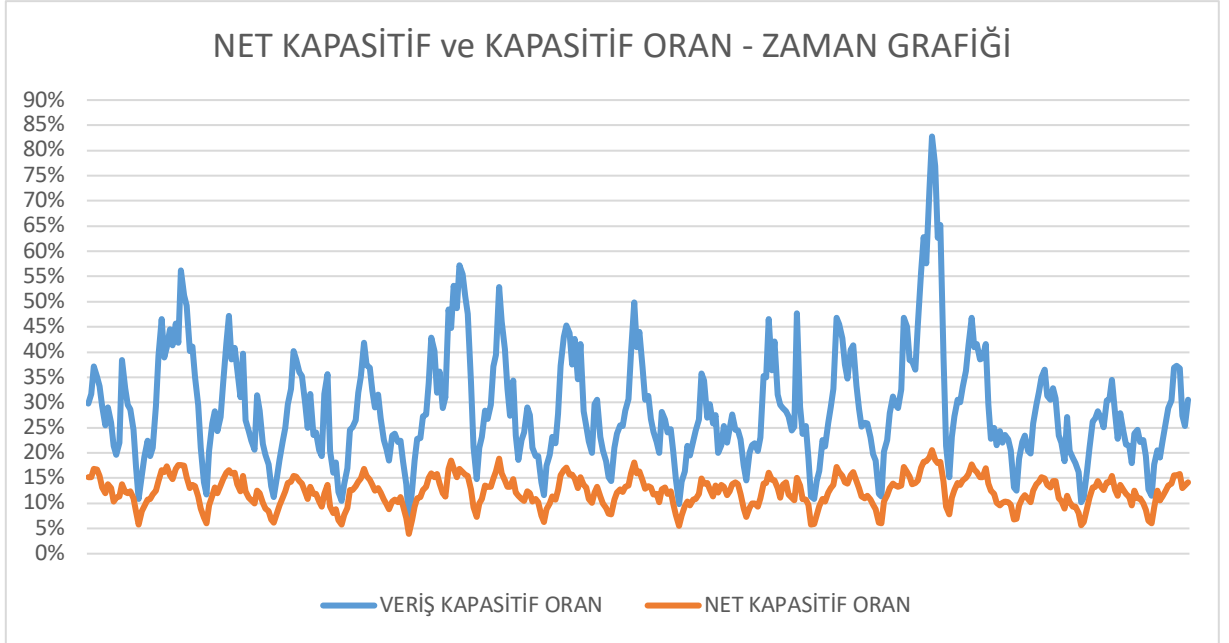
Pilot uygulamaya geçilmeden önce iletim trafosu normal çalışma durumunda iken iletim trafosuna ait yük profili ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler sonucunda iletim trafosunda 2023 yılı Kasım ayında 17 gün boyunca birer saat arayla alınmış akım gerilim değerleri ile hesaplanan aktif çekilen ve net dağılan enerji Şekil 12'de görülmektedir. Bu süre boyunca hesaplanan ortalama aktif çekilen enerji değeri 6 MWh iken bölgede net dağıtılan enerji 12 MWh olarak görülmektedir.



Şekil 12. TM aktif enerji ve net dağıtılan enerji

Şekil 13’te aynı zaman periyodu için kapasitif reaktif güç için hesaplanan kapasitif reaktif oranı görülmektedir. Net kapasitif reaktif oranı ortalama %10 değerlerinde iken bölgede üretim santralleri devreye girince iletim trafosundan çekilen kapasitif reaktif oranının %50 olduğu görülmektedir. Üretim santralleri devrede iken iletim trafosundan çekilen aktif enerji miktarı azaldığı için trafo kapasitif reaktif oranı artmıştır. Bu değer mevzuatta belirtilen %15 değerinin çok üzerindedir.

Pilot uygulama yapılacak iletim trafosu için Şekil 12 ve Şekil 13, üretim santralleri devreye girdiğinde reaktif bozulmalar olduğunu göstermiştir. Bu reaktif bozulmalar doğrultusunda uygun bir iletim trafosunda test yapacağımız kanıtlamış olduk.



Şekil 13. TM çekiş kapasitif oran ve net kapasitif oran

15.01.2024 saat 19.00 ile 16.01.2024 saat 09.00 arasında iletim trafosuna ait kapasitif reaktif tespit edilmiştir. 8760 saatlik zaman diliminde dönemsel yük değişimi yaz ve kış olarak değişkenlik göstermektedir. Bu iletim trafosunda yaz dönemi tarımsal sulama başladığında ve sulama dönemi bittiğinde kış dönemi trafo yüklenmesi değişkenlik göstermektedir. Trafo kış dönemi olan dönemde yük profili neredeyse her gün aynıdır ve sadece gece-gündüz zaman aralıklarında değişkenlik göstermektedir. Kış dönemi olan Eylül, Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat, Mart aylarında trafo yük profili değişimi olmadığı tespit edilmiştir.

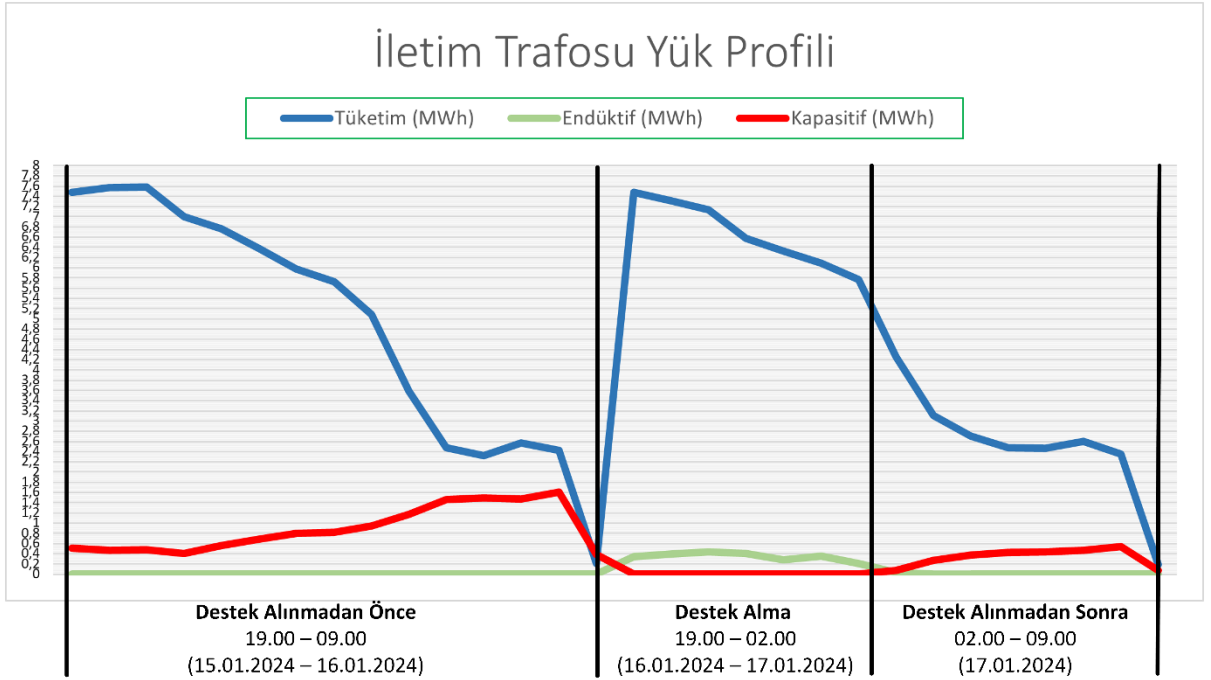
Pilot uygulama hazırlıkları tamamlandıktan sonra 16.01.2024 saat 19:00 ve 17.01.2024 saat 02:00 saatleri arasında pilot uygulama gerçekleştirilmiştir. Bir gün önce ve bir gün sonra aktif güç eğrisi aynı olan trafoda 15.01.2024 tarihi güneş battıktan sonra üretim olmadığı için üretim santrali iletkeni kaynaklı şebekede kapasitif reaktif arttığı gözlemlenmiştir. 16.01.2024 tarihi saat 19.00'da güneş battıktan sonra GES invertöründen reaktif güç desteği alınmaya başlanmıştır. 17.01.2024 tarihinde saat 02.00'da destek alma işlemi sonlanmıştır. Destek alma işlemi sonlandığı anda yük profilinde endüktif görünen değer birden kapasitif görülmüştür.

Pilot uygulamada GES sahasında bulunan 6 adet invertörün her birinden 400 kVAr olmak üzere toplamda sisteme 2.4 MVar endüktif reaktif destek sağlanmıştır.

Şekil 14'te iletim trafosuna ait ölçülen anlık güç değerleri görülmektedir. Şekil 14 incelendiğinde, yapılmış olan pilot çalışmadan bir gün önce akşam 19.00'dan sabah

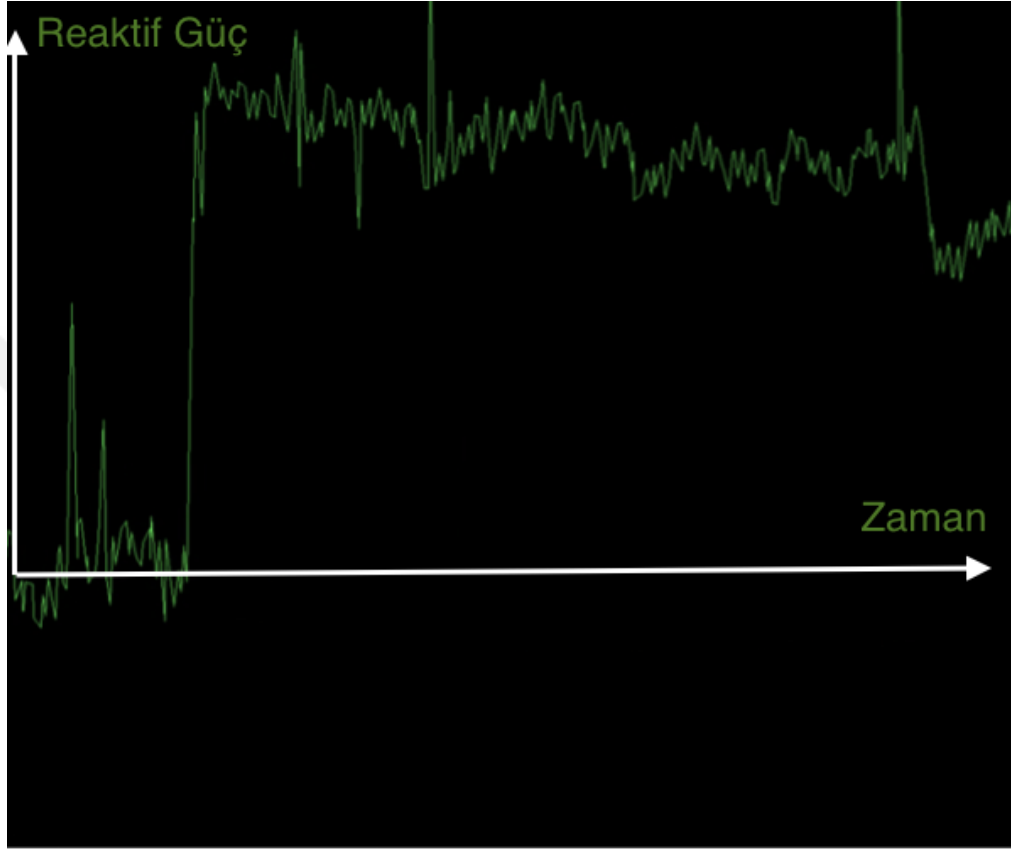
09.00'a kadar aktif güç 7,6 MW'dan 0,2 MW değerlerine düşmektedir. Aynı şekilde iletim trafosu verisinde kapasitif reaktif güç değeri 1,8 MVar değerlerine kadar çıkmaktadır. Yine aynı iletim trafosunda devam eden günün akşamı invertörlerden reaktif güç desteği aldığımız 19.00 ile 02.00 saatleri arasında aktif güç değeri 7.6 MW değerinden 4,8 MW değerlerine kadar inmektedir. Ancak reaktif güç desteği aldığımız için sistemden çekilen reaktif güç miktarı bir önceki günde olduğu gibi kapasitif yönde artmamakta aksine reaktif yönde bir miktar artmaktadır. Böylelikle bir gün önce 1,8 MVar kapasitif reaktif güç olan sistem ters yöne çıkarak, trafo endüktif yüklenerek yaklaşık 0,4 MVar endüktif reaktif güç sistemde görünmektedir. Bu 6 saatlik destek için iletim trafosunun üretim-tüketim trendinde kış döneminde değişiklik göstermeyeceği 6 aylık periyot boyunca bu destek yeterli olacağını göstermektedir.

Son olarak GES invertörlerden endüktif reaktif güç desteği alınması durdurulduğunda sistem 02.00-08.00 saatleri arasında tekrardan sistemde kapasitif güç oluşmaktadır.



Şekil 14. GES invertlerden endüktif reaktif destek alınması sonucu trafo merkezi sayaç değerlerinde değişim

Ayrıca, destek alma anında bir invertöre ait trend grafiğine göre 400 KVAR indiktüf reaktif destek almak için komut gönderildiğinde çok kısa bir süre içerisinde invertör tepki vermiştir. Şekil 15'te SCADA ekran görüntüsündeki gibi düşey eksen reaktif güç değeri olup, yatay eksen zaman değerlerini göstermektedir.



Şekil 15. Bir invertöre ait reaktif destek alma anı trendi

4.5. Teknik Kayıp İçin Pilot Uygulama Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında GES'lerden reaktif güç desteği alınması veya reaktör yatırımı yapılmasının şebekeye etkileri karşılaştırılmıştır. Çizelge 2'de mevcut durumda reaktör devrede iken ve yeni durumda GES invertöründen aynı şekilde 2400 kVAR destek alındığında kayıp oranları incelenmiştir. Şebekeye bağlı olan reaktör üzerindeki giriş tarafındaki sayaç verileri ve reaktör çıkışındaki sayaç verilerindeki endeks değerleri kullanılarak teknik kayıp oranı %5,35 olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde GES invertöründen reaktif destek alındığı anda teknik kalite kaydedici verilerinden alınan değerler doğrultusunda invertör devrede iken alınan değerler ve devreden çıktığında alınan değerler kullanılarak hesaplanan teknik kayıp oranı %2,65 görülmektedir.

Bu durumda, reaktörler devreye bağlandığında GES'ten reaktif destek alınma durumuna göre daha fazla teknik kayıp oluştuğu anlaşılmaktadır. GES'ten alınan reaktif desteğin %2,5 oranında teknik kayıpta iyileşme sağlamaktadır.

Çizelge 2. Reaktör ve GES inverter kayıp oranı kıyaslaması

Reaktif Destek Alınan Sistem	Reaktif Destek Alınan Güç	Kayıp Oranı
Reaktör	2400 kVAr	%5,15
GES İnverter	2400 kVAr	%2,65

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Mevcut Durum ve Potansiyel

Çizelge 3'te Meram Elektrik Dağıtım Şirketi bölgesinde bulunan 2023 yılı için dağıtık üretim santrallerinin kurulu güçleri görülmektedir. Meram Elektrik Dağıtım Şirketi bölgesinde 1,7 GW dağıtık üretim kaynağı bulunmaktadır. Her geçen gün ise bu kaynakların sayısı ve kurulu güç miktarlarında artışlar devam etmektedir.

Çizelge 3. Meram Elektrik Dağıtım Şirketi bölgesindeki dağıtık üretim santralleri kurulu güçleri (MEDAŞ, 2023)

Kaynak Türü	Kurulu Güç (MW)
Güneş	1413
Biyokütle	200
Hidroelektrik	103
Rüzgâr	17
TOPLAM	1733

Meram Elektrik Dağıtım Şirketi şebekesine bağlı 2023 itibariyle 1941 adet dağıtık üretim kaynağı bulunmaktadır. Aşağıda Çizelge 4'te Meram Elektrik Dağıtım Şirketi için reaktif güç kontrolü potansiyeli paylaşılmıştır. İntertör kontrollü kaynaklarda tesis gücünün invertör gücüne eşit olduğu varsayımı yapılmıştır. Meram Elektrik Dağıtım Şirketi bölgesinde 1941 adet kaynakların toplam gücü 1733 MW'dır. Bu santraller 0,8 güç faktörü ile çalıştığı varsayıldığında 1039,8 MVAR reaktif güç potansiyeli bulunmaktadır. Ayrıca, bu santrallerin 0,9 güç faktörü ile çalıştığı varsayılırsa 755,4 MVAR reaktif güç potansiyeli olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 4. MEDAŞ reaktif güç potansiyeli

Kaynak Türü	Tesis Sayısı (Adet)	Tesis Gücü (MW)	Güç Faktörü	Reaktif Güç Potansiyeli (MVAR)
Dağıtık Üretim Kaynakları	1941	1733	±0,80	1039,8
Dağıtık Üretim Kaynakları	1941	1733	±0,90	755,4

5.2. Maliyet Analizi: 2023 Yılı Meram Elektrik Dağıtım Bölgesi Kompanzasyon İhtiyacının GES'lerden Karşlanması

Meram Elektrik Dağıtım Şirketi dağıtım bölgesinde yapılan analizler sonucu enerji alınan trafo merkezleri için yapılacak kompanzasyon ihtiyaçları tespit edildi. Bu

tespitler doğrultusunda 16 farklı trafo merkezi reaktör yatırım yapılması gerektiği ortaya çıktı. Çizelge 5'te bu 16 farklı trafo merkezi için yapılması gereken 25 adet reaktör yatırımına ait güç ve yatırım bedelleri görülmektedir. 25 adet reaktör yatırımı için toplamda 65,6 MVAR reaktör gücüne ve 1.890.223 \$ maliyette ihtiyaç bulunmaktadır. Bu bölgede trafo merkezilerine bağlı fiderlerde bulunan güneş enerji santrallerinin ise toplamda 1054,73 MW gücünde üretim kapasitesi bulunmaktadır. Ayrıca her fider için gerekli reaktör gücü değeri ilgili fiderde bağlı GES'ten alabileceğimiz reaktör gücünden azdır. Dolayısıyla her trafo için gerekli reaktör gücünün tamamı GES santrallerinden sağlanabilir. Bu durumda sadece 2023 yılı için yapılması gereken kompanzasyon sistemleri yerine güneş enerji santralinden reaktif destek alındığında reaktör yatırımı için gerekli olan 1,9 Milyon \$'lık maliyet faydası sağlanabilir.

5.3. Teknik Kayıp Analizi: 2023 Yılı Meram Elektrik Dağıtım Bölgesi Kompanzasyon İhtiyacının GES'lerden Karşılanması Teknik Kayıp Analizi

Bu çalışma kapsamında GES'lerden reaktif güç desteği alınmasının ve reaktör yatırımlarının yapılmasının şebekeye etkileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. 2400 kVAR gücünde reaktörden reaktif güç desteği alındığında %5,15 oranında teknik kayıp meydana gelmektedir.

Ayrıca, GES invertörlerden reaktif destek alındığı anda teknik kalite kaydedici verileri kullanılarak hesaplanan değerlere göre, 2400 kVAR seviyesinde GES'lerden reaktif güç desteği alındığında %2,65 oranında teknik kayıp meydana gelmektedir.

Hem reaktörden hem de GES invertöründen 2400 kVAR reaktif güç desteği alındığında gerçekleşen bu iki uygulama için ortalama tüketimler Çizelge 6'da ki gibidir. Bu her iki destek için 8760 saatlik verilere göre yaklaşık 8,5 Milyon TL kadar bir teknik kayıp maliyeti ortaya çıkmaktadır (2023 yılı EÜAŞ ve piyasa ortalaması: 1097 ₺/MWh olarak alınarak hesaplama yapılmıştır).

Sadece tek bir iletim trafosu için yapılan bu teknik kayıp çalışmasına göre bir yılda toplamda 8,5 Milyon ₺ gibi bir teknik kayıp maliyet bedeli ortaya çıkmaktadır. Bunu ülkemizde bulunan trafo merkezlerindeki bütün trafolarla bağlı kompanzasyon sistemlerinde yapıldığında teknik kayıp kaynaklı maliyetler çok daha büyük çıkacaktır.

Çizelge 5. MERAM bölgesi için 2023 yılı kompanzasyon yatırım ihtiyaçları ve ilgili trafolara bağlı GES kurulu güçleri

TM	Şönt Reaktör (MVA _r)	Yatırım Maliyeti	Lisanssız GES Kurulu Güç (MW)
TM 1- TRA	2,4	\$ 75.351	15,34
TM 1- TRB	1,8	\$ 69.527	
TM 2- TRA	3,6	\$ 69.368	55,38
TM 2- TRA	2,4	\$ 72.158	
TM 2- TRB	1,8	\$ 69.527	
TM 3- TRA	3,6	\$ 98.672	89,78
TM 4- TRA	1,8	\$ 69.527	53,11
TM 5- TRA	2,4	\$ 75.351	61,7
TM 6- TRA	1,8	\$ 71.742	88,79
TM 6- TRB	1,8	\$ 71.742	
TM 7- TRA	3,6	\$ 88.302	67,34
TM 7- TRB	2,4	\$ 75.351	
TM 8- TRA	2,4	\$ 69.731	75,84
TM 8- TRB	2,4	\$ 75.351	
TM 9- TRA	2,4	\$ 51.451	134,33
TM 9- TRB	2,4	\$ 75.351	
TM 10- TRA	3,6	\$ 51.451	73,15
TM 10- TRB	2,4	\$ 75.351	
TM 11- TRA	5	\$ 105.692	38,95
TM 12- TRA	2,4	\$ 75.799	59,05
TM 13- TRA	2,4	\$ 76.174	101,85
TM 14- TRA	2,4	\$ 93.268	79,5
TM 14- TRB	2,4	\$ 75.351	
TM 15- TRA	2,4	\$ 64.103	14,35
TM 16- TRA	3,6	\$ 94.535	46,3
TOPLAM	65,6	\$ 1.890.223	1054,73

Çizelge 6. 2023 yılı kayıp enerji bedeli

Aktif Güç (MW)	Reaktör ile GES İnvörtör Arasındaki Kayıp Oran Farkı	Kayıp Güç (MW)	8760 Saatlik Kayıp Enerji (MWh)	2023 Yılı Kayıp Enerji Bedeli (₺)
35,28	2,50%	0,882	7726,32	₺8.475.773

5.4 Sonuçlar

Yenilenebilir enerjinin devreye girmesi sonucu yaşanan kapasitif reaktif artması kaynaklı sorun aynı TM'ye bağlı bir güneş enerji santralinden endüktif destek alınarak giderilmiştir.

GES'lerden beklenen performanstan da görüldüğü üzere, reaktif güç desteği, gerilim regülasyonunu sağlamak için iyi bilinen bir yöntemdir ve güç elektroniğine dayanan yeni nesil araçların çoğu bu amaç için çok uygundur. Bu nedenle, reaktif güç akışı limitlerini sağlayabilmek için reaktif güç kompanzasyonu yatırımlarının yanı sıra GES'lerin invertörlerinin reaktif kapasitelerinden faydalanılması kanıtlanmıştır. Elektrik dağıtım şirketleri trafo merkezi bazlı reaktif cezaya girmemek için kompanzasyon yatırımları yapmaktadır, bu yatırımları fider baz alarak değil sadece trafo merkezi reaktif güç sınırlarında kalması için yapılmaktadır. Örneğin bir trafo merkezinin endüktif reaktif güç desteğine ihtiyacı var. Bu ihtiyaç, endüktif yüklü bir fiderden verilirse teknik kaybın artmasına neden olur. Trafo merkezi belki sınır değerleri içerisinde tutulacak ancak fider bazlı kayıplar artacaktır. Ancak bu durum GES'lerden alınarak yapılırsa hem trafo merkezli bazlı hem de fider bazlı kompanzasyon sağlanarak teknik kayıplar daha da azaltılabilir.

5.5 Öneriler

Meram Elektrik Dağıtım Şirketi'nde son zamanlarda artan yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle invertör kontrollü tesislerden sağlanabilecek reaktif güç desteği ile hem şebeke gerilimi +/- yönde etkin bir şekilde kontrol edilebilecek, hem de her yıl gerçekleştirilen kompanzasyon yatırımları önemli oranda azaltılmış olacaktır. Dağıtık üretim kaynaklarının artması sonucu karşılaşılan işletmesel problemler azaltılmış olacak ve yenilenebilir enerji entegrasyonu artacaktır. Ayrıca gerilim profilinin etkin bir şekilde kontrol edilmesinin önemli bir diğer sonucu ise reaktör ve GES invertörden alınan reaktif destek kıyaslamasına göre özellikle 900 kVAr ve 1200 kVAr için teknik kayıpların optimize edilmesine olanak sağlayacağı ve şebeke verimliliğinin artırılmasına yardımcı olacağı kanıtlanmıştır.

Son olarak mevcut durumda kompanzasyon tesisleri trafo merkezinin bir fiderine irtibatlandırılmaktadır. Elektrik dağıtım şirketleri sadece reaktif cezaya girilmemesi için kompanzasyon yatırımı yapmaktadır. Örneğin, bir trafo merkezinin endüktif reaktife ihtiyacı olduğunu varsayalım. Bu durumda bir fidere bağlı reaktörden endüktif destek alınmaktadır. Ama belki de reaktör bağlı olan fider endüktif yüklüdür. Trafo merkezi reaktif sınır değerinde kalması için endüktif yüklü fiderden tekrardan endüktif destek alarak teknik kayıpların daha da artmasına neden olmaktadır.

Dağıtım şebekesine bağlı üretim santrallerinden reaktif destek alması yaygınlaştığında fider bazlı bunlar analiz edileceği için hem trafo merkezi reaktif sınır

aralığında kalmış olacak hem de trafo merkezi fider çıkışları reaktif ihtiyacına göre ilgili fiderden destek alınarak teknik kayıp optimizasyonu da yapılmış olacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Ahuja, R.K., Maity, T., Kakkar, S., 2016, "Control of active and reactive power of grid connected inverter using adaptive network based fuzzy inference system", IEEE 7th Power India International Conference,
- Bernáth, F. ve Mastný, P., 2012, "Power factor compensation of photovoltaic power plant", *Electroscope* 5,
- Bañuelos, M., Trujillo, M.E., Chan, J.C., and Kamal, T., 2023, "Experimental Study of an Inverter Control for Reactive Power Compensation in a Grid-Connected Solar Photovoltaic System Using Sliding Mode Control", *Energies* 2023, 16,853. <https://doi.org/10.3390/en16020853>,
- Chatterjee, A., Mohanty, K., Kommukuri, V.S., Thakre, K., 2017, "Design and experimental investigation of digital model predictive current controller for single phase grid integrated photovoltaic systems", *Renew. Energy* 108: 438-448,
- Delfanti, A., 2014, "The New Role DSOs: Ancillary services from RES towards a local dispatch", CIREN Rome,
- Dhaneria, A., 2020, "Grid Connected PV System with Reactive Power Compensation for the Grid", IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference,
- ENTSO-E, 2017, Balancing and Ancillary Services Markets.
- Eurelectric, ENTSO-E, GEODE, EDSO for Smart Grids, and CEDEC, "General Guidelines for Reinforcing the cooperation between TSOs and DSOs." 2015
- Farivar, M., Neal, R., Clarke, C., Low, S., 2012, Optimal inverter VAR control in distribution systems with high PV penetration, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1-7,
- FERC - Federal Energy Regulatory Commission, 2018, Guide to Market Oversight: Glossary, <https://www.ferc.gov/market-oversight/guide/glossary.asp>).
- Glende, E., Wolter, M., Arendarski, B., Lombardi, P., Komarnicki, P., 2018, "Optimal operational management methods of voltage control with a high feed of renewable energy sources", International Energy Conference (ENERGYCON),
- Gustavsson, R., 2013, Ancillary Services for Smart Grids – Power Quality Markets, IEEE Grenoble Conference,
- Hikosaka, S., Ikeda, F., Yamada, H., Tanaka, T., Okamoto, M. ve Lee, S.R., 2018, "New Constant DC-Capacitor Voltage Control-Based Reactive Power Control Strategy for Active Power-Line Conditioner in Three-Phase Four-Wire Distribution Feeders" 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),
- Howlader, A. M., Sadoyama, S., Roose, L. R. and Sepasi, S., 2018, "Distributed voltage regulation using Volt-VAR controls of a smart PV inverter in a smart grid: An experimental study", *Renewable Energy*, 127: 145-157,
- Jahangiri, P., Aliprantis, D.C., 2013, Distributed Volt/VAR Control by PV Inverters, *IEEE Transactions on Power Systems* 28: 3429-3439.
- Joos, G., Ooi, B.T., McGillis, D., Gallana, F.D., Marceau, R., 2000, The potential of distributed generation to provide ancillary services, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE. Vol. 3.
- Joseph, A., Smedley, K. and Mehraeen, Ş., 2021, "Secure Power Distribution Against Reactive Power Control Malfunction in DER Units", *IEEE Transactions on Power Delivery* 36(3): 1552-1561,
- Kayal, P. and Chanda, C.K., "Strategic approach for reinforcement of intermittent renewable energy sources and capacitor bank for sustainable electric power

- distribution system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 83: 335–351,
- Kobayashi, H., ve Hatta, H., 2011, “Reactive power control method between DG using ICT for proper voltage control of utility distribution system”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*,
- Köroglu, H., Şafak, M.E., Bayer, M., Altun, B. and Altun, H.O., 2022, Providing Ancillary Services From Distributed Energy Resources Connected To Electricity Distribution Grid, *Current Studies in Basic Sciences, Engineering and Technology-International Society for Research in Education and Science (ISRES)*, 129-167,
- Kryonidis, G.C., Malamaki, K.N.D., Gkavanoudis, S.I., Oureilidis, K.O., 2020, “Distributed Reactive Power Control Scheme for the Voltage Regulation of Unbalanced LV Grids”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12: 1301-1310,
- Kumar, D., Dhundhara, S., Verma, Y.P. ve Khanna, R., 2022, “Role of optimal sized dual energy storage based microgrid for ancillary service support to utility grid” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54,
- Kumar, V. and Singh M., 2021, “Reactive power compensation using derated power generation mode of modified P&O algorithm in grid-interfaced PV system” *Renewable Energy*, 178: 108,117,
- Lalor, G., Mullane, A., ve O'Malley, M., 2005, “Frequency Control and Wind Turbine Technologies” *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 (4): 1905-1913,
- Lamadrid, A.J., Mount, T., 2012, “Ancillary services in systems with high penetrations of renewable energy sources, the case of ramping” *Energy Economics*, 34 (6): 1959-1971
- Leone, A.S., Neto, P. and Américo, V.J., 2018, “Study of voltage profile in distribution network using the reactive power control in distributed generation”, *Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*,
- Migueluez, E. L., Cortes, E., Roriguez, L. R. and Camino, G. L., 2007, An Overview of Ancillary Services in Spain, *Electric Power Systems Research*, 515-523,
- Roy N.K., Pota, H.R. and Hossain, J. “Reactive power management of distribution networks with wind generation for improving voltage stability. *Renewable Energy*, 58: 85–94,
- Sortomme, E. Ve El-Sharkawi, M., 2012, Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 351-359,
- Sreekumar, S., Kumar, D.S. and Savier, J., 2020, “A Case Study on Self Healing of Smart Grid With Islanding and Inverter Volt–VA Function”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56 (5): 5408-5416
- Tankut, B.E., 2019, “Voltage regulation for grid connected photovoltaic systems using reactive power Yüksek Lisans, Hasan Kalyoncu Üniversitesi,
- Tarek, M.Ş.İ., Siam, E., Ziya, M. Ve Rahman, M.M., 2018, “A Novel Five-Level Inverter Topology with Reactive Power Control for Grid-Connected PV System”, *International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE)*,
- Tekin, M., 2019, “Elektrik Şebekelerinde Reaktif Güçlerin Fotovoltaik Sistemlerle Bastırılması”, *Doktora, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi*,
- Tong, Z., Mansouri, S.A., Huang, S., Jordehi, A.R. ve Tostado-Véliz, M., 2023, “The role of smart communities integrated with renewable energy resources, smart homes and electric vehicles in providing ancillary services: A tri-stage optimization mechanism” *Applied Energy*, 351: 121897,
- Turkey Energy Market Regulatory Authority-EMRA, 2014, *Electricity Grid Regulation*.

- Viet, D.T., Tien, P.C., 2018, "Impact of Ancillary Services and Its Prices on Large-Scale Solar and Wind Power Penetration in Electricity Market", 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD),
- Wang, Y., Zhao, T., Ju, C., Xu, Y. and Wang, P., "Two-Level Distributed Volt/VAr Control Using Aggregated PV Inverters in Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Delivery, 35 (4): 1844-1855,
- Yang, D., Wang, X., Liu, F., Xin, K., Liu, Y. ve Blaabjerg, F., 2019, "Adaptive Reactive Power Control of PV Power Plants for Improved Power Transfer Capability Under Ultra-Weak Grid Conditions" IEEE Transactions on Smart Grid, 10 (2): 1269-1279,
- Zad, B.B, Lobry, J., Vallee, F. Ve Hasanvand, H., 2014, "Optimal reactive power control of DGs for voltage regulation of MV distribution systems considering thermal limit of the system branches", International Conference on Power System Technology,
- Zhong, W., Tzounas, G., ve Milano, F., 2022, "Improving the Power System Dynamic Response Through a Combined Voltage-Frequency Control of Distributed Energy Resources", IEEE Transactions on Power Systems, 37 (6): 4375-4384,
- Zipf, M. Ve Möst, D., 2016, Cooperation of TSO and DSO to provide ancillary services, 13th International Conference on the European Energy Market (EEM).

